آشنایی با

فیزیک هسته‌ای

جلد اول

کِنِت کرین

ترجمهٔ ابراهیم ابوکاظمی، منیژه رهبر

آشنایی با

فیزیک هسته‌ای

جلد اول

کِنِت کرین

ترجمهٔ ابراهیم ابوکاظمی، منیژه رهبر

مرکز نشر دانشگاهی، تهران

مرکز نشر دانشگاهی
۶۲۴

فیزیک
۵۴

Introductory Nuclear Physics
Kenneth S. Krane
John Wiley & Sons, 1988

آشنایی با فیزیک هسته‌ای
جلد اول
تألیف کِنِت کرین
ترجمهٔ دکتر محمدابراهیم ابوکاظمی، دکتر منیژه رهبر
ویراستهٔ دکتر محمدابراهیم ابوکاظمی
مرکز نشر دانشگاهی
چاپ اول ۱۳۷۱
چاپ چهارم ۱۳۸۵
تعداد ۲۰۰۰
حروفچینی: مهدی
لیتوگرافی: کورش
چاپ و صحافی: مازگرافیک
حق چاپ برای مرکز نشر دانشگاهی محفوظ است

فهرست‌نویسی پیش از انتشار کتابخانهٔ ملی جمهوری اسلامی ایران

کرین، کنت Krane, Kenneth S.
آشنایی با فیزیک هسته‌ای / کنت کرین؛ ترجمه محمد ابراهیم ابوکاظمی، منیژه رهبر. — تهران: مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۱ - ۱۳۷۳.
۲ج. : مصور، جدول، نمودار. — (مرکز نشر دانشگاهی؛ ۶۲۴، ۷۱۵: فیزیک؛ ۵۴، ۶۴)
ISBN 964-01-8120-X (دوره)
ISBN 964-01-0624-0 (ج. ۱)
ISBN 964-01-0715-8 (ج. ۲)
فهرست‌نویسی براساس اطلاعات فیپا.
عنوان اصلی: Introductory nuclear physics.
"کتاب حاضر براساس ویرایش دوم کتاب (Introductory nuclear physics) نوشته دیوید هالیدی بازنویسی شده است".
واژه‌نامه.
کتابنامه.
مندرجات: ج. ۱. مبانی ساختار هسته‌ای، واپاشی هسته‌ای و رادیواکتیویته. — ج. ۲. واکنشهای هسته‌ای و ملحقات و کاربردها / ترجمهٔ ناصر میرفخرایی، مجید مدرس.
ج. ۱ (چاپ چهارم: ۱۳۸۵).
۱. فیزیک هسته‌ای. الف. هالیدی، دیوید، ۱۹۱۶ - ، Halliday, David. ب. ابوکاظمی، ابراهیم، ۱۳۲۴ - ، مترجم. ج. رهبر، منیژه، ۱۳۲۴ - ، مترجم. د. مرکز نشر دانشگاهی. هـ. عنوان.
۵آ۴ک/QC۷۷۶ ۵۳۹/۷
۱۳۷۱
کتابخانهٔ ملی ایران ۱۸۶۸ - ۷۱م*

بسم الله الرحمن الرحیم

فهرست

عنوان	صفحه
پیشگفتار	۱
قسمت ۱. مبانی ساختار هسته‌ای	۷
۱. مفاهیم پایه	۸
۱.۱ نگاهی به‌پیشینهٔ تاریخی	۹
۲.۱ چنداصطلاح مقدماتی	۱۰
۳.۱ خواص هسته‌ای	۱۳
۴.۱ یکاها ومرتبه‌های بزرگی	۱۵
مراجع مطالعات تکمیلی	۱۶
۲. مبانی مکانیك کوانتومی	۱۸
۱.۲ رفتار کوانتومی	۱۹
۲.۲ اصول مکانیك کوانتومی	۲۱
۳.۲ مسائل یك‌بعدی	۲۵
۴.۲ مسائل سه‌بعدی	۳۸
۵.۲ نظریهٔ کوانتومی تکانهٔ زاویه‌ای	۵۱
۶.۲ پاریته	۵۵
۷.۲ آمار کوانتومی	۵۶
۸.۲ گذار بین‌حالتها	۵۸
مراجع مطالعات تکمیلی	۶۰

عنوان	صفحه

مسائل ۶۱

۳. خواص هسته‌ها ۶۳
۱.۳ شعاع هسته ۶۴
۲.۳ جرم نوکلیدها وفراوانی آنها ۸۲
۳.۳ انرژی بستگی هسته‌ای ۸۹
۴.۳ تکانهٔ زاویه‌ای هسته‌ها و پاریته ۹۶
۵.۳ گشتاور الکترومغناطیسی هسته ۹۸
۶.۳ حالتهای برانگیختهٔ هسته ۱۰۳
مراجع مطالعات تکمیلی ۱۰۵
مسائل ۱۰۶

*۴. نیروی بین نوکلئونها ۱۰۹
۱.۴ دوترون ۱۱۰
† ۲.۴ پراکندگی نوکلئون-نوکلئون ۱۱۷
۳.۴ برهم‌کنشهای پروتون-پروتون و نوترون-نوترون ۱۲۹
۴.۴ خواص نیروی هسته‌ای ۱۳۴
۵.۴ مدل نیروی تبادل ۱۴۵
مراجع مطالعات تکمیلی ۱۵۱
مسائل ۱۵۲

*۵. مدلهای هسته‌ای ۱۵۶
۱.۵ مدل پوسته‌ای ۱۵۷
۲.۵ هسته‌های Z زوج و N زوج وساختار جمعی ۱۷۹
۳.۵ مدلهای هسته‌ای واقعیتر ۱۹۸
مراجع مطالعات تکمیلی ۲۰۷
مسائل ۲۰۸

قسمت ۲. واپاشی هسته‌ای و رادیواکتیویته ۲۱۱
۶. واپاشی رادیواکتیو ۲۱۲
۱.۶ قانون واپاشی رادیواکتیو ۲۱۳
† ۲.۶ نظریهٔ کوانتومی واپاشیهای رادیواکتیو ۲۱۹
۳.۶ تولید و واپاشی عناصر رادیواکتیو ۲۲۳
۴.۶ رشد اکتویتهٔ دختر-هسته ۲۲۵
۵.۶ انواع واپاشیها ۲۲۹

عنوان	صفحه
۶.۶ رادیواکتیویتهٔ طبیعی	۲۳۵
*۷.۶ عمرسنجی رادیواکتیو	۲۳۸
*۸.۶ یکاهای اندازه‌گیری تابش	۲۴۲
مراجع مطالعات تکمیلی	۲۴۷
مسائل	۲۴۷
*۷. آشکارسازی تابشهای هسته‌ای	۲۵۲
۱.۷ برهم‌کنشهای تابش با ماده	۲۵۳
۲.۷ شمارگرهای گازی	۲۶۶
۳.۷ آشکارسازهای سوسوزن (سنتیلاسیون)	۲۶۹
۴.۷ آشکارسازهای نیمرسانا	۲۷۷
۵.۷ آمار شمارش	۲۸۱
۶.۷ اندازه‌گیری انرژی	۲۸۴
۷.۷ اندازه‌گیریهای همفرودی و تفکیک زمانی	۲۹۳
۸.۷ اندازه‌گیری طول عمرهای هسته‌ای	۲۹۶
۹.۷ سایر انواع آشکارساز	۳۰۱
مراجع مطالعات تکمیلی	۳۱۲
مسائل	۳۱۳
۸. واپاشی آلفازا	۳۱۶
۱.۸ منشأ واپاشی آلفازا	۳۱۷
۲.۸ فرایندهای واپاشی آلفازا	۳۱۸
۳.۸ رده‌بندی واپاشی آلفازا	۳۱۹
† ۴.۸ نظریهٔ گسیل آلفا	۳۲۲
۵.۸ تکانهٔ زاویه‌ای و پاریته در واپاشی آلفازا	۳۳۰
۶.۸ طیف‌نمایی واپاشی آلفازا	۳۳۴
مراجع مطالعات تکمیلی	۳۴۳
مسائل	۳۴۴
۹. واپاشی بتازا	۳۴۸
۱.۹ آزادشدن انرژی در واپاشی بتازا	۳۴۹
† ۲.۹ نظریهٔ فرمی دربارهٔ واپاشی بتازا	۳۵۴
۳.۹ آزمونهای تجربی «کلاسیک» برای نظریهٔ فرمی	۳۶۰
۴.۹ قواعدگزینش تکانهٔ زاویه‌ای و پاریته	۳۶۸

عنوان	صفحه

۵.۹ نیمه‌عمرهای تطبیقی و واپاشیهای ممنوع	۳۷۴
*۶.۹ فیزیك نوترینو	۳۷۷
*۷.۹ واپاشی دوبتایی	۳۸۱
*۸.۹ گسیل نوکلئون تأخیری در واپاشی بتازا	۳۸۵
*۹.۹ ناپایستگی پاریته	۳۹۳
*۱۰.۹ طیف‌نمایی بتا	۴۰۱
مراجع مطالعات تکمیلی	۴۱۰
مسائل	۴۱۱
۱۰. واپاشی گامازا	۴۱۶
۱.۱۰ انرژی واپاشی گامازا	۴۱۷
۲.۱۰ تابش الکترومغناطیسی کلاسیك	۴۱۸
۳.۱۰ محاسبهٔ مکانیك کوانتومی	۴۲۱
۴.۱۰ قواعد گزینش تکانهٔ زاویه‌ای وپاریته	۴۲۴
۵.۱۰ اندازه‌گیری توزیع زاویه‌ای وقطبیدگی	۴۲۶
۶.۱۰ تبدیل داخلی	۴۳۳
۷.۱۰ طول عمرهای گسیل γ	۴۴۱
*۸.۱۰ طیف‌نمایی پرتو گاما	۴۴۴
*۹.۱۰ فولوئورسانی تشدید هسته‌ای واثر موسباؤر	۴۵۷
مراجع مطالعات تکمیلی	۴۷۱
مسائل	۴۷۲
پیوستها	۴۷۷
الف. نسبیت خاص	۴۷۸
ب. چارچوب مرجع مرکز جرم	۴۸۲
ج. جدول خواص هسته‌ای	۴۸۷
واژه‌نامه	۴۹۹
فهرست راهنما	۵۰۶

پیشگفتار

تألیف این کتاب را به صورت همکاری با دیوید هالیدی آغاز کردم تا به‌اتفاق یکدیگر ویرایش دوم کتاب درسی‌اش، آشنایی با فیزیك هسته‌ای (وایلی، ۱۹۵۵)، را مورد تجدیدنظر قرار دهیم و آن را روزآمد کنیم. پس از آماده شدن طرح اولیه، معلوم شد که استاد هالیدی به خاطر تعهدات دیگرش فقط می‌تواند وقت بسیار محدودی را به‌این کار اختصاص دهد، و درنتیجه خواستار کناره‌گیری شخص خودش ازشرکت فعال دراین طرح شد. این پیشنهاد را من با بی‌میلی و تأسف پذیرفتم. استاد لطف کردند و حق استفاده از مطالب ویرایش قبلی کتاب را به‌من واگذار کردند.

من نخستین بار به‌عنوان دانشجوی کارشناسی فیزیك با کتاب درسی هالیدی روبه‌رو شدم، که شاید نخستین آشنایی جدی من با فیزیك هسته‌ای بوده است. به‌خاطر دارم که روانی و خوانایی کتاب مرا تحت تأثیرقرارداده بود. من دراین بازنویسی کوشیده‌ام تا این ویژگیها راکه ازجملهٔ امتیازات اثرقبلی بوده است، حفظ کنم.

خواننده. این کتاب اصولا برای دانشجویان کارشناسی نوشته شده است، ولی می‌توان آن را برای مطالعهٔ اجمالی مبانی فیزیك هسته‌ای در دورهٔ کارشناسی ارشد نیز به‌کاربرد. کتاب به‌طور مشخص برای دانشجویان رشتهٔ فیزیك و به‌عنوان بخشی از فیزیك جدید در نظر گرفته شده است، اما باگزینش مناسبی ازمطالب می‌توان آن را برای دیگر رشته‌های علوم وتکنولوژی هسته‌ای، ازجمله شیمی‌هسته‌ای، مهندسی هسته‌ای، زیست‌شناسی تابشی، و پزشکی هسته‌ای نیزمورد استفاده قرارداد.

پیش‌نیاز. دانشجوی خوانندهٔ این کتاب باید درفیزیك کوانتومی، درسطحی مقدماتی (که معمولا درکتابهای فیزیك جدید مطرح می‌شود) یا در سطح پیشرفته‌تر دورهٔ کارشناسی، زمینهٔ قبلی داشته باشد. (مختصری ازمطالب کوانتومی مورد نیاز را درفصل ۲ مرور کرده‌ام.) بدین ترتیب، کتاب برای دو سطح مختلف طراحی شده است: مطالبی مانند احتمال گذار یا عناصر ماتریسی راکه نیاز به‌مکانیك کوانتومی پیشرفته دارند، می‌توان جدا درنظر گرفت و در مطالعهٔ مقدماتی ازآنها صرفنظر کرد. این جداسازیها و صرفنظر کردنها، بدون اینکه به‌جریان منطقی بحث لطمه‌ای وارد کند، قابل اجراست.

پیش‌نیاز ریاضی این کتاب درحد معادلات دیفرانسیل است.

تأکید. این کتاب دارای دو ویژگی برجسته است. نخستین ویژگی آن، وسعت نظر وتأکید بر گسترهٔ مطالب است. مدرس بـا در اختیار داشتن مجموعهٔ گسترده‌ای ازمطالب، متناسب با نیاز خاص دانشجو، می‌تواند سرفصلهای درس را برگزیند. مطالب ایـن کتاب برای دوره‌های یك ساله تا حدی ناکافی است، ولی برای دوره‌های ثلثی یا نیمسالی خیلی زیاد است. بنابراین مدرس می‌تواند مطالب را، متناسب با فرصت موجود، چنان انتخاب کندکه دانشجویان را تاحد ممکن با زمینه‌های کار فیزیك هسته‌ای آشنا سازد.

ویژگی دوم این کتاب، بدون احساس شرمندگی، تأکید پدیده شناختی و طرز ارائهٔ تجربی آن است. بحث واپاشی و پدیده‌های واکنش هسته‌ای با نمونه‌هایی از بررسیهای تجربی که ازنشریات علمی اخذ شده‌اند، همراه است. این نمونه‌ها را در پی جستجو برای مقالاتی که اطلاعات مورد نیاز را به‌روشن‌ترین وجه ممکن ارائه دهند و ارتباط تنگاتنگی بـا مطلب مـورد بررسی داشته باشند، انتخاب کرده‌ام. آزمایشهای بدیع را اغلب بـا نمودارهایی از وسایل آزمایش، همراه با نتایج وخطاهای آن، ارائه داده‌ام. بدین‌ترتیب، کوشیده‌ام تـا به دانشجویان بفهمانم که پیشرفت فیزیك هسته‌ای منحصراً از بلندای پیشانی فرمی برنخاسته است، بلکه حاصل تلاشهای طاقت‌فرسای آزمایشگاهی نیز هست. درهمین حال، بنیان منطقی وهدف آزمایشها را نیزمورد بحث قرارداده‌ام، وسهم آنها را درپیشرفت نظریه خاطرنشان کرده‌ام.

سازمان. کتاب ازچهار قسمت تشکیل شده‌است: مبانی ساختارهسته‌ای،رادیواکتیویته و واپاشی هسته‌ای، واکنشهای هسته‌ای، و ملحقات وکاربردها.[۱] درقسمت اول، مطالب پایه دربارهٔ شکل واندازهٔ هسته‌ها، مسئلهٔ دونوکلئون، ومقدماتی از مدلهای هسته‌ای موردبحث و بررسی قرار می‌گیرند. در دوره‌های فشرده، بدون اینکه لطمه‌ای به‌پیوستگی مطالب وارد شود، می‌توان از دو موضوع آخرصرفنظرکرد. در قسمت دوم که مربوط به‌رادیواکتیویته و واپاشی است، موضوعات سنتی را همراه با مطالب جدیدی که پل ارتباط بین واپاشی هسته‌ای وجریان تحقیقی معاصر (مانند مد واپاشی «سنگین» مثلا به‌صورت ^{14}C که اخیراً کشف شده‌است، واپاشی دوبتایی، گسیل نوکلئون تأخیری در واپاشی بتازا، اثرموسباوئر، وغیره) هستند آورده‌ام. در قسمت سوم اجمالی از واکنشهای هسته‌ای، ازجمله شکافت و همجوشی هسته‌ای وکاربرد آنها، موردبحث قرارگرفته‌است. درقسمت چهارم ازموضوعاتی سخن رفته‌است که فقط به‌طورتقریبی می‌توان آنها را زیرعنوان فیزیك هسته‌ای جای داد. از این جمله است برهم‌کنشهای فوق‌ریز، فیزیك ذرات، اخترفیزیك هسته‌ای، وکاربردهای عمومی نظیر پزشکی هسته‌ای. تأکید این قسمت روی مطالب مشترك بین فیزیك هسته‌ای و سایـر شاخه‌های تخصصی فیزیك و غیرفیزیك، از قبیل فیزیك اتمـی، فیزیك انرژی بالا، کیهان‌شناسی، شیمی، و پزشکی است. بیشترمطالب این قسمت، بویژه درفصلهای ۱۸و۱۹،

---

۱. ترجمهٔ فارسی این کتاب در دومجلد منتشر می‌شودکه جلد اول آن شامل قسمتهای ۱ و ۲ و جلد دوم شامل قسمتهای ۳ و ۴ است.ــ و.

از تحقیقات سالهای اخیر حاصل شده‌اند و بنابراین، طبق معمول این‌گونه مطالب، ممکن است حتی پیش از انتشار این کتاب هم منسوخ شوند. در صورتی که چنین وضعی اتفاق بیفتد، بازهم مدرس فرصتی طلایی به‌دست می‌آورد که نکات مهمی‌را دربارهٔ پیشرفت علم یادآور شود. در فصل ۲۰ کاربردهایی را متذکرشده‌ام که، مانند مورد روبش PET، از پژوهشهای اخیرحاصل شده‌اند. مطالب این قسمت ازکتاب تا حد زیادی بر پایهٔ مطالب قبلی استوار است. برای نمونه، اگرکسی بخواهد بدون آنکه درك درستی از واکنشهای هسته‌ای داشته باشد به مطالعهٔ فیزیك مزونها یا فیزیك ذرات بپردازد، کارش بی‌نتیجه خواهد بود.

ترتیب. فصلها یا بخشهایی راکه بدون از دست دادن پیوستگی مطالب می‌توان در مطالعهٔ اجمالی حذف کرد، درفهرست مطالب باعلامت‌ستاره (*) مشخص کرده‌ام. بااستفاده از فصلهای ۱، ۲، ۳، ۶، ۸، ۹، ۱۰، و ۱۱ که شامل مبانی واپاشی هسته‌ای و واکنشهای هسته‌ای است می‌توان یك دورهٔ فشردهٔ فیزیك هسته‌ای مقدماتی را ارائه داد، بدون آنکه از ساختار هسته‌ای چیز زیادی مطرح شود. واکنشهای شکافت همجوشی را می‌توان از فصلهای ۱۳ و ۱۴ بدانها افزود. با انتخاب بعضی ازمطالب فصلهای ۷ و ۱۵ می‌توان آشکارسازها و شتاب‌دهنده‌ها را هم معرفی کرد.

قسمت چهارم کتاب (فصلهای ۱۶ تا ۲۰)، به‌کاربردهای فیزیك هسته‌ای می‌پردازد و لزوماً متعاقب فصل ۱۵ نیست. درواقع، بسیاری ازمطالب این قسمت را پس‌از فراگیری فصل ۱۱ (واکنشهای هسته‌ای) می‌توان مطالعه‌کرد. فصل ۱۶ را که مشتمل بر اسپینها و گشتاورهاست، حتی می‌توان به قسمت اول منتقل کرد وآن را پس از فصل ۳ قرار داد. مطالعهٔ فصل ۱۹ (اخترفیزیك هسته‌ای) مستلزم مطالب پیش‌نیاز شکافت و همجوشی از فصلهای ۱۳و۱۴ است.

بیشتر مطالب این کتاب را با حداقل پیش‌نیاز مکانیك کوانتومی می‌توان فهمید. فصلها یا بخشهایی که مستلزم مکانیك کوانتومی پیشرفته‌تری (درسطح کارشناسی) هستند، در فهرست مطالب با علامت (†) مشخص شده‌اند.

تجربهٔ من نشان می‌دهد که بیشتر دانشجویان دورهٔ کارشناسی حتی مبانی نظریهٔ کوانتومی تکانهٔ زاویه‌ای را دشوار می‌یابند، و مفاهیم مجردتری مانند ایزوسپین می‌تواند آنها را با مشکلات جدی روبه‌رو کند. به همین دلیل، معرفی ایزوسپین را تا فصل ۱۱ (واکنشهای هسته‌ای) به تأخیرانداخته‌ام. استفاده از ایزوسپین در این فصل اجتناب‌ناپذیر است و برای آنکه اهمیت این مفهوم را در واپاشیهای بتا وگاما نشان دهم، کاربرد آن را دراین موارد هم متذکر شده‌ام. سعی نکرده‌ام که برای محاسبهٔ دامنه‌ها یا سطح مقطعها از نظریهٔ جفت‌شدگی ایزوسپین استفاده کنم. بنابراین در مطالعهٔ اجمالی می‌توان از بحث ایزوسپین بکلی صرفنظر کرد. اما استفاده از آن برای درك فصلهای ۱۷ و ۱۸ که دربارهٔ فیزیك ذرات و مزونهاست، صددرصد الزامی است.

نمادگذاری. دراین کتاب نمادگذاری استاندارد را برگزیده‌ام. دراین روش از

نماد T برای نمایش سه کمیت مختلف انرژی جنبشی، دما، و ایزوسپین استفاده می‌شود که خالی از دردسر نیست. اگر طرز نمایش متخصصان فیزیك ذرات راکه نماد I را برای ایزوسپین و J را برای اسپین هسته به‌کار می‌برند برگزینیم، برای نمایش تکانهٔ زاویه‌ای کل الکترونها نماد شناخته شده‌ای باقی نمی‌ماند. بـه همین دلیل، نماد I را برای تکانهٔ زاویه‌ای کل هسته، J را بـرای تکانهٔ زاویه‌ای کل الکتـرونها، و T را بـرای ایزوسپین به‌کار برده‌ام. برای رعایت هماهنگی، استفاده ازاین نمادها را به مباحث فیزیك ذرات در فصلهای ۱۷ و ۱۸ نیز گسترش داده‌ام، هرچندکه این طرز نمایش با نمادگذاری متداول در فیزیك ذرات درتضاد است. حـرف کوچك j را برای نمایش تکانهٔ زاویه‌ای کل یك الکترون دراتم یایك نوکلئون منفرد به‌کاربرده‌ام.

مراجع. هیچ سعی نکرده‌ام که مجموعهٔ تاریخی دقیقی ازمراجع‌کارهای بدیع ارائه کنم. برای این امتناع دو دلیل دارم: اولا مطمئن نیستم که بتوانم نقش یك متخصص تاریخ علم را بازی کنم؛ ثانیاً براین باورم که مراجع درکتابهای درسی دورهٔ کارشناسی، بیش از آنکه راهنمای دانشجو باشند، باعث شلوغی متن هستند. هرچند که منابع نگرشهای عمده را مشخص کرده‌ام، ولی بحثهای تاریخی را در حداقل ممکن نگه داشته‌ام. تاریخ فیزیك هسته‌ای که ارتباط تنگاتنگی با انقلابهای نظریهٔ کوانتومی و نسبیت در فیزیك قرن بیستم داشته است، درحد خود بسی مجذوب‌کننده است، و من دانشجویان جدی را به بررسی آن تشویق می‌کنم. مقالات کلاسیك، در تمایز آشکار بـا آثار جدید، خوانایی شگفت‌انگیزی دارند. بسیاری از مراجع مربوط به این مقالات اولیه را می‌توان درکتاب هالیدی یا در کتاب زیر یافت:

R. T. Beyer, *Foundations of Nuclear Physics*, (New York: Dover, 1949)

این کتاب مرجع شامل۱۳ مقالهٔ اصلی تجدید چاپ شده‌است، وهمچنین متضمن کتاب‌شناسی رده‌بندی شده‌ای از تمام کارهای فیزیك هسته‌ای منتشرشده تا سال ۱۹۴۷ است.

در پایان هـرفصل، فهرستی از مراجع را برای مطالعات تکمیلی آورده‌ام. مطالب همان فصل را می‌توان با تفصیل بیشتر وبررسی کاملتر دراین مراجع یافت. بعلاوه، دراین فهرستها، مقالات مروری ومقالات وکتابهای عامه‌پسند نیز گنجانده شده‌اند.

حل بعضی ازمسائل پایان فصلها مستلزم استفاده از **جداول خواص** هسته‌ای است، که از این‌رو دانشجو بـاید به‌آخرین ویرایش *Table of Isotopes* یـا مجموعهٔ کاملـی از *Nuclear Data Sheets* دسترسی داشته باشد.

کِنِت کرین

گاهشمار رویدادهای مهم درفیزیك هسته‌ای

۱۸۹۶ کشف رادیواکتیویته (بکرل*)
۱۸۹۸ جداسازی رادیم (ماری‌کوری* و پیرکوری*)
۱۹۰۵ نظریهٔ نسبیت خاص (اینشتین*)
۱۹۰۹ شناسایی ذرهٔ آلفا به‌عنوان هستهٔ هلیم (رادرفورد* و رویدز)
۱۹۱۱ اتم هسته‌ای (رادرفورد*)
۱۹۱۲ ساخت اتاقك ابر (ویلسون*)
۱۹۱۳ کشف ایزوتوپهای پایدار (تامسون*)
۱۹۱۳ مدل اتمی سیاره‌ای (نیلس بور*)
۱۹۱۴ تعیین بار هسته با استفاده از پرتوهای ایکس (موزلی)
۱۹۱۹ تراجهش مصنوعی به کمك واکنش هسته‌ای (رادرفورد*)
۱۹۱۹ ساخت طیف‌سنج جرمی (استون*)
۱۹۲۵ پیشنهاد اسپین ذاتی (گودشمیت و اولنبك)
۱۹۲۶ ظهور مکانیك کوانتومی (شرودینگر*)
۱۹۲۸ نظریهٔ رادیواکتیویتهٔ آلفازا (گاموف، گورنی، کاندون)
۱۹۳۰ فرضیهٔ نوترینو (پاؤلی*)
۱۹۳۱ ساخت نخستین شتابدهندهٔ الکتروستاتیکی (وان دوگراف)
۱۹۳۱ ساخت نخستین شتابدهندهٔ خطی (اسلون* و لارنس*)
۱۹۳۲ ساخت نخستین سیکلوترون (لارنس* و لیوینگستون)
۱۹۳۲ کشف دوتریم (اوری*، برکوِد، مورفی)
۱۹۳۲ کشف پوزیترون (اندرسون*)
۱۹۳۲ کشف نوترون (چادویك*)
۱۹۳۲ مدل هسته‌ای پروتون - نوترون (هایزنبرگ*)
۱۹۳۲ تحقق نخستین واکنش هسته‌ای با استفاده ازشتابدهنده (کوککرافت* و والتون*)
۱۹۳۴ کشف رادیواکتیویتهٔ مصنوعی (ایرن‌کوری*، ژولیو*)
۱۹۳۴ نظریهٔ رادیـواکتیویتهٔ بتازا (فرمی*)
۱۹۳۵ فرضیهٔ مزون (یوکاوا*)
۱۹۳۵ عرضهٔ تکنیك همفرودی (بوته*)
۱۹۳۶ پیشنهاد نظریهٔ هستهٔ مرکب (نیلس بور*)
۱۹۳۷ کشف لپتون μ در پرتوهای کیهانی (ندرمیر و اندرسون*)
۱۹۳۸ کشف شکافت هسته‌ای (هان* و اشتراسمن)
۱۹۳۸ طرح همجوشی گرماهسته‌ای به مثابه چشمهٔ انرژی درستارگان (بته*)

---

* دانشمندانی که نامشان با علامت ستاره مشخص شده است از برندگان جایزهٔ نوبل درفیزیك یا شیمی هستند، هرچندکه ممکن است این جایزه به خاطرکاری کـه در این فهرست آورده‌ایم نبوده باشد.

۱۹۳۹ مدل قطره-مایع برای شکافت (نیلس بور* و ویلر)
۱۹۴۰ تولید نخستین عنصر فرااورانیم (مک‌میلان* و سی‌بورگ*)
۱۹۴۱ ساخت نخستین بتاترون، شتابدهندهٔ الکترون با القای مغناطیسی (کرست)
۱۹۴۲ ساخت نخستین رآکتور شکافت کنترل‌شده (فرمی*)
۱۹۴۴ حصول پایداری فاز برای سنکروترون (مک‌میلان* و وکسلر)
۱۹۴۵ آزمایش نخستین بمب شکافتی
۱۹۴۶ کیهان‌شناسی مهبانگ (گاموف)
۱۹۴۶ عرضهٔ روش تشدید مغناطیسی هسته (بلوخ* و پورسل*)
۱۹۴۷ ظهور عمرسنجی رادیوکربنی (لیبی*)
۱۹۴۷ ساخت نخستین سنکروسیکلوترون پروتونی ۳۵۰MeV (برکلی)
۱۹۴۷ کشف مزون π (پاول*)
۱۹۴۸ ساخت نخستین شتابدهندهٔ خطی پروتون، ۳۲ MeV (آلوارز*)
۱۹۴۹ پیشنهاد مدل پوسته‌ای برای ساختارهسته (مایر*، جنسن*، هاکسل، سوئس)
۱۹۴۹ ساخت شمارگر سوسوزن (کالمن، کولتمان، مارشال)
۱۹۵۲ ساخت نخستین سیکلوترون پروتونی، ۲٫۳ GeV (بروکهاون)
۱۹۵۲ آزمایش نخستین بمب گرماهسته‌ای
۱۹۵۳ فرضیهٔ شگفتی (گلمن* و نیشی‌جیما)
۱۹۵۳ پیشنهاد مدل جمعی برای ساختار هسته (آگه‌بور*، موتلسون*، رینواتر*)
۱۹۵۳ تولید ذرات شگفت برای نخستین‌بار (بروکهاون)
۱۹۵۵ کشف پادپروتون (چمبرلین* و سگره*)
۱۹۵۶ آشکارسازی تجربی نوترینو (راینز وکوان)
۱۹۵۶ نقض پاریته در برهم‌کنشهای ضعیف (لی*، یانگ*، وو، و همکاران)
۱۹۵۸ گسیل بدون پس‌زنی پرتوهای گاما (موسباؤر*)
۱۹۵۹ ساخت سنکروترون ۲۶ GeV (سرن)
۱۹۶۴ مشاهدهٔ نقض CP در واپاشی K° (کرونین* و فیچ*)
۱۹۶۴ پیشنهاد مدل کوارك برای هادرونها (گلمن* و زوایك)
۱۹۶۷ راه‌اندازی‌اولیهٔ شتابدهندهٔ SLAC برای الکترونهای ۲۰ GeV (استانفورد)
۱۹۶۷ پیشنهاد مدل الکتروضعیف (واینبرگ* و سلام*)
۱۹۷۰ فرضیهٔ افسون (گلاشو*)
۱۹۷۱ ساخت برخورد دهندهٔ پروتون-پروتون (سرن)
۱۹۷۲ ساخت سنکروترون پروتونی ۵۰۰ GeV (فرمی‌لب)
۱۹۷۴ کشف ذرهٔ J/ψ و تأیید کوارك افسونگر (ریشتر* و تینگ*)
۱۹۷۵ کشف لپتون τ (پرل)
۱۹۷۷ کشف ذرهٔ Υ و طرح کوارك ته (لدرمن)
۱۹۸۳ راه‌اندازی برخورد دهندهٔ پروتون-پادپروتون ۳۰۰ GeV (سرن)
۱۹۸۳ کشف بوزونهای ضعیف $W^{\pm}$ و Z° (روبیا*)

قسمت ۱

مبانی ساختار هسته‌ای

۱

مفاهیم پایه

تاریخ آغاز فیزیك هسته‌ای را می‌توانیم از کشف رادیواکتیویته (پرتوزایی) توسط بکرل درسال۱۸۹۶ یاظهورفرضیهٔ رادرفورد مبنی بروجود هسته دراتمها درسال۱۹۱۱ بگیریم. درهرحال، به‌روشنی معلوم است‌که مطالعات تجربی‌ونظری فیزیك‌هسته‌ای نقش برجسته‌ای در توسعهٔ فیزیك قرن بیستم ایفا کرده است. خلاصهٔ تاریخ تحولات فیزیك هسته‌ای را در صفحات آغازین این‌کتاب نشان داده‌ایم. درنتیجهٔ همین مطالعات است که امروزه ما درك نسبتاً خوبی از خواص هسته‌ها و ساختاری که منشأ این خواص است، به دست آورده‌ایم. بعلاوه، فیزیك هسته‌ای فنونی در اختیار ما گذاشته است‌که در زمینه‌های علمی دیگر، از جمله درفیزیك اتمی وفیزیك حالت جامد، نیز کاربرد وسیعی پیدا کرده است. پژوهشهای آزمایشگاهی فیزیك هسته‌ای را برای حل انواع بسیارگوناگونی ازمسائل، ازبرهم‌کنش کوارکها (بنیادی‌ترین ذره‌ای‌که ماده از آن ساخته می‌شود) گرفته تا فرایندهای نخستین مراحل تکامل جهان‌که پس از «مهبانگ» اتفاق افتاده است، به‌کار برده‌اند. فیزیکدانها، امروزه از فنونی‌که در آزمایشگاههای فیزیك هسته‌ای آموخته‌اند برای تشخیص و درمان بیماریها در اعماق بدن انسان، بدون اینکه نیازی به جراحی باشد، بهره‌برداری می‌کنند. اما، ازسوی دیگرهم برخی از فنون فیزیك هسته‌ای تجربی درساختن سلاحهای ترسناکی مورد استفاده قرار می‌گیردکه منظور از تولید آنها کشتار توده‌ای انسانهاست، و ادامهٔ تولید و تکثیرآنها تهدیدی جدی برای آیندهٔ بشریت است. آسان نیست‌که هیچ علم دیگری را با این علم‌که طیف گسترده‌ای از کوچکترین ذرات میکروسکوپی تا موجودات

کیهانی را شامل می‌شود، مقایسه کنیم. زمینهٔ علمی دیگری هم وجود ندارد که کاربردهای مستقیم تحقیقات بنیادی آن، بالقوه بتواند این چنین مرزهای خیروشر را درنوردد.

فیزیك هسته‌ای از چنان صورتبندی نظری منسجمی برخوردار نیست که با استفاده از آن بتوانیم تمام پدیده‌ها را به‌روشی بنیادی تحلیل و تعبیر کنیم. اما فیزیك اتمی با صورتبندی الکترودینامیك کوانتومی خود از چنین امکانی برخوردار است، و به‌کمك آن می‌توانیم برخی از کمیتهای مشاهده‌پذیر را تا بیش از شش رقم بامعنی محاسبه کنیم. بدین‌ترتیب، در مطالعهٔ فیزیك هسته‌ای می‌باید شیوه‌ای پدیده‌شناختی در پیش بگیریم و برای توصیف پدیده‌های متنوعی مانند واپاشی آلفازا، واپاشی بتازا، واکنشهای مستقیم، یا شکافت، از صورتبندیهای متفاوتی استفاده کنیم. توانایی ما در تعبیر نتایج آزمایش و پیش‌بینی نتایج جدید، برای هرنوع پدیده‌ای، نسبتاً کامل است. ولی با وجود این، غالباً صورتبندی و روشهای مورد استفاده در یك پدیده را در موارد دیگر نمی‌توان به‌کار برد. به جای آنکه یك نظریهٔ منفرد و وحدت‌بخش در اختیار داشته باشیم، با جزیره‌هایی از شناختهای متوافق روبه‌رو می‌شویم که در دریای مشاهدات به ظاهر نامرتبط پراکنده‌اند. برخی از بنیادی‌ترین مسائل فیزیك هسته‌ای، مانند ماهیت دقیق نیروهایی که باعث قوام و دوام هسته می‌شوند، هنوز هم ناشناخته است. درسالهای اخیر، پیشرفتهایی درجهت درك نیروی اساسی بین‌کوارکها که بنیادی‌ترین اجزای سازندهٔ ماده‌اند صورت گرفته است، و سعی شده است که نتایج این تحقیقات را در مطالعات هسته‌ای مورد استفاده قرار دهند. اما این‌کوششها تاکنون درتشریح خواص هسته‌ای موفقیتی نداشته است.

بنابراین ما در این‌کتاب رهیافتی پدیده‌شناختی در پیش می‌گیریم. یعنی، هرنوع اندازه‌گیری را با صورتبندی نظری خاصی تحلیل می‌کنیم و پیامد حاصل از این تعبیر خاص را برای ساختار هسته‌ای مورد بحث قرار می‌دهیم. در اینجا با خلاصه‌ای از مبانی نظریهٔ هسته‌ای آغاز می‌کنیم، وآنگاه به فرایندهایی می‌پردازیم که درشناخت ما ازساختار هسته‌ای سهم ارزنده‌ای دارند. نخست فرایند واپاشی رادیواکتیو، و سپس واکنشهای هسته‌ای را بررسی می‌کنیم. سرانجام، از موضوعات خاص مطرح شده درساختار هسته‌ای میکروسکوپی، از ارتباط میان فیزیك هسته‌ای و دیگر شاخه‌های تخصصی، و همچنین از کاربرد فیزیك هسته‌ای در دیگرزمینه‌های فنی وتحقیقی سخن خواهیم گفت.

۱.۱ نگاهی به پیشینهٔ تاریخی

تلاش برای درك ماهیت اساسی ماده، ریشه در تفکرات فیلسوفان یونان باستان، بویژه دموکریتوس، دارد. دموکریتوس که درسدهٔ چهارم پیش‌ازمیلاد می‌زیست، معتقد بود که هرنوع ماده را می‌توان به اجزای کوچکتر وکوچکتر تقسیم کرد تا آنکه حدی نهایی فرامی‌رسد که دیگر ادامهٔ تقسیم میسر نیست. از نظر دموکریتوس، این جزء لایتجزای ماده (یا اتم) که با چشم غیرقابل دیدن بود، ذرهٔ بنیادی سازندهٔ ماده به‌شمار می‌رفت. درطی ۲۴۰۰ سال بعد، این نظرصرفاً به‌صورت اندیشه‌ای فلسفی باقی ماند، تاآنکه پژوهشگران

آغاز سدهٔ نوزدهم میلادی با استفادهٔ از روشهای علوم تجربی دربارهٔ این مسئله به تحقیق پرداختند، و با به‌دست آوردن شواهد کافی فرضیهٔ اتم‌گرایی را تا سطح یك نظریهٔ علمی تمام عیار بالا بردند. امروزه، بـا توجه به رده‌بندیهای علوم و گرایشهای تخصصی، شاید بتوانیم دانشمندان پیشگام در ایـن زمینه (یعنی دالتون، آووگادرو، فاراده) را شیمیدان قلمداد کنیم. پس از آنکه شیمیدانها نوع اتمها، قواعد حاکم بر ترکیب آنها، و رده‌بندی سازمان یافتهٔ آنها را (به‌صورت جدول تناوبی مندلیف) مشخص کردند، به‌طورطبیعی تنها مرحلهٔ باقیمانده مطالعهٔ خواص بنیادی تك تك اتمهای عناصرمختلف بود کـه امروزه این قسمت از پژوهش را با عنوان فیزیك اتمی می‌شناسیم. این مطالعات درسال ۱۸۹۶ توسط بکرل به‌کشف خاصیت رادیواکتیویته در برخی از اتمها، و سپس درسال ۱۸۹۸ توسط پیرکوری و همسرش (ماری کوری) به شناسایی مواد رادیواکتیو دیگـرمنجرشد. آنگاه نوبت به رادرفورد رسید که کار بررسی این پرتوهای فعال و خواص آنها را ادامه داد. رادرفورد وقتی که بـه ماهیت این پرتوها پی برد، کار تحقیق را وارونه کرد و آنها را به‌عنوان وسیلهٔ کاوش در وارسی اتمها به‌کار گرفت. درطی همین پژوهشها بودکه در سال ۱۹۱۱ رادرفورد وجـود هسته را در اتمها اعـلام داشت. تأیید ایـن فرضیه (از طریق آزمایشهای طاقت‌فرسای گایگرومارسدن) شاخهٔ جدیدی را درعلوم، به‌نام فیزیك هسته‌ای، بنا نهادکه ماده را در بنیادی‌ترین ساختارش مورد بررسی قرار می‌دهد. تحقیق درخواص هسته، از روزگار رادرفورد تـا به امروز ادامه یافته است. اکتشافات دهه‌های ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ نشان داده‌اندکه مرتبهٔ دیگری از ساختار ماده وجود داردکه از هسته هم بنیادی‌تر و ابتدایی‌تراست. امروزه، بررسی و مطالعهٔ این‌گونه ذرات را کـه عناصر اصلی ساختار هسته‌ای هستند، در شاخهٔ خاصی به نام فیزیك ذرات بنیادی (یا فیزیك انرژی بالا) ادامه می‌دهند.

بدین ترتیب، فیزیك هسته‌ای را می‌توان ازسویی فرزند شیمی و فیزیك اتمی، واز سوی دیگر پدر فیزیك ذرات بنیادی به‌شمار آورد. فیزیك هسته‌ای، اگـرچه اکنون نقش محوری‌اش را در جستجوی اجزای بنیادی ماده از دست داده است، ولی هنوز هم برای درك برهم‌کنشهای بنیادی از آزمایشهای هسته‌ای استفاده می‌شود. تحقیق درخواص هسته‌ها وقوانین حاکم برساختارهسته‌ای، به‌نوبهٔ خود، زمینهٔ فعال و باروری ازپژوهشهای فیزیکی است. ابزارهای مفیدی مانند آشکارسازهای دود، تنظیم‌کننده‌های ضربـان قلب، و وسایل تصویرگیری پزشکی، از جمله دستاوردهای عملی ایـن پژوهشها هستند. بدین ترتیب، در واقع می‌توان برای فیزیك هسته‌ای سه نقش مختلف در نظرگرفت: کاوش درقلمرو ذرات بنیادی ماده و برهم‌کنش آنها، رده‌بندی وتفسیرخواص هسته‌ای، طراحی روشها وابزارهای فنی پیشرفته برای خدمت به‌جوامع بشری.

۲.۱ چند اصطلاح مقدماتی

هرنوع‌هسته‌ای رابامقدارکل بار مثبت وتعدادکل واحدهای جرمی موجود درهسته،مشخص

می‌کنیم. بار کل هسته برابر $+Ze$ است، که در آن Z عدد اتمی و e بزرگی بار الکترون است. ذرهٔ بنیادی باردار مثبت در هسته پروتون است که هستهٔ ساده‌ترین اتم موجود در طبیعت، یعنی هیدروژن، نیز هست. بنابراین هسته‌ای که عدد اتمی‌اش Z باشد شامل Z پروتون است، و بدین‌سان در ساختار هر اتم خنثی باید Z الکترون منفی هم وجود داشته باشد. چون جرم الکترون در مقایسه با جرم پروتون ناچیز است ($m_p \simeq ۲۰۰۰ m_e$)، غالباً در بحث جرم اتمی می‌توان از جرم الکترون صرفنظر کرد. عدد جرمی هر نوع هسته که با A نمایش داده می‌شود، به‌صورت نزدیکترین عدد درست به حاصل تقسیم جرم هسته بر یکای بنیادی جرم تعریف می‌شود. یکای بنیادی جرم را چنان تعریف می‌کنیم که جرم پروتون تقریباً برابر یك واحد شود. (یکاهای جرم را درفصل ۳ به تفصیل بررسی خواهیم کرد.) تقریباً درتمام هسته‌ها A بزرگتر از Z است. نسبت بین این دو عدد در بسیاری از موارد برابر ۲ یا بزرگتر از ۲ است. از این‌رو، اجزای سنگین دیگری هم باید درهسته موجود باشند. تا پیش از سال ۱۹۳۲ براین باور بودند که هرهسته شامل A پروتون است، که بدین ترتیب مسئلهٔ جرم هسته به‌صورتی ظاهراً مناسب حل می‌شد. برای آنکه بارمثبت کل هسته برابر Ze شود، فرض می‌کردند که در هرهسته تعداد $(A-Z)$ الکترون هسته‌ای نیز وجود دارد. اما حضور الکترون در داخل هسته به‌چند دلیل زیرناپذیرفتنی است:

۱. لازم است که الکترونهای هسته‌ای به کمك نیرویی بسیارقوی که حتی از نیروی کولنی هم قویتراست، در قید پروتونها قرار داشته باشند. تاکنون هیچ شاهدی دال بروجود این نیروی قوی بین پروتونها والکترونهای اتمی مشاهده نشده است.

۲. اگرالکترونها را درناحیهٔ فضایی کوچکی به‌اندازهٔ هسته ($\Delta x \sim ۱۰^{-۱۴}\mathrm{m}$) محصور کنیم، بنابر اصل عدم قطعیت، گسترهٔ توزیع تکانهٔ الکترونها باید در حدود $\Delta p \sim \hbar/\Delta x = ۲۰\ \mathrm{MeV}/c$ شود. الکترونهایی که در واپاشی رادیواکتیو بتازا از هسته گسیل می‌شوند انرژی‌شان عموماً کمتراز $۱\ \mathrm{MeV}$ است، و هرگز در واپاشیها الکترونی با انرژی $۲۰\ \mathrm{MeV}$ مشاهده نمی‌کنیم. یعنی، وجود الکترونهای با انرژی $۲۰\ \mathrm{MeV}$ در داخل هسته ازطریق آزمایش تأیید نمی‌شود.

۳. اگر تعداد A پروتون و تعداد $(A-Z)$ الکترون در هسته وجود داشته باشد، تکانهٔ زاویه‌ای ذاتی (یا اسپین) کل در هسته‌هایی که $(A-Z)$ درآنها فرد است با مقادیر حاصل ازمشاهده سازگاری ندارد. هستهٔ دوتریم ($A=۲$ و $Z=۱$) را درنظربگیرید که طبق فرضیهٔ پروتون ـ الکترون باید حاوی ۲ پروتون و ۱ الکترون باشد. تکانهٔ زاویه‌ای ذاتی (یا اسپین) هریك‌از ذرات پروتون والکترون برابر ۱/۲ است، و قواعد جمع اسپینها درمکانیك کوانتومی حاصل جمع سه‌اسپین ۱/۲ را برابر ۳/۲ یا ۱/۲ به‌دست می‌دهد. ولی درعمل اسپین دوتریم را برابر ۱ می‌یابیم.

۴. گشتاور دوقطبی مغناطیسی هسته‌هایی که الکترونهای تزویج نشده دارند، باید خیلی بزرگتراز مقداری باشدکه درعمل مشاهده می‌شود. برای نمونه اگردر هستهٔ دوتریم یك الکترون منفرد وجود داشته باشد، باید انتظار داشته باشیم که گشتاور دوقطبی

مغناطیسی این هسته درهمان حدود گشتاورمغناطیسی الکترون باشد. اما گشتاورمغناطیسی اندازه‌گیری شده درهستهٔ دوتریم درحدود ۱/۲۰۰۰ گشتاور مغناطیسی الکترون است.

البته، با طرح دلایل خاصی می‌توانیم موارد اعتراض بالا را ردکنیم، ولی از سال ۱۹۳۲ که تاریخ کشف نوترون توسط چادویك است دیگر نیازی به‌این‌کار نیست. نوترون ازلحاظ الکتریکی خنثی‌است وجرمی درحدود جرم پروتون دارد (جرم نوترون درواقع درحدود ۱٫۰ درصد بزرگترازجرم پروتون است). بدین‌ترتیب، جرم کل و بارالکتریکی هسته‌ای که Z پروتون و $(A-Z)$ نوترون دارد، بدون نیاز به‌فرض الکترونهای هسته‌ای، بـا واقعیتهای تجربی مطابقت پیدا می‌کند. برای مشخص‌کردن یك نوع هسته‌ای خاص، یـا نوکلید، معمولا آن را به شکل ${}^{A}_{Z}X_{N}$ نمایش می‌دهیم که در آن X نماد شیمیایی و N عدد نوترونی است $(N=A-Z)$. به‌عنوان نمونه به‌طرز نمایش چند نوکلید به صورت ${}^{1}_{1}H_{0}$، ${}^{238}_{92}U_{146}$، ${}^{56}_{26}Fe_{30}$ می‌توان توجه‌کرد. نشان دادن عـدد اتمی Z بـه همراه نماد شیمیایی نوکلید کار زایدی است، زیرا می‌دانیم که در هر هستهٔ هیدروژن (H)، $Z=1$ و در هـرهستهٔ اورانیم (U)، $Z=92$ است. بنابراین نیازی به‌نوشتن Z درکنار نماد شیمیایی هسته نیست. همچنین نیازی به نوشتن N هـم نیست، زیرا همیشه می‌توان عدد نوترونی را ازتفاضل $(A-Z)$ به‌دست‌آورد. بنابراین نمایش نوکلید موردنظر به‌صورت ${}^{238}U$ کفایت خواهدکرد. نگاهی به‌جدول تناوبی عناصرعدد اتمی U را برابر $Z=92$ به‌دست می‌دهد، و در نتیجه تعداد نوترونهای ${}^{238}U$ برابر $238-92=146$ می‌شود. در عمل برای نشان دادن نوکلیدها از هردو طرز نمایش استفاده می‌شود، گاهی Z و N را درکنار نماد شیمیایی نوکلید می‌نویسند و گاهی هـم آنها را نمی‌نویسند. وقتی سعی می‌کنیم در یك فرایند واپاشی یا واکنش هسته‌ای بین Z و N توازن برقرار کنیم، بهتـر است که Z و N را درکنار نماد شیمیایی نوکلید بنویسیم. در مـوارد دیگر، نوشتن این اعداد نالازم و دست و پاگیر است.

نوترونهاوپروتونها اعضای دوگانهٔ خانوادهٔ نوکلئونهاهستند. هنگامی که می‌خواهیم از ذرات هسته‌ای بدون توجه به نوع پروتونی یـا نوترونی آنها بحث‌کنیم، از اصطلاح نوکلئون استفاده می‌کنیم. پس هسته‌ای‌که عدد جرمی‌اش A باشد، محتوی A نوکلئون است.

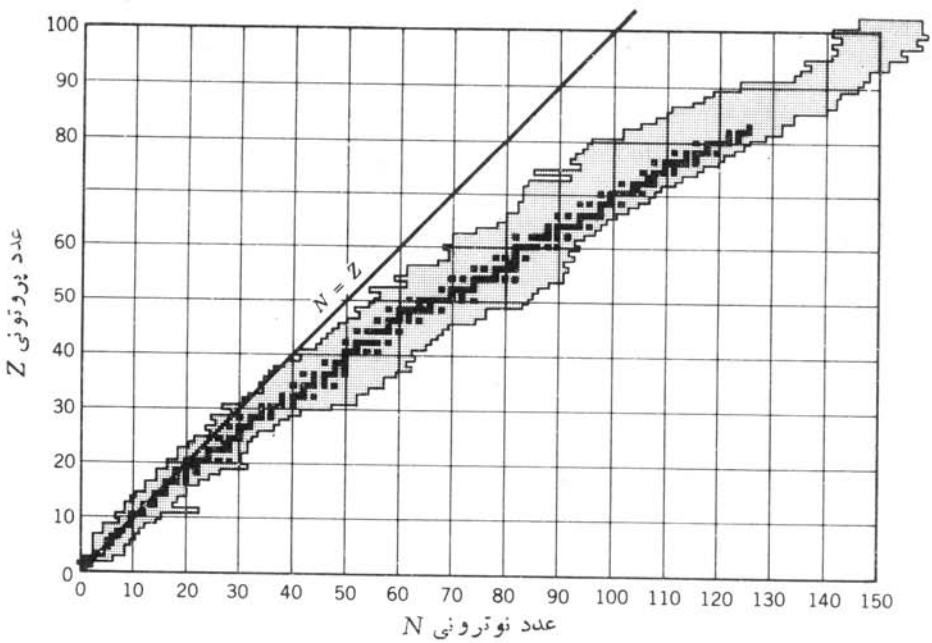
با بررسی نمونه‌های عناصر مختلفی کـه درطبیعت وجود دارند، معلوم می‌شود کـه نوکلیدهای با عدد اتمی مشخص می‌توانند اعداد جرمی مختلف داشته‌باشند. یعنی، نوکلیدی که Z پروتون دارد می‌تواند چند عدد نوترونی متفاوت داشته باشد. نوکلیدهای با عدد اتمی یکسان و اعـداد نوترونی متفاوت را ایزوتوپ می‌نامند. برای مثـال، عنصر کلر دو ایزوتوپ پایدار داردکه عبارت‌اند از ${}^{35}Cl$ و ${}^{37}Cl$. این عنصرایزوتوپهای ناپایدار دیگر هم‌داردکه درواکنشهای هسته‌ای به‌طورمصنوعی تولید می‌شوند، وایزوتوپهای‌رادیواکتیو (یا رادیوایزوتوپ) کلر نامیده می‌شوند.

اغلب برای سهولت، تعدادی نوکلید با N یکسان و Z متفاوت را ایزوتون می‌گویند. ایزوتونهای پایدار با $N=1$ عبارت‌اند از ${}^{2}H$ و ${}^{3}He$. نوکلیدهایی کـه عدد جرمی

یکسان داشته باشند، ایزوبار نامیده می‌شوند. مثلاً، نوکلید پایدار ^{3}He و نوکلید رادیواکتیو ^{3}H را ایزوبار می‌دانیم، زیرا در هردوی آنها $A = ۳$ است.

۳.۱ خواص هسته‌ای

پس از شناسایی هر نوکلید، برای اندازه‌گیری خواص آن می‌توان اقدام کرد. منظور از خواص (که بعداً درهمین کتاب مورد بحث قرارمی‌گیرند) خصوصیاتی مانند جرم، شعاع، فراوانی نسبی (برای نوکلیدهای پایدار)، مدهای واپاشی ونیمه‌عمرها (برای نوکلیدهای رادیواکتیو)، مدهای واکنش و سطح مقطعهای واکنش، اسپین، گشتاور دوقطبی مغناطیسی وگشتاور چارقطبی الکتریکی، و حالتهای برانگیختهٔ نوکلید است. تاکنون نوکلیدهای مربوط به ۱۰۸ عدد اتمی مختلف (از ۰ تا ۱۰۷) را شناسایی کرده‌ایم که تعدادکل آنها با احتساب ایزوتوپهای گوناگون از ۱۰۰۰ هم تجاوز می‌کند. با توجه به‌شتابدهنده‌هایی که به منظور تولید و بررسی ایزوتوپهای خیلی دور از ایزوبارهای پایدارشان ساخته شده‌اند، تعداد نوکلیدهای جدیدی که به‌دقت مطالعه شده‌اند هرروز درحال افزایش است. نمودار نوکلیدهای پایدار و نوکلیدهای رادیواکتیو شناخته شده را درشکل ۱.۱ نشان داده‌ایم. چنانکه می‌توان انتظار داشت، گردآوری خواص اندازه‌گیری شدهٔ این همه



شکل ۱.۱ هسته‌های پایدار درناحیهٔ سایه‌دار پررنگ، وهسته‌های رادیواکتیو درناحیهٔ سایه‌دار کمرنگ قراردارند.

نوکلید، کاری بس عظیم است. ازطرف دیگر، بازیابی واستفاده ازاین اطلاعات هم به‌همان اندازه مهم است. برای نمونه، جهت تعیین بهترین مقدار تجربی مربوط به‌مدهای واپاشی یك ایزوتوپ یا اسپین وگشتاور مغناطیسی ایزوتوپ دیگر، چه‌کار باید بکنیم؟

متخصصان فیزیك هسته‌ای عموماً نتایج تحقیقاتشان را در مجلات تخصصی منتشر می‌کنند. بدین‌سان، پژوهشگران آزمایشگاههای دور از هم از فعالیتهای یکدیگر آگاه می‌شوند وبا هم تبادل‌نظر می‌کنند. بعضی ازاین مجلات را دراینجا نام می‌بریم:

Physical Review, Section C (*Phys. Rev. C*), *Physical Review Letters* (*Phys. Rev. Lett.*), *Physical Letters*, Section B (*Phys. Lett. B*), *Nuclear Physics*, Section A (*Nucl. Phys. A*), *Zeitschrift für Physik*, Section A (*Z. Phys. A*), *Journal of Physics*, Section G (*J. Phys. G*).

این مجلات عموماً ماهانه هستند، وبا خواندن آنها (یا با مروری به‌فهرست مطالب آنها) می‌توان نتایج کار پژوهشگران مختلف را مورد توجه قرار داد. کتابخانهٔ بسیاری از دانشگاهها ودانشکده‌ها این مجلات را دریافت ونگهداری می‌کنند. مطالعهٔ فیزیك‌هسته‌ای، اغلب مستلزم مراجعه به‌مجموعه‌ای از نشریات ومقالات تحقیقی روز است.

متأسفانه، مراجعه به مجلات روز معمولا کمکی به‌یافتن اطلاعات خاصی‌که در پی آن هستیم نمی‌کند، مگراینکه به‌طور تصادفی به موضوع و مقالهٔ مورد نظر برخوردکنیم. به‌همین دلیل، اطلاعات فیزیك هسته‌ای را درمنابع جداگانه‌ای گردآوری‌کرده‌اندکه در آنها می‌توان خلاصهٔ خواص هسته‌ای و نشانی مآخذ و مقالات دست اول را پیدا کرد. خلاصه‌ای از خواص نوکلیدهای شناخته شده را می‌توان درکتاب یك جلدی زیر یافت:

Table of Isotopes, edited by M. Lederer and V. Shirley (New York, Wiley, 1978)

هرکسی که بخواهد در رشتهٔ فیزیك هسته‌ای کارکند، باید نسخه‌ای از این‌کتاب را در اختیار داشته باشد. اطلاعات هسته‌ای روزآمدتر را می‌توان درمرجع زیر یافت:

Nuclear Data Sheets

که نه‌تنها مجموعهٔ روزآمد اطلاعات مربوط به هر دسته از ایزوبارها را به طور مرتب منتشر می‌کند، بلکه خلاصهٔ تمام مقالات منتشرشده در هرسال را به‌صورت رده‌بندی شده برحسب نوکلیدها به‌دست می‌دهد. این اطلاعات هم به صورت مجله منتشرمی‌شود و در بسیاری ازکتابخانه‌ها وجود دارد. بنابراین، جستجو و پیگیری مطالب جدیدی‌که درمورد یك نوکلید معین منتشرشده است، کار چندان دشواری نیست.

دو مرجع مروری دیگررا هم در زیرنام می‌بریم:

Atomic Data and Nuclear Data Tables

اطلاعات هسته‌ای (مثلا مربوط به‌آهنگ‌گذار بتا یا گاما، یا انرژی شکافت) به صورتی مرتب دراین مجموعه گردآوری و منتشرمی‌شود، و دیگر

Annual Review of Nuclear and Particle Science

(که قبلا با عنوان *Annual Review of Nuclear Science* منتشر می‌شد). دراین کتاب، هـرساله مجموعه‌ای از مقالات مروری دربارهٔ موضوعات جاری فیزیك هسته‌ای و فیزیك ذرات منتشرمی‌شود.

۴.۱ یکاها و مرتبه‌های بزرگی

در فیزیك هسته‌ای، بـا طولهایی از مرتبهٔ 10^{-15}m سروکار داریم کـه آن را فمتومتر می‌نامیم (1×10^{-15}m = 1 fm). این یکا را درمحاورات یك فرمی می‌گویندکه ایـن نـام هم به افتخار انریکوفرمی، دانشمند ایتالیایی ـ امریکایی و یکی از پیشگامان فیزیك هسته‌ای برگزیده شده است. اندازهٔ هسته‌ها در گسترهٔ حـدود 1 fm تـا 7 fm (از یك نوکلئون منفرد تا سنگین‌ترین هسته) قراردارد.

گسترهٔ زمانی پدیده‌های هسته‌ای بسیار وسیع است. بعضی ازهسته‌ها نظیر ^{5}He یا ^{8}Be در مـدت زمانی از مرتبهٔ 10^{-20}s تجزیه و درهـم شکسته می‌شوند. بسیاری از واکنشهای هسته‌ای درهمین مقیاس زمانی تحقق می‌یابند. ایـن زمان به تقریب همان طول مدتی است کـه هسته‌های فعال در واکنش، متقابلا در برد نیروی هسته‌ای همدیگـر قرار می‌گیرند. طول‌عمرواپاشیهای الکترومغناطیسی (γ) عموماً ازمرتبهٔ 10^{-9}s (نانوثانیه، ns) تا 10^{-12}s (پیکوثانیه، ps) است. اما بسیاری از واپاشیهای دیگـر در مدت زمانهایی طولانی‌تر یـا کوتاه‌تر اتفاق می‌افتند. واپاشیهای آلفازا و بتازا (α و β) در زمـانهای به مراتب طولانی‌تر، اغلب از مرتبهٔ دقیقه و ساعت وگاهی هم از مرتبهٔ هزاران یـا حتی میلیونها سال، صورت می‌گیرند.

انرژیهای هسته‌ای را بـه آسانی می‌توان برحسب میلیون الکترون ولت (MeV) اندازه‌گیری کرد. یکای الکترون ولت کـه برابر $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19}$ J است، عبارت است از انرژی کسب شده توسط یك واحـد منفرد بـار الکتریکی (یك الکترون) هنگامی‌که دراختلاف پتانسیل یك ولتی شتاب گرفته‌باشد. انرژی واپاشیهای بتازا وگامازا نوعاً در گسترهٔ 1 MeV است، و واکنشهای هسته‌ای‌کم ـ انرژی درانرژی جنبشی حدود 10 MeV رخ می‌دهند. این انرژیها بـه مراتب کمتر از انرژیهای سکون هسته‌هاست، و بنابراین برای تکانه وانرژی نوکلئونها بدون هیچ اشکالی می‌توان از فرمولهای نانسبیتی استفاده‌کرد، اما الکترونهای ناشی از واپاشی بتازا را باید به‌طور نسبیتی مـورد بررسی قرارداد.

جرمهای هسته‌ای را برحسب یکای جدید جرم اتمی، u، بیان می‌کنیم. این یکا چنان تعریف می‌شود کـه جرم یك اتم ^{12}C دقیقاً برابر 12 u است. بدین ترتیب، جرم هـر نوکلئون در حدود 1 u می‌شود. در تحلیل واکنشها و واپاشیهای هسته‌ای، به طورکلـی ترجیح می‌دهیم که با انرژیهای معادل جرم سروکار داشته باشیم تا با خود جرم. ضریب تبدیل بین جرم و انرژی به صورت $1 \text{ u} = 931.502$ MeV است، ازاین‌رو انـرژی معادل جرم هرنوکلئون درحدود 1000 MeV است. البته تبدیل جرم به‌انرژی بااستفاده

ازمعادلهٔاساسی نسبیت خاص، $E = mc^2$، صورت می‌گیرد و بنابراین درمحاسبات آزادی عمل داریم که هر یك از کمیتهای جرم یا انرژی راکه برای ما آسانتراست به‌کار ببریم، و ضریب تبدیل این عملیات به‌صورت $c^2 = ۹۳۱٫۵۰۲\ \mathrm{MeV/u}$ است.

مراجع مطالعات تکمیلی

برای توضیحات ومحاسبات مشابه آنچه دراین کتاب می‌بینید، می‌توانید به‌کتابهای درسی فیزیك هسته‌ای زیررجوع کنید. سطح کتابهایی که به صورت مبانی تهیه شده‌اند تقریباً در سطح همین کتاب است. کتابهای سطح بالاترغالباً برای دوره‌های پیشرفته‌ترفیزیك هسته‌ای درنظر گرفته شده‌اند. هیچ کوششی برای تهیهٔ فهرستی جامع ازمراجع به‌عمل نیامده است، بلکه فهرست زیرحاوی کتابهایی‌است که مؤلف درتهیهٔ این کتاب از آنها استفاده کرده‌است.

بیشتر این کتابهای درسی «کلاسیك» حالا دیگر کهنه شده‌اند، ولی هنوز هم مطالب مفیدی را می‌توان درآنها یافت که چشم‌اندازی تاریخی برای خواننده فراهم می‌کنند:

R. D. Evans, *The Atomic Nucleus* (New York: McGraw-Hill, 1955),
این کتاب برای مدت ۲۰ سال، از زمان دانشجویی مؤلف تاکنون، پرمصرف‌ترین کتاب درکتابخانهٔ شخصی‌اش بوده است. شیرازهٔ آن ازهم گسیخته است، ولـی وضوح وکمال آن همچنان پابرجاست.

David Halliday, *Introductory Nuclear Physics* (New York: Wiley, 1955),

I. Kaplan, *Nuclear Physics* (Reading, MA: Addison-Wesley, 1955).

کتابهای درسی‌مقدماتی که می‌توانند مکمل این کتاب محسوب شوند، عبارت‌اند از:

W. E. Burcham, *Nuclear Physics: An Introduction* (London: Longman, 1973),

B. L. Cohen, *Concepts of Nuclear Physics* (New York: McGraw-Hill, 1971),
ترجمهٔ فارسی ایـن کتاب تحت عنوان مفاهیم فیزیك هسته‌ای درسال ۱۳۷۰ توسط مرکز نشردانشگاهی منتشرشده است.ـو.

Harald A. Enge, *Introduction to Nuclear Physics* (Reading, MA: Addison-Wesley, 1966),

Robert A. Howard, *Nuclear Physics* (Belmont, CA: Wadsworth, 1963),

Walter E. Meyerhof, *Elements of Nuclear Physics* (New York: McGraw-Hill, 1967),

دو ترجمهٔ فارسی از ایـن کتاب تحت عنوان مبانی فیزیك هسته‌ای، اولی درسال ۱۳۵۷ توسط دانشگاه تهران و دومی درسال ۱۳۶۷ توسط دانشگاه مشهد منتشرشده است.ـو.

Haro Von Buttlar, *Nuclear Physics: An Introduction* (New York: Academic Press, 1968).

کتابهای درسی میانه‌ای که مطالب همین کتاب را با استفادهٔ بیشتر از مکانیک کوانتومی مطرح کرده‌اند، عبارت‌اند از:

M. G. Bowler, *Nuclear Physics* (Oxford: Pergamon, 1973),

Emilio Segré, *Nuclei and Particles* (Reading, MA: W. A. Benjamin, 1977).

کتابهای درسی پیشرفته که عمدتاً برای دوره‌های کارشناسی ارشد در نظر گرفته شده‌اند، ولی خیلی ازمطالب درآنها به‌صورت پایه مطرح شده است، عبارت‌اند از:

Hans Frauenfelder and Ernest M. Henley, *Subatomic Physics* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall 1974),

ترجمهٔ فارسی این کتاب تحت عنوان فیزیک زیراتمی، توسط مرکز نشردانشگاهی در دست انتشار است.ـو.

M. A. Preston, *Physics of the Nucleus* (Reading, MA: Addison-Wesley, 1962).

آثار پیشرفته‌تری که بیشتر جنبهٔ تک‌نگاری دارند تا کتاب درسی، عبارت‌اند از:

John M. Blatt, and Victor F. Weisskopf, *Theoretical Nuclear Physics* (New York: Wiley, 1952),

A. Bohr and B. R. Mottelson, *Nuclear Structure* (New York: W. A. Benjamin, 1969),

A. deShalit and H. Feshbach, *Theoretical Nuclear Physics* (New York: Wiley, 1974).

۲

مبانی مکانیك کوانتومی

رفتار نوکلئونهای درون هسته، شباهتی به‌رفتار ذرات کلاسیك و برخورد گلوله‌های بیلیارد ندارد. خواص هسته را رفتار موجی نوکلئونها تعیین می‌کند، و تحلیل ایـن رفتار مستلزم کاربرد تکنیکهای ریاضی مکانیك کوانتومی است.

بـا توجه به‌آزمایشهای مختلف پراکندگی، می‌دانیم نوکلئونها بـا انرژی جنبشی حدود ۱۰ MeV در داخل هسته در حرکت‌اند. این انرژی در مقایسه بـا انرژی سکون نوکلئونها (که در حدود ۱۰۰۰ MeV است) اندك است، و بنابراین با اطمینان خاطر می‌توانیم از مکانیك کوانتومی نانسبیتی استفاده کنیم.

بحث کامل مکانیك کوانتومی، مستلزم یك کتاب درسی بزرگتر از این کتاب خواهد بود. دراین فصل، بعضی از مهمترین مفاهیمی راکه بعدها دراین کتاب بدانها نیاز خواهیم داشت به‌طورخلاصه معرفی می‌کنیم. فرض ما دراینجا این است که دانشجوی خوانندهٔ این کتاب مفاهیم فیزیك جدید را آموخته است، و با برخی از آزمایشهایی که به‌کمك مفاهیم فیزیك کلاسیك قابل درك نیست آشنایی دارد. ازجملهٔ این آزمایشها می‌توان تابش گرمایی (جسم سیاه)، پراکندگی کامپتون، واثرفوتوالکتریك را نام برد. در پایان، فهرستی ازچند کتاب درسی فیزیك جـدید را برای مرور آورده‌ایم. در ایـن فهرست چندکتاب فیزیك کوانتومی پیشرفته نیزدیده می‌شود، که درآنها بحث کاملتری از مطالب خلاصه‌شده دراین فصل را می‌توان یافت.

۱.۲ رفتارکوانتومی

مکانیك کوانتومی یك صورتبندی ریاضی است که به‌کمك آن می‌توان رفتارموجی ذرات را تعیین کرد. هیچ دلیل پیشینی (یا استقرایی) وجود نداردکه لزوم چنین رفتاری‌را نشان دهد، بلکه‌این‌استنباط ازمقایسهٔ خواص ذرات با رفتارکوانتومی نورحاصل‌شده‌است. پیش از سال ۱۹۰۰ نور را عموماً پدیده‌ای موجی می‌دانستند، اما کار تحقیقی پلانك در سال ۱۹۰۰(درتحلیل تابش جسم سیاه) و اینشتین درسال ۱۹۰۵ (درتحلیل اثرفوتوالکتریك) ضرورت این‌امررا نشان‌دادکه انتقال انرژی نور را نه به صورت جریانی آرام و پیوسته، چنانکه در مورد موج دیده می‌شود، بلکه به صورت بسته‌های متمرکزی از «کوانتومها» و یا «ذرات نور» باید درنظر گرفت.

قیاس بین ماده ونور را دوبروی درسال ۱۹۲۴، با توجه به‌کارهای قبلی اینشتین و کامپتون، شروع‌کرد. بحث دوبروی به‌این‌صورت مطرح شدکه اگرنورکه عموماً پدیده‌ای موجی تصور می‌شود خصوصیات ذره‌ای هم داشته باشد، چرا ماده هم که عموماً آن را متشکل از ذرات می‌دانیم نباید از خواص موجی برخوردار شود؟ در ادامهٔ همین قیاس، دوبروی فرض‌کردکه به هر «ذره»ای‌که باتکانهٔ p درحرکت است، «موجی» به‌طول موج $\lambda = h/p$ وابسته است که در آن h ثابت پلانك است. طول موجی را که به این ترتیب تعریف می‌شود، طول موج دوبروی می گویند. تأیید تجربی فرضیهٔ دوبروی بزودی درسال ۱۹۲۷ درآزمایشهای تامسون و دیویسون-گرمر ظاهرشد. این پژوهشگران نشان دادندکه الکترونها (که معمولا به‌عنوان ذره تلقی می‌شوند) درست مثل موجهای با طول موج دوبروی پراشیده می‌شوند.

نظریهٔ دوبروی اگرچه در این موارد موفق بود، ولی به چند دلیل ناقص وغیرقابل استفاده است. نخست اینکه، ما به ندرت به‌ذراتی با تکانهٔ ثابت برخورد می‌کنیم: هنگامی که تکانهٔ یك ذره دراثراعمال نیروی خارجی تغییر می‌کند، طول موج آن هم باید تغییر کند، اما رابطهٔ دوبروی فاقد توانایی لازم برای محاسبهٔ رفتار دینامیکی امواج است. برای این منظور به‌یك نظریهٔ ریاضی‌کاملتر نیاز داریم‌که درسال ۱۹۲۵ توسط شرودینگر عرضه شد، وما آن را دربخش ۲ این فصل مرور می‌کنیم. ایراد دوم به نظریهٔ دوبروی، مسئلهٔ اتکای‌آن به مفاهیم و اصطلاحات‌کلاسیك است. رفتار «موجی» و «ذره‌ای» متقابلا با هم در تناقض‌اند، اما در رابطهٔ دوبروی از هر دو مفهوم ذرهٔ‌کلاسیك با تکانهٔ کاملا مشخص وموج کلاسیك باطول موج کاملا مشخص استفاده شده است. ذرهٔ کلاسیك در فضا مکانی معین دارد. اما، بنابرنظر دوبروی، اکنون می‌خواهیم این ذرهٔ جاگزیده را با موج خالصی نشان دهیم که درتمام فضا گسترده است و ابتدا و انتهایی ندارد، یعنی «موضعی» برای آن نمی‌توان قائل شد.

حل این معضل، مستلزم این است‌که در قلمرو فیزیك‌کلاسیك از مفهوم‌کلاسیکی «ذره» دست بکشیم. اندازهٔ یك ذرهٔ کلاسیکی درتمام آزمایشهایی که می‌توان انجام داد یکسان است، اما «اندازهٔ» یك ذرهٔ کوانتومی بسته به آزمایشی‌که انجام می‌دهیم متفاوت

است. فیزیك کوانتومی ما را مجبور می‌کند که از واقعیت عینی مفهومی مانند «اندازه» دست بکشیم، و به جای آن یك تعریف عملیاتی را که بستگی به آزمایش در دست اجرا دارد بنشانیم. ازاین‌رو، ذره‌ای مانند الکترون می‌تواند دریك آزمایش با یك اندازهٔ معین و درآزمایشی دیگر با اندازه‌ای کاملا متفاوت ظاهرشود. تنها ازطریق همین ادغام سیستم مشاهده‌کننده و جسم تحت مشاهده است که در فیزیك کوانتومی می‌توانیم مشاهده و اندازه‌گیری را تعریف کنیم. بدین ترتیب، هر ذره را باید در ناحیه‌ای ازفضا به‌ابعاد Δx جایگزیده تصور کرد. دستیابی به‌ذره دراین ناحیه محتمل و درنواحی دیگرنامحتمل است. بعد Δx مربوط به‌ناحیهٔ حضور الکترون را نوع آزمایشی‌که انجام می‌دهیم تعیین می‌کند: Δx ممکن است برابر با طول قطعه سیمی باشدکه با استفاده ازآن رسانش الکتریکی در جامدات تحت بررسی است، یا درمطالعهٔ فیزیك اتمی برابربا قطر یك اتم منفرد باشد، و یا هنگامی که واپاشی بتازا را بررسی می‌کنیم برابر با قطرهسته باشد. موج مشخصهٔ ذره، درناحیهٔ Δx دامنه‌ای بزرگ ودرنواحی دیگردامنه‌ای کوچك دارد. موج دوبروی منفردی که مؤلفه تکانهٔ خاصی مانند p_x داشته باشد، در تمام نواحی فضا دامنه‌ای بزرگ خواهد داشت. بدین‌ترتیب، یك تکانه (باطول‌موج) خاص همیشه متناظر به‌ذره‌ای‌کاملا جانا گزیده (یا ذره‌ای با موضع نامشخص) است. برای آنکه ذره موضع فضایی مشخص داشته باشد، لازم‌است‌که طول موجهای دیگری راکه متناظر به‌تکانه‌های دیگر p_x می‌شود بدان بیفزاییم تاازبرهم‌نهی آنها موج برایندی به‌دست آیدکه درخارج ازناحیهٔ Δx دامنه‌ای ناچیزداشته باشد. شناخت بیشتر Δx به قیمت شناخت کمتر p_x حاصل می‌شود. تلاش در محصور نگه‌داشتن ذره در ناحیهٔ Δx، دقت در اندازه‌گیری p_x را از بین می‌برد و گستره‌ای از مقادیر Δp_x به‌وجود می‌آورد. اگربخواهیم به‌طور همزمان مقادیر x و p_x راتعیین‌کنیم، درهریك ازآنها به‌ترتیب به‌اندازهٔ Δx و Δp_x عدم قطعیت خواهیم داشت‌که رابطهٔ عدم قطعیت هایزنبرگ ارتباط بین آنها را نشان می‌دهد

$$\Delta x\,\Delta p_x \geqslant \frac{\hbar}{۲} \qquad (۱.۲)$$

برای مؤلفه‌های y و z هم روابط مشابهی وجود دارد. نماد $\hbar$ که «h تیره» خوانده می‌شود، برابراست با $h/۲\pi$ که درآن h ثابت پلانك است. واژهٔ کلیدی دراین بحث همان‌کلمهٔ «همزمان» است. اگر بخواهیم ازشناسایی همزمان تکانهٔ ذره صرفنظر کنیم، در عمل می‌توانیم با هرعدم قطعیت کوچکی (مثلا $\Delta x = ۰$) مقدار x را اندازه‌گیری‌کنیم. البته پس از این اندازه‌گیری، اگربخواهیم می‌توانیم به‌اندازه‌گیری دقیقی ازمقدار جدید تکانه (حتی با $\Delta p_x = ۰$) دست بزنیم، که این اندازه‌گیری به‌طور همزمان شناخت دقیق قبلی را دربارهٔ موضع ذره از بین خواهد برد.

ما ذره را به‌کمك مجموعه‌ای از امواج به‌نام «بسته‌موج» که گستره‌ای از تکانه‌های حول مقدار p_x را با عدم قطعیت Δp_x شامل می‌شود و فقط درناحیهٔ Δx حول x دامنهٔ

معقول و بزرگ دارد، توصیف می‌کنیم. جایگزینی (یاموضع‌گیری) ذره در فضا در ناحیه‌ای است که با بسته‌موج آن مشخص می‌شود. بسته‌موج، تمام اطلاعات موجود در مورد ذره را به‌دست‌می‌دهد. هروقت که‌اصطلاح «ذره» را به‌کار می‌بریم،منظورمان همان «بسته‌موج» است. هرچند که اغلب از الکترونها و نوکلئونها چنان حرف می‌زنیم که گویی وجود مستقلی دارند، ولی حقیقت این است که شناخت این ذرات به‌رابطهٔ عدم قطعیت حاکم براطلاعات حاصل‌از بسته‌موجی که وضعیت موردنظر را توصیف می‌کند، محدود می‌شود.

این بحث عدم قطعیت دربارهٔ انواع دیگر اندازه‌گیریها هم صادق است. در یك سیستم، رابطهٔ بین انرژی E و بسامد موج دوبروی ν، به صورت $E=h\nu$ است. برای تعیین دقیق E، لازم است که مشاهدهٔ سیستم را در مدت زمانی بسیار طولانی Δt انجام دهیم تا بتوانیم ν را با دقت کافی به دست آوریم. رابطهٔ عدم قطعیت در این حالت به‌صورت زیراست

$$\Delta E\,\Delta t \geqslant \frac{\hbar}{۲} \qquad (۲.۲)$$

سومین رابطهٔ عدم قطعیت، مربوط به تکانهٔ زاویه‌ای است. در فیزیك کلاسیك می‌توانیم هر سه مؤلفهٔ بردار تکانهٔ زاویه‌ای $\mathbf{l}$ را به صورت l_x، l_y، و l_z تعیین کنیم. در مکانیك کوانتومی، هنگامی که می‌خواهیم شناخت بهتری از یك مؤلفه به‌دست آوریم، این امر به بهای کم شدن اطلاعات ما از دو مؤلفهٔ دیگر تمام می‌شود. فرض کنید که می‌خواهیم مؤلفهٔ z تکانهٔ زاویه‌ای را اندازه بگیریم، و فرض کنید که موضع تصویر $\mathbf{l}$ را در صفحهٔ xy با زاویهٔ سمتی ϕ مشخص کرده‌ایم. دراین صورت داریم

$$\Delta l_z\,\Delta\phi \geqslant \frac{\hbar}{۲} \qquad (۳.۲)$$

اگر l_z را به‌طور کاملا دقیق بدانیم، دیگر دربارهٔ ϕ هیچ اطلاعی نخواهیم داشت. می‌توانیم $\mathbf{l}$ را در حرکت تقدیمی یا دوران حول محور z در نظر بگیریم، به‌طوری که مقدار l_z ثابت باشد ولی مؤلفه‌های l_x و l_y تمام مقادیر ممکن را اختیار کنند، در این صورت ϕ کاملا نامشخص خواهد شد.

۲.۲ اصول مکانیك کوانتومی

خصوصیات ریاضی مکانیك کوانتومی نانسبیتی ازحل معادلهٔ شرودینگر به دست می‌آید. معادلهٔ مستقل از زمان و یك‌بعدی شرودینگر برای ذره‌ای به جرم m و با انرژی پتانسیل $V(x)$ به‌صورت زیراست

$$-\frac{\hbar^۲}{۲m}\frac{d^۲\psi}{dx^۲}+V(x)\psi(x)=E\psi(x) \qquad (۴.۲)$$

که درآن $\psi(x)$ تابع موج شرودینگر است. تابع موج درواقع توصیف ریاضی بسته‌موج است. به‌طور کلی، این معادله فقط به‌ازای مقادیرمعینی از انرژی E قابل حل است. این مقادیر که معمولا ازکاربرد شرایط‌مرزی برای تابع $\psi(x)$ حاصل‌می‌شوند، ویژه‌مقدارهای انرژی نامیده می‌شوند. جواب کامل معادله، با در نظر گرفتن وابستگی زمانی، به صورت زیر است

$$\Psi(x, t)=\psi(x)e^{-i\omega t} \qquad (۵.۲)$$

که درآن $\omega=E/\hbar$ است.

یکی ازشرایط مهمی که برای تابع موج ψ درنظرمی‌گیرند، این است که ψ ومشتق اول آن $d\psi/dx$ باید روی هر مرزی پیوسته بمانند. در واقع، در مورد امواج کلاسیك نیزهمین شرط برقرار است. درهرجایی که مرزی بین دومحیط وجود داشته باشد، مثلا در $x=a$، باید روابط زیر برقرار شوند

$$\lim_{\varepsilon\to 0}[\psi(a+\varepsilon)-\psi(a-\varepsilon)]=0 \qquad (۶.۲ \text{ الف})$$

$$\lim_{\varepsilon\to 0}\left[\left(\frac{d\psi}{dx}\right)_{x=a+\varepsilon}-\left(\frac{d\psi}{dx}\right)_{x=a-\varepsilon}\right]=0 \qquad (۶.۲ \text{ ب})$$

در حالت خاصی کـه تابع انرژی پتانسیل $V(x)$ ناپیوستگی (یا انفصال) بینهایت داشته باشد، احتراز ازشرط (۶.۲ب) مجازاست. اما، شرط(۶.۲ الف) همیشه باید برقرارشود.

شرط دیگری که از تعبیر چگالی احتمال ناشی می‌شود و ذیلا به‌شرح آن می‌پردازیم، این است که تابع ψ باید متناهی‌بماند. هرجوابی ازمعادلهٔ شرودینگر که‌درآن ψ نامتناهی شود بایدکنار گذاشته شود.

بـا شناخت تابع موج $\Psi(x, t)$ بـرای یك سیستم، می‌توانیم بسیاری از خواص سیستم را محاسبه‌کنیم. برای نمونه، احتمال حضور ذره (یا بسته‌موج) در فاصلهٔ بین x و $x+dx$ عبارت است از

$$P(x)\,dx=\Psi^*(x, t)\Psi(x, t)\,dx \qquad (۷.۲)$$

که درآن Ψ^* مزدوج مختلط Ψ است. کمیت $\Psi^*\Psi$ را چگالی احتمال می‌نامند. احتمال حضور ذره درمحدودهٔ بین x_1 و x_2 ازحاصل‌جمع یا انتگرال همهٔاین احتمالهای بینهایت کوچك به‌دست می‌آید

$$P=\int_{x_1}^{x_2}\Psi^*\Psi\,dx \qquad (۸.۲)$$

احتمال کل حضور ذره باید برابر ۱ شود

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^* \Psi \, dx = ۱ \qquad (۹.۲)$$

این شرط را شرط بهنجارش می‌گویند، که در عمل وسیله‌ای برای تعیین ضرایب ثابت در تابع موج Ψ است. هر تابع موج فیزیکی را باید به‌طریقی مقتضی بهنجار کرد.

دراین سیستم کوانتوم ـ مکانیکی، مقدارهر تابعی از x مانند $f(x)$ رامی‌توان به‌شرح زیر تعیین کرد. مقادیر اندازه‌گرفتنی $f(x)$ به‌کمك چگالی احتمال به‌دست می‌آید، ومقدار میانگین $f(x)$ با تعیین سهم هر تابع درمقدار میانگین محاسبه می‌شود

$$\langle f \rangle = \int \Psi^* f \Psi \, dx \qquad (۱۰.۲)$$

مقادیر میانگینی را که بدین طریق محاسبه می‌شوند، مقادیر انتظاری کوانتوم ـ مکانیکی می‌گویند.

در تعبیراین مقادیر انتظاری باید کمی مواظب باشیم و سنجیده عمل کنیم. مکانیك کوانتومی با نتایج آماری سروکار دارد، و بسیاری ازمحاسبات ما در واقع میانگینهای آماری هستند. اگر تعداد زیادی سیستم یکسان دراختیار داشته باشیم و $f(x)$ را برای هریك از آنها اندازه‌گیری کنیم، مقدارمیانگین این اندازه‌گیریها همان $\langle f \rangle$ خواهد شد. یکی از جنبه‌های ناخوشایند نظریهٔ کوانتومی، ناتوانی آن در پیش‌بینی قطعی نتیجهٔ یك آزمایش است؛ تمام آنچه دراین نظریه می‌توانیم پیش‌بینی کنیم این است که میانگین آماری تعداد زیادی از اندازه‌گیریها را به‌دست آوریم.

اغلب لازم می‌شود که مقدار میانگین کمیتهایی را تعیین کنیم که تابع ساده‌ای از x نیستند. برای نمونه، چگونه می‌توان مقدار $\langle p_x \rangle$ را محاسبه کرد؟ چون p_x تابعی از x نیست، ما نمی‌توانیم معادلهٔ(۱۰.۲) را درمحاسبهٔ آن به‌کار ببریم. حل این مشکل به‌کمك ریاضیات نظریهٔ کوانتومی میسرمی‌شود. دراین روش ریاضی، متناظر با هرمتغیر کلاسیکی یك عملگر کوانتوم مکانیکی وجود دارد. عملگرریاضی، در واقع، نمادی است که ما را به‌اجرای یك عمل ریاضی نظیر exp یا sin یا d/dx رهبری می‌کند. بنابرقرارداد، می‌پذیریم که عملگرفقط روی متغیر یا تابعی عمل می‌کند که بلافاصله درسمت راست آن قرار دارد. البته وقتی که توابع را دسته‌بندی می‌کنیم و درون پرانتز می‌آوریم، مشخصاً می‌خواهیم که عملگرروی همهٔ آنها عمل کند. این قرارداد بدان معنی است که یادآوری شکل معادلهٔ (۱۰.۲) اهمیت زیادی دارد: در اینجا، عملگر f بین تابعهای Ψ^* و Ψ «ساندویچ شده‌است» وفقط روی تابع Ψ عمل می‌کند. ازمیان عملگرهای مکانیك کوانتومی، عملگر تکانه $p_x = -i\hbar\partial/\partial x$ و عملگرانرژی $E = i\hbar\partial/\partial t$ بیشتراز بقیه کاربرد دارند. توجه کنید که نخستین قسمت اولین جمله در سمت چپ معادلهٔ شرودینگر (۴.۲) فقط $p_x^۲/۲m$ است که می‌توان آن را عملگر انرژی جنبشی درنظر گرفت. همچنین به‌این نکته توجه کنید که از تأثیر عملگر E بر $\Psi(x, t)$ درمعادلهٔ (۵.۲)، حاصلضرب عدد E در $\Psi(x, t)$ به‌دست می‌آید.

اکنون می‌توانیم مقدار انتظاری مؤلفهٔ x تکانه را به‌صورت زیر به‌دست آوریم

$$\langle p_x \rangle = \int \Psi^* \left(-i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \right) \Psi \, dx$$

$$= -i\hbar \int \Psi^* \frac{\partial \Psi}{\partial x} \, dx \qquad (۱۱.۲)$$

یکی‌از ویژگیهای بسیارمهم محاسبات بالا این است که وقتی مزدوج مختلط Ψ را از معادلهٔ (۵.۲) به‌دست می‌آوریم، عامل وابسته به زمان به صورت $e^{+i\omega t}$ درمی‌آید، و بدین‌سان وابستگی زمانی ازتمامی معادلات (۷.۲) تا (۱۱.۲) حذف می‌شود. هیچیك از خواص قابل مشاهدهٔ سیستم وابستگی زمانی ندارد. این شرایط را به‌دلایلی آشکارحالتهای مانا می‌نامند. سیستمی که در حالت مانا باشد، برای تمام زمانها در همان حالت می‌ماند و تمام متغیرهـای دینامیکی آن ثابتهای حرکت به شمار می‌روند. البته چنین حالتی جنبهٔ ایده‌آلی‌وتخیلی دارد، زیرا هیچ سیستمی برای همیشه باقی نمی‌ماند. امابسیاری ازسیستمها را می‌توان در حالتهایی در نظرگرفت که تقریباً مانا هستند. از همین نظراست که می‌توانیم ازگذار اتم از یك حالت برانگیختهٔ «مانا» به‌حالت «مانا»ی دیگرسخن بگوییم.

همراه باهرتابع‌موج Ψ مفهوم چگالی جریان ذره را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$j = \frac{\hbar}{۲mi} \left(\Psi^* \frac{\partial \Psi}{\partial x} - \Psi \frac{\partial \Psi^*}{\partial x} \right) \qquad (۱۲.۲)$$

این‌کمیت با مفهوم جریان الکتریکی قابل مقایسه است، که با استفاده از آن تعداد ذرات گذرنده از هرنقطهٔ x در هرثانیه مشخص می‌شود.

شکل معادلهٔ شرودینگر درحالت سه‌بعدی، بستگی به‌دستگاه مختصاتی داردکه برای بررسی مسئله انتخاب می‌شود. در دستگاه مختصات دکارتی، انـرژی پتانسیل تابعـی از (x, y, z) است ومعادلهٔ شرودینگرچنین می‌شود

$$-\frac{\hbar^۲}{۲m}\left(\frac{\partial^۲\psi}{\partial x^۲}+\frac{\partial^۲\psi}{\partial y^۲}+\frac{\partial^۲\psi}{\partial z^۲}\right)+V(x, y, z)\psi(x, y, z)=E\psi(x, y, z) \qquad (۱۳.۲)$$

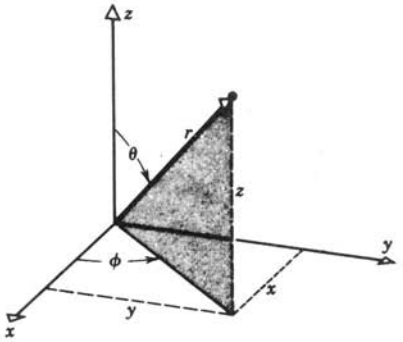
جواب کامل وابسته به‌زمان دراین حالت به‌صورت زیراست

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z) e^{-i\omega t} \qquad (۱۴.۲)$$

چگالی احتمال $\Psi^*\Psi$ در این مورد هم احتمال وجود در واحد حجم را به دست می‌دهد. احتمال حضور ذره درجزء حجم $dv = dx\,dy\,dz$ درنقطهٔ (x, y, z) عبارت است از

$$P\,dv = \Psi^*\Psi\,dv \qquad (۱۵.۲)$$

برای تعیین احتمال وجودکل در حجم V باید بـه کمك انتگرال سه‌گانه روی متغیرهای



شکل ۱.۲ دستگاه مختصات قطبی کروی و ارتباط آن با دستگاه دکارتی.

x، y، و z انتگرال گیری کرد. همهٔ آن خواصی راکه در بالا برای سیستم یك بعدی بیان کردیم، به‌آسانی می‌توان برای سیستم سه‌بعدی تعمیم داد.

چون هسته‌ها تقریباً کروی شکل‌اند، دستگاه مختصات دکارتی مناسب‌ترین دستگاه برای بررسی آنها نیست. به جای مختصات دکارتی، بهتراست از دستگاه مختصات قطبی کروی مطابق شکل ۱.۲ استفاده کنیم. معادلهٔ شرودینگر در این دستگاه بـه صورت زیر نوشته می‌شود

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\left[\frac{\partial^2\psi}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial\psi}{\partial r}+\frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\psi}{\partial\theta}\right)+\frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial^2\psi}{\partial^2\phi}\right]$$
$$+V(r,\theta,\phi)\psi(r,\theta,\phi)=E\psi(r,\theta,\phi) \qquad (۱۶.۲)$$

تمام مطالب قبلی در این مورد هـم صادق است. جزء حجم در این حالت به صورت زیر درمی‌آید

$$dv=r^2\sin\theta\,dr\,d\theta\,d\phi \qquad (۱۷.۲)$$

کاربرد اصول فوق‌الذکر را در دو بخش بعدی تشریح خواهیم‌کرد. نخست مسائل سادهٔ یك‌بعدی ریاضی را بررسی می‌کنیم، وسپس مسائل فیزیکی‌تر سه‌بعدی را موردتوجه قرار می‌دهیم.

۳.۲ مسائل یك‌بعدی

ذرهٔ آزاد

در ایـن حالت هیچ نیرویی بر ذره اثر نمی‌کند، و انرژی پتانسیل را درتمام نقاط برابر $V(x)=0$ درنظر می‌گیریم. بنابراین، معادلهٔ (۴.۲) به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود

$$\frac{d^2\psi}{dx^2}=-\frac{2mE}{\hbar^2}\psi \qquad (۱۸.۲)$$

جواب این معادلهٔ دیفرانسیل را می‌توان چنین نوشت

$$\psi(x)=A'\sin kx+B'\cos kx \qquad (۱۹.۲)$$

شکل معادل این جواب به‌صورت زیر است

$$\psi(x)=Ae^{ikx}+Be^{-ikx} \qquad (۲۰.۲)$$

که در آن $k^2=2mE/\hbar^2$ است و A و B (یا A' و B') مقادیر ثابت‌اند.
تابع موج وابسته به‌زمان چنین می‌شود

$$\Psi(x,t)=Ae^{i(kx-\omega t)}+Be^{-i(kx+\omega t)} \qquad (۲۱.۲)$$

جملهٔ اول این جواب نمایشگر موجی است که درجهت مثبت x در حرکت است، و جملهٔ دوم موج متحرکی را درجهت منفی x نشان می‌دهد. شدت هریك ازاین موجها از مربع دامنه‌هایشان، $|A|^2$ و $|B|^2$، به‌دست می‌آید. چون هیچ شرط مرزی وجود ندارد، هیچ محدودیتی درانرژی ذره E نیست، یعنی تمام مقادیر E درجوابهای معادله صدق می‌کنند. شرط بهنجارش (۹.۲) هم در این مورد قابل استفاده نیست، زیرا انتگرالهای $\sin^2$ یا $\cos^2$ در گسترهٔ از $x=-\infty$ تا $x=+\infty$ همگرا نیستند. به‌جای استفاده ازشرط (۹.۲)، دراین گونه موارد که پتانسیل ثابت است، ازشرایط بهنجارش دیگری بهره گیری می‌کنیم. فرض کنید چشمه‌ای مانند یك شتابدهنده که در $x=-\infty$ قراردارد، در هرثانیه به‌تعداد I ذره با تکانهٔ $p=\hbar k$ درجهت مثبت x گسیل می‌کند. چون ذرات درجهت مثبت x در حرکت‌اند، می‌توانیم B را برابرصفر بگیریم. یعنی، شدت موج مربوط به‌ذراتی که در جهت منفی x حرکت می‌کنند باید برابرصفرشود تا هیچ ذره‌ای درآن جهت در حرکت نباشد. بنابراین، طبق معادلهٔ (۱۲.۲)، جریان ذرات به‌صورت زیردرمی‌آید

$$j=\frac{\hbar k}{m}|A|^2 \qquad (۲۲.۲)$$

که باید با شدت جریان I ذره درثانیه‌که ازچشمه گسیل می‌شود برابر باشد. بدین‌ترتیب، خواهیم داشت $A=\sqrt{mI/\hbar k}$.

پتانسیل پله‌ای $E>V_0$

دراین حالت پتانسیل به‌صورت زیراست

$$\begin{aligned} V(x)&=0 \qquad x<0\\ &=V_0 \qquad x>0 \end{aligned} \qquad (۲۳.۲)$$

که در آن $V_0 > 0$ است. در اینجا بخش $x < 0$ را ناحیهٔ ۱ و بخش $x > 0$ را ناحیهٔ ۲ نامگذاری می‌کنیم. در این‌صورت در ناحیهٔ ۱، معادلهٔ شرودینگر به‌همان شکل معادلهٔ (۱۸.۲) است وجوابهای ψ_1 ازمعادلهٔ (۲۰.۲) به‌دست می‌آید که در آن $k = k_1 = \sqrt{2mE/\hbar^2}$ می‌شود. در ناحیهٔ ۲، معادلهٔ شرودینگر چنین می‌شود

$$\frac{d^2\psi_2}{dx^2} = -\frac{2m(E-V_0)}{\hbar^2}\psi_2 \qquad (۲۴.۲)$$

چون $E > V_0$ است، جواب این معادله را می‌توان به‌صورت زیر نوشت

$$\psi_2 = Ce^{ik_2x} + De^{-ik_2x} \qquad (۲۵.۲)$$

که در آن $k_2 = \sqrt{2m(E-V_0)/\hbar^2}$ است.

با توجه به شرایط مرزی در $x = 0$، ازمعادلهٔ (۶.۲ الف) به‌دست می‌آید

$$A + B = C + D \qquad (۲۶.۲ \text{ الف})$$

واز معادلهٔ (۶.۲ب) هم حاصل می‌شود

$$k_1(A-B) = k_2(C-D) \qquad (۲۶.۲ \text{ ب})$$

فرض کنید که ذرات از چشمه‌ای مستقر در $x = -\infty$ به‌طرف پله تابیده می‌شوند. در این صورت، جملهٔ A در ψ_1 نمایشگر موج تابشی (یا فرودی) و جملهٔ B در ψ_1 نمایشگر موج بازتابیده است (موج تابشی موجی است که در ناحیهٔ $x < 0$ به‌طرف پله در $x = 0$ حرکت می‌کند، درحالی که موج بازتابیده در همین ناحیه به طرف $x = -\infty$ درحرکت است). جملهٔ C در ψ_2 نمایشگر موج عبوری است (یعنی موجی که از $x = 0$ وارد ناحیهٔ $x > 0$ می‌شود). جملهٔ D در این مسئله نمی‌تواند جایی داشته‌باشد، زیرا هیچ راهی وجود ندارد که از طریق آن موج ناحیهٔ ۲ به‌طرف مبدأ حرکت کند، و بنابراین با قراردادن $D = 0$ آن را از بین می‌بریم. ازحل معادلات (۲۶.۲ الف‌وب) خواهیم‌داشت

$$B = A\frac{1 - k_2/k_1}{1 + k_2/k_1} \qquad (۲۷.۲)$$

$$C = A\frac{2}{1 + k_2/k_1} \qquad (۲۸.۲)$$

ضریب بازتاب R را به‌صورت نسبت جریان موج بازتابیده به‌جریان تابشی تعریف می‌کنیم

$$R = \frac{j_{\text{بازتابش}}}{j_{\text{تابش}}} \qquad (۲۹.۲)$$

با استفاده ازمعادلهٔ (۲۲.۲) خواهیم داشت

$$R=\frac{|B|^{۲}}{|A|^{۲}}=\left(\frac{۱-k_{۲}/k_{۱}}{۱+k_{۲}/k_{۱}}\right)^{۲} \qquad (۳۰.۲)$$

به همین ترتیب، ضریب عبور T به صورت نسبت جریان عبوری به جریان تابشی تعریف می‌شود

$$T=\frac{j_{\text{عبور}}}{j_{\text{تابش}}} \qquad (۳۱.۲)$$

که درنتیجه داریم

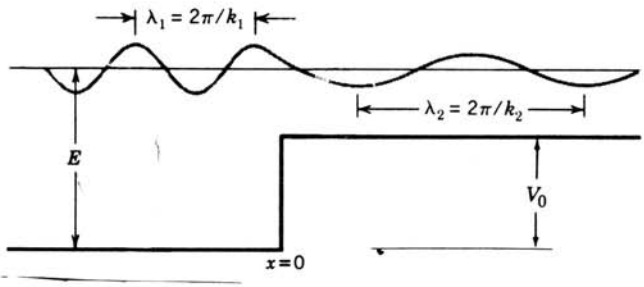
$$T=\frac{k_{۲}|C|^{۲}}{k_{۱}|A|^{۲}}=\frac{۴k_{۲}/k_{۱}}{(۱+k_{۲}/k_{۱})^{۲}} \qquad (۳۲.۲)$$

توجه کنید، همچنانکه انتظار می‌رود، خواهیم داشت $R+T=۱$. نتایج حاصل از این مسئله را درشکل ۲.۲ نشان داده‌ایم.

این مسئله، نمونهٔ ساده‌ای از مسئلهٔ پراکندگی است. در فصل ۴، چگونگی تعمیم این مفاهیم را به‌حالتهای سه‌بعدی نشان می‌دهیم و آن‌را درمسائل پراکندگی نوکلئون ـ نوکلئون به‌کار می‌بریم.

پتانسیل پله‌ای $E<V_{۰}$

در این حالت، پتانسیل همچنان به صورت معادلهٔ (۲۳.۲) است، و حل مسئله در ناحیهٔ ۱ ($x<۰$) نیز همانند محاسبات قبلی است. اما درناحیهٔ ۲، معادلهٔ شرودینگر چنین می‌شود



شکل ۲.۲ تابع موج یك ذره بـا انرژی E در رویارویی بـا پله‌ای به ارتفاع $V_{۰}$ که درآن $E>V_{۰}$ است. هنگامی کـه ذره از پله عبور می‌کند، طول موج دوبروی از $\lambda_{۱}$ به $\lambda_{۲}$ تغییر می‌کند، ولی ψ و $d\psi/dx$ هردو در $x=۰$ پیوسته‌اند.

$$\frac{d^2\psi_2}{dx^2}=\frac{2m}{\hbar^2}(V_0-E)\psi_2 \qquad (۳۳.۲)$$

جواب این معادله به‌صورت زیر است

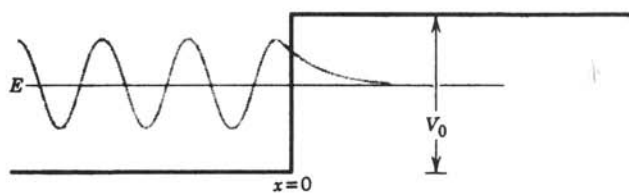
$$\psi_2=Ce^{k_2x}+De^{-k_2x} \qquad (۳۴.۲)$$

که در آن $k_2=\sqrt{2m(V_0-E)/\hbar^2}$ است. توجه کنید که برای حالتهایی که پتانسیل ثابت داشته باشند، جوابها یا به‌صورت نوسانی نظیر معادلات (۱۹.۲ و ۲۰) هستند که در شرایط $E>V_0$ حاصل می‌شوند، یا به‌صورت نمایی نظیر معادلهٔ (۳۴.۲) که در شرایط $E<V_0$ به‌دست می‌آیند. جوابهای معادلهٔ شرودینگر، اگرچه در پتانسیلهای غیر ثابت $V(x)$ صورتهای متفاوتی پیدا می‌کنند، ولی رفتار عمومی‌شان تغییر نمی‌کند. یعنی، هنگامی که $E>V(x)$ باشد جواب همیشه نوسانی است (هرچند که لازم نیست حتماً نوسان آن از نوع سینوسی باشد)، و هنگامی که $E<V(x)$ باشد جواب همیشه نمایی است.

لازم است که جواب (۳۴.۲) برای سراسر ناحیهٔ $x>0$ صادق باشد. چون جملهٔ اول به‌ازای $x\to\infty$ به‌سوی بینهایت میل می‌کند، شرط متناهی بودن تابع موج موجب می‌شود که $C=0$ باشد. جملهٔ D در تابع ψ_2، یکی از تفاوتهای مهم بین فیزیك کلاسیك و کوانتومی را نشان می‌دهد: این جمله نشانگر نفوذ تابع موج به ناحیه‌ای است که از دیدگاه کلاسیك ممنوع‌الورود است. تمام ذرات (کلاسیك) در مرز ناحیهٔ ممنوع بازتابیده می‌شوند و به ناحیهٔ قبلی باز می‌گردند، ولی بسته‌موج کوانتوم مکانیکی می‌تواند با نفوذ از مرز تا حدودی در ناحیهٔ ممنوع پیشروی کند. ذرهٔ کلاسیك در این ناحیه هرگز به‌طور مستقیم قابل مشاهده نیست، زیرا به‌دلیل $E<V_0$ در ناحیهٔ ۲ انرژی جنبشی آن باید منفی شود. وضعیت این مسئله را در شکل ۳.۲ نشان داده‌ایم.

سد پتانسیل $E>V_0$

در این مسئله، تابع پتانسیل چنین تعریف می‌شود



شکل ۳.۲ تابع موج یك ذره با انرژی E در رویارویی با پله‌ای به‌ارتفاع V_0 که در آن $E<V_0$ است. تابع موج در ناحیه‌ای که از نظر کلاسیك ممنوع است به‌طور نمایی کاهش می‌یابد، و انرژی جنبشی کلاسیك در این ناحیه منفی می‌شود. درمرز $x=0$، توابع ψ و $d\psi/dx$ پیوسته‌اند.

$$\begin{aligned} V(x) &= 0 & x &< 0 \\ &= V_0 & 0 &\leqslant x \leqslant a \\ &= 0 & x &> a \end{aligned} \qquad (۳۵.۲)$$

جوابهای معادلهٔ شرودینگر دراین نواحی ۱، ۲، و ۳ عبارت‌اند از

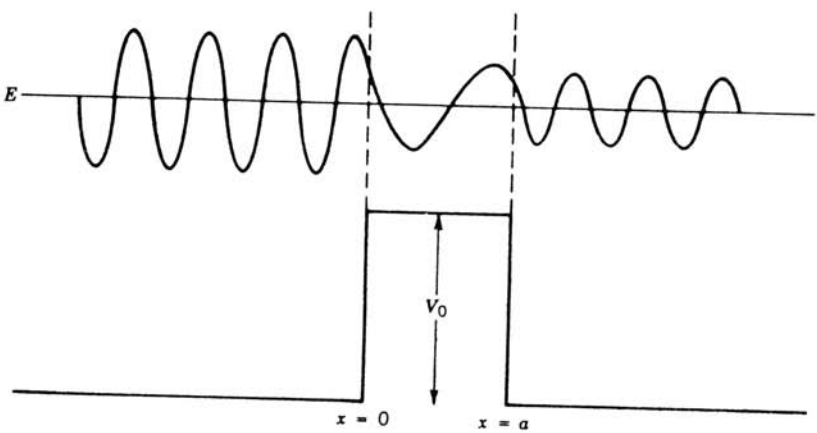
$$\begin{aligned} \psi_1 &= Ae^{ik_1 x} + Be^{-ik_1 x} \\ \psi_2 &= Ce^{ik_2 x} + De^{-ik_2 x} \\ \psi_3 &= Fe^{ik_2 x} + Ge^{-ik_2 x} \end{aligned} \qquad (۳۶.۲)$$

که در آنها $k_1 = k_3 = \sqrt{2mE/\hbar^2}$ و $k_2 = \sqrt{2m(E-V_0)/\hbar^2}$ است.

با استفاده از شرایط پیوستگی در $x=0$ و $x=a$ و این فرض که ذرات از $x=-\infty$ گسیل می‌شوند (یعنی G را می‌توان برابرصفر گرفت)، پس‌ازانجام محاسبات جبری، ضریب عبور $T=|F|^2/|A|^2$ را می‌توان چنین به‌دست آورد

$$T = \frac{1}{1 + \frac{1}{4}\frac{V_0^2}{E(E-V_0)}\sin^2 k_2 a} \qquad (۳۷.۲)$$

این پاسخ را درشکل ۴.۲ نشان داده‌ایم.



شکل ۴.۲ تابع موج یك ذره با انرژی $E > V_0$ در رویارویی با سد پتانسیل. ذره از طرف چپ تابیده می‌شود. موج در هردو مرز بازتاب دارد، و دامنهٔ آن پس از عبور از سد کوچکتر خواهد شد.

سد پتانسیل $E < V_0$

دراین حالت، جوابهای ψ_1 و ψ_3 به‌همان صورت قبلی هستند، ولی ψ_2 چنین می‌شود

$$\psi_2 = Ce^{k_2 x} + De^{-k_2 x} \qquad (۳۸.۲)$$

که دراینجا $k_2 = \sqrt{2m(V_0 - E)/\hbar^2}$ است. چون ناحیهٔ ۲ به‌داخل مرزهای $x = 0$ و $x = a$ محدود می‌شود، مسئلهٔ بینهایت شدن جواب نمایی مطرح نخواهد شد، و در نتیجه نمی‌توان C یا D را برابرصفر گرفت.

دراینجا هم با به‌کاربردن شرایط مرزی در $x = 0$ و $x = a$ می‌توان ضریب عبور را به‌صورت زیر به‌دست آورد

$$T = \frac{1}{1 + \frac{1}{4}\frac{V_0^2}{E(V_0 - E)}\sinh^2 k_2 a} \qquad (۳۹.۲)$$

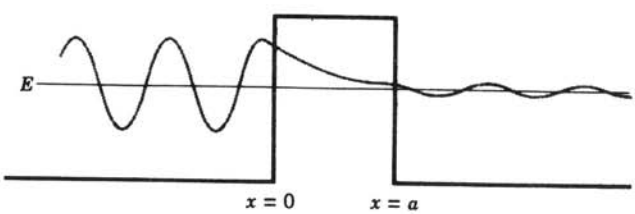
از دیدگاه کلاسیك انتظار داریم که $T = 0$ شود، یعنی ذره نمی‌تواند به‌ناحیهٔ ممنوع که در آنجا انرژی جنبشی‌اش منفی خواهد شد وارد شود. موج کوانتومی می‌تواند در سد نفوذ کند، زیرا احتمال حضور ذره را در آن‌سوی سد برابر یك مقدارغیرصفر به‌دست می‌آوریم. جواب این مسئله را درشکل ۵.۲ نشان داده‌ایم.

این پدیدهٔ نفوذ از سد یا تونل‌زنی کوانتوم‌مکانیکی کاربردهای مهمی درفیزیك‌هسته‌ای، بویژه درنظریهٔ واپاشی آلفازا، داردکه درفصل ۸ ازآن بحث خواهیم کرد.

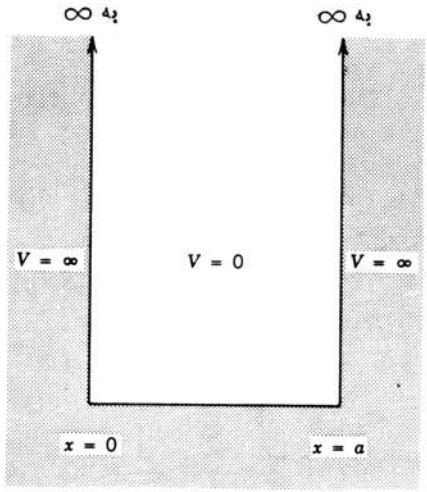
چاه پتانسیل نامتناهی

پتانسیل دراین مورد (مطابق شکل ۶.۲) به‌صورت زیرتعریف می‌شود

$$\begin{aligned} V(x) &= \infty \qquad x < 0,\ x > a \\ &= 0 \qquad 0 \leqslant x \leqslant a \end{aligned} \qquad (۴۰.۲)$$



شکل ۵.۲ تابع موج یك ذره با انرژی $E < V_0$ در رویارویی با سد پتانسیل. ذره ازطرف چپ تابیده می‌شود. طول موج در دو طرف سد یکسان است، اما دامنهٔ موج پس از عبور از سد خیلی از دامنهٔ اولیه کمتر می‌شود. ذره را هرگز نمی‌توان در داخل سد (که درآن انرژی جنبشی‌اش منفی خواهد شد) مشاهده کرد، اما این ذره درآن‌سوی سد قابل مشاهده است.



شکل ۶.۲ ذره در ناحیهٔ یك‌بعدی $0 \leqslant x \leqslant a$ آزادانه در حرکت است، اما هرگز راهی به‌نواحی $x < 0$ و $x > a$ ندارد. نمونهٔ فیزیکی سادهٔ این مسئله، مهره‌ای است که روی یك سیم بدون اصطکاك می‌لغزد و با برخورد الاستیك از دیوارهای دوطرف سیم برمی‌گردد.

این بدان معنی است که ذره درفاصلهٔ بین $x = 0$ و $x = a$ به‌دام افتاده است. دیوارها در مرز $x = 0$ و $x = a$ مطلقاً غیرقابل نفوذند. از این‌رو ذره را هرگز نمی‌توان در خارج از چاه یافت، و درنواحی $x < 0$ و $x > a$ داریم $\psi = 0$. معادلهٔ شرودینگردر داخل چاه به صورت معادلهٔ (۱۸.۲) است که جواب آن را به‌صورت معادلهٔ (۱۹.۲) در نظر می‌گیریم

$$\psi = A \sin kx + B \cos kx \qquad (۴۱.۲)$$

بنابر شرط پیوستگی ψ در $x = 0$ داریم $\psi(0) = 0$ که لازمهٔ آن $B = 0$ است. در $x = a$، شرط پیوستگی ψ به‌صورت زیردرمی‌آید

$$A \sin ka = 0 \qquad (۴۲.۲)$$

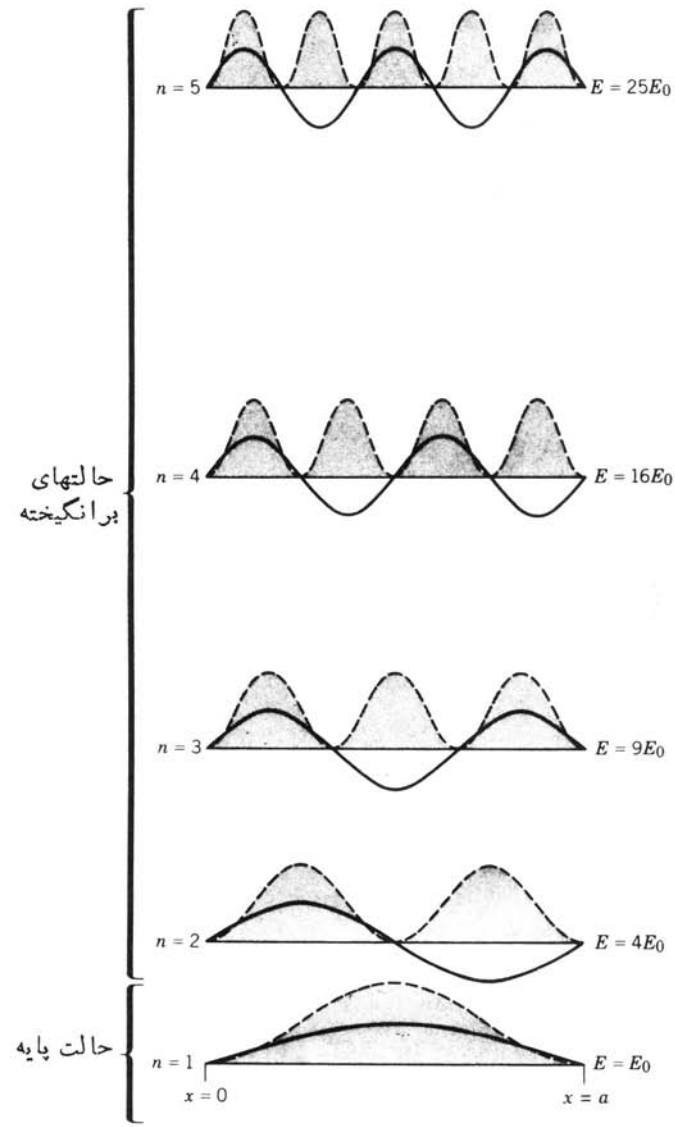
جواب $A = 0$ در این معادله قابل قبول نیست، زیرا درآن صورت در تمام نقاط $\psi = 0$ می‌شود. پس باید $\sin ka = 0$ شود که درنتیجه خواهیم داشت

$$ka = n\pi \qquad n = 1, 2, 3, \cdots \qquad (۴۳.۲)$$

و

$$E_n = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2ma^2} n^2 \qquad (۴۴.۲)$$

دراین حالت انرژی کوانتیده است، یعنی فقط مقادیرمعینی از انرژی مجاز (یا قابل قبول) است. طیف انرژی این مسئله درشکل ۷.۲ نشان داده شده است. این حالتها راکه درآنها



شکل ۷.۲ ترازهای مجاز انرژی درچاه مربعی نامتناهی یك‌بعدی. تابع موج هرتراز را با منحنی پیوسته (خط پررنگ) نشان داده‌ایم. منحنی خط‌چین، چگالی احتمال هر تراز را نشان می‌دهد. انرژی E_0 برابراست با $\hbar^2\pi^2/2ma^2$.

ذره تحت تأثیر پتانسیل درناحیهٔ مشخصی ازفضا محصور می‌شود، حالتهای مقید می‌نامند. تابع‌موجهای متناظر به‌حالتهای انرژی پیشگفته به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$\psi_n = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{n\pi x}{a} \qquad (۴۵.۲)$$

کـه درآن مقدار ثابت A با استفاده از معادلهٔ (۹.۲) محاسبه شده است. چگالی احتمال $|\psi|^2$ را برای چند حالت پایین درشکل ۷.۲ نشان داده‌ایم.

چاه پتانسیل متناهی

دراین حالت، عمق چاه پتانسیل را درفاصلهٔ بین $+a/2$ و $-a/2$ برابر V_0 می‌گیریم

$$V(x) = V_0 \qquad |x| > \frac{a}{2} \qquad (۴۶.۲)$$

$$= 0 \qquad |x| < \frac{a}{2}$$

حال می‌خواهیم جوابهای حالت مقید را، وقتی‌که $E < V_0$ است، پیدا کنیم. جوابهای نواحی مختلف را به‌صورت زیر درنظر می‌گیریم

$$\psi_1 = Ae^{k_1 x} + Be^{-k_1 x} \qquad x < -\frac{a}{2}$$

$$\psi_2 = Ce^{ik_2 x} + De^{-ik_2 x} \qquad -\frac{a}{2} \leqslant x \leqslant \frac{a}{2} \qquad (۴۷.۲)$$

$$\psi_3 = Fe^{k_1 x} + Ge^{-k_1 x} \qquad x > \frac{a}{2}$$

کـه درآنها $k_1 = \sqrt{2m(V_0 - E)/\hbar^2}$ و $k_2 = \sqrt{2mE/\hbar^2}$ است. بـرای آنـکـه تـابع موج درناحیهٔ ۱ به‌ازای $x \to -\infty$ متناهی بماند، لازم است‌که $B = 0$ شود؛ و برای اینکه درناحیهٔ ۳ و به‌ازای $x \to +\infty$ این تابع متناهی بماند، باید $F = 0$ شود.

با استفاده ازشرایط پیوستگی در $x = -a/2$ و $x = +a/2$ خواهیم‌داشت

$$k_2 \tan \frac{k_2 a}{2} = k_1 \qquad (۴۸.۲\text{الف})$$

یا

$$-k_2 \cot \frac{k_2 a}{2} = k_1 \qquad (۴۸.۲\text{ب})$$

این‌معادلات غیرجبری را به‌طورمستقیم نمی‌توان حل کرد، بلکه باید حل آنها را به‌صورت ترسیمی یا با استفاده از کامپیوتراز طریق عددی به دست آورد. اگرمعادلات (۴۸.۲) را به‌صورت زیر درآوریم، راه‌حل ترسیمی آسانتر است

$$\alpha \tan \alpha = (P^2 - \alpha^2)^{1/2} \qquad \text{(۴۹.۲ الف)}$$

$$-\alpha \cot \alpha = (P^2 - \alpha^2)^{1/2} \qquad \text{(۴۹.۲ب)}$$

که در آنها $\alpha = k_2 a/2$ و $P = (mV_0 a^2/2\hbar^2)^{1/2}$ است. عبارت سمت راست این معادلات دایره‌ای به‌شعاع P است، در حالی‌که سمت چپ آنها تابعی تانژانت‌گونه است که چندین شاخهٔ جدا از هم دارد. چنانکه در شکل ۸.۲ دیده می‌شود، جوابهای مسئله از محل برخورد دایره با تابع تانژانتی تعیین می‌شود. بنابراین، تعداد جوابها را شعاع P و در نتیجه عمق V_0 چاه تعیین می‌کند. به‌وجه تمایزاین مسئله بامسئلهٔ چاه نامتناهی، که تعداد حالتهای مقید درآن بینهایت می‌شد، توجه‌کنید. برای نمونه، وقتی‌که $P < \pi/2$ باشد، این مسئله فقط یك حالت مقید دارد. هنگامی $\pi/2 < P < \pi$ باشد، دوحالت مقید خواهیم داشت. برعکس اگردر بررسی سیستمی ازاین نوع فقط یك حالت مقید بیابیم، می‌توانیم حداکثرعمق چاه موردنظررا استنباط کنیم. چنانکه درفصل ۴ خواهیم دید، با استفاده از همین‌تکنیك، عمق پتانسیل‌هسته‌ای دوترون را براورد می‌کنیم. زیرا، دوترون‌که ساده‌ترین سیستم دونوکلئونی است، فقط یك حالت مقید دارد.

نوسانگرهماهنگ ساده

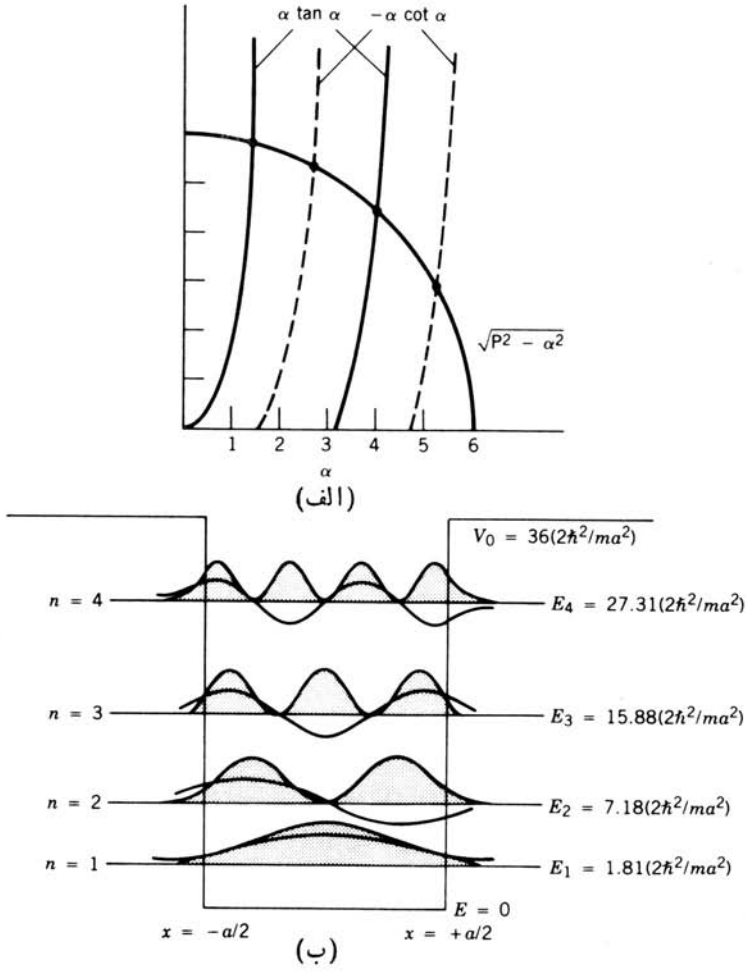
هر تابع پتانسیل نسبتاً خوشرفتاری را می‌توان برحسب سری تایلور، حول نقطهٔ x_0، به‌صورت زیر بسط داد

$$V(x) = V(x_0) + \left(\frac{dV}{dx}\right)_{x=x_0}(x - x_0) + \frac{1}{2}\left(\frac{d^2V}{dx^2}\right)_{x=x_0}(x - x_0)^2 + \dots \qquad (۵۰.۲)$$

اگر x_0 درکمینهٔ پتانسیل درنظر گرفته شود، جملهٔ دوم سری ناپدید می‌شود، و چون جملهٔ اول فقط یك مقدارثابت انرژی است، جملهٔ سوم جملهٔ جالب توجهی خواهدبود. بنابراین سیستم درتقریب‌اول، درنزدیکی پتانسیل کمینه، رفتاری همانند یك نوسانگرهماهنگ ساده خواهد داشت‌که پتانسیل آن به‌صورت $(1/2)k(x - x_0)^2$ است. بدین ترتیب، مطالعهٔ نوسانگرهماهنگ ساده برای شناسایی یك دسته از سیستمها مفید خواهد بود.

انرژی پتانسیل‌سیستم مورد نظر را، برای تمام مقادیر x، به صورت زیر اختیار می‌کنیم

$$V(x) = \frac{1}{2}kx^2 \qquad (۵۱.۲)$$



شکل ۸.۲ (الف) حل ترسیمی معادلات (۴۹.۲ الف وب). برای نمونه وقتی‌که $P=۶$ باشد، چهارجواب به‌صورت $\alpha=۱٫۳۴۵,۲٫۶۷۹,۳٫۹۸۵,۵٫۲۲۶$ به‌دست می‌آید. (ب)منحنیهای تابع موج و چگالی احتمال برای این چهار حالت. (با نتایج شکل ۷.۲ برای چاه نامتناهی مقایسه شود.)

معادلهٔ شرودینگر این سیستم به صورت $\psi(x)=h(x)e^{-\alpha^۲x^۲/۲}$ قابل حل است $(\alpha^۲=\sqrt{km}/\hbar)$. تابع $h(x)$ یك چندجمله‌ای ساده برحسب x است. درجهٔ این چندجمله‌ای (یا بزرگترین توان x) را عدد کوانتومی n که مشخصهٔ حالتهای انرژی است تعیین می‌کند، واین حالتها خود ازحل معادلهٔ شرودینگر به‌دست می‌آیند

$$E_n = \hbar\omega_0 \left(n + \frac{1}{2}\right) \qquad n = 0, 1, 2, 3, \dots \qquad (۵۲.۲)$$

که در آن $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ بسامد زاویه‌ای کلاسیك نوسانگر است. چند تابع‌موج این‌سیستم را درجدول ۱.۲، وترازهای انرژی وهمچنین چگالی احتمال آنها را درشکل ۹.۲ نشان داده‌ایم. توجه‌کنید کـه چگالی احتمالها با نتایج شکل ۸.۲ مشابهت دارد. در جایی کـه $E > V$ است جواب تقریباً به‌طورسینوسی نوسان می‌کند، درجایی که $E < V$ می‌شود (درآن‌سوی نقـاط بازگشت کلاسیك کـه در آن نوسانگر به حال سکون می‌رسد و جهت حرکتش معکوس می‌شود) جواب به‌طورنمایی کاهش می‌یابد و به‌صفرمی‌رسد. این‌جواب همچنین نفوذ چگالی احتمال را به‌درون ناحیهٔ ممنوع‌الورودکلاسیك نشان می‌دهد.

یکی از ویژگیهای درخور توجه این جواب مساوی بودن فاصلهٔ ترازهای انرژی است. این نکته را هم باید درنظر داشت که به‌خاطرعمق بینهایت پتانسیل، تعداد حالتهای مقید هم بینهایت زیاد است.

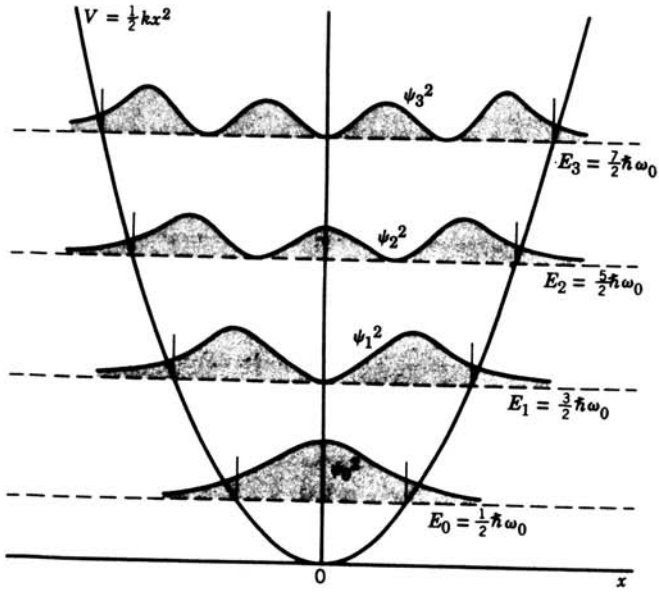
جدول ۱.۲ نمونه‌هایی از تابع‌موج یك‌بعدی نوسانگرهماهنگ ساده.

n	E_n	$\psi_n(x)$
۰	$\frac{1}{2}\hbar\omega_0$	$\pi^{-1/4} e^{-\alpha^2 x^2/2}$
۱	$\frac{3}{2}\hbar\omega_0$	$2^{-1/2}\pi^{-1/4}(2\alpha x)e^{-\alpha^2 x^2/2}$
۲	$\frac{5}{2}\hbar\omega_0$	$2^{-3/2}\pi^{-1/4}(4\alpha^2 x^2 - 2)e^{-\alpha^2 x^2/2}$
۳	$\frac{7}{2}\hbar\omega_0$	$\left(\frac{1}{4\sqrt{3}\,\pi^{1/4}}\right)(8\alpha^3 x^3 - 12\alpha x)e^{-\alpha^2 x^2/2}$
۴	$\frac{9}{2}\hbar\omega_0$	$\left(\frac{1}{8\sqrt{6}\,\pi^{1/4}}\right)(16\alpha^4 x^4 - 48\alpha^2 x^2 + 12)e^{-\alpha^2 x^2/2}$

$$E_n = \hbar\omega_0\left(n + \frac{1}{2}\right)$$

$$\psi_n(x) = (2^n n!\sqrt{\pi})^{-1/2} H_n(\alpha x) e^{-\alpha^2 x^2/2}$$

که در آن $H_n(\alpha x)$ یك چندجمله‌ای هرمیتی است



شکل ۹.۲ چند تراز انرژی پایین در نوسانگر هماهنگ و چگالی احتمال هریك از آنها.

خلاصه

درمطالعهٔ این نوع مسائل یك‌بعدی، بانکات مهمی ازخواص موجی ذرات روبه‌رو می‌شویم که موارد زیر از آن جمله است:

۱. موج کوانتومی وقتی که با سد پتانسیل روبه‌رو می‌شود، می‌تواند از سد بازتابیده شود ویا ازآن عبور کند. این طرز رفتار درست مشابه عملکرد موج کلاسیك است.
۲. بسته‌موج می‌تواند به درون ناحیهٔ ممنوع کلاسیك نفوذ کند، و به پشت سد پتانسیلی که ارتفاعش بیشتر از انرژی بسته‌موج است برسد.
۳. تابع موج درحالت $E > V(x)$ تابعی نوسانی است، ودرحالت $E < V(x)$ تابعی نمایی است که به‌سوی صفرمیل می‌کند.
۴. هنگامی که یك ذره به‌وسیلهٔ یك پتانسیل در ناحیه‌ای ازفضا محبوس می‌شود، تابع موج آن حالتهای مقید دارد. برای این ذره فقط مجموعه‌ای از مقادیر گسستهٔ انرژی مجاز است، وتعداد این مقادیرمجاز انرژی را عمق چاه پتانسیل تعیین می‌کند.

۴.۲ مسائل سه‌بعدی

چاه دکارتی نامتناهی

با مسئله‌ای در دستگاه مختصات دکارتی آغاز می‌کنیم که ویژگی مهمی ازمسائل سه‌بعدی

را که در مسائل یك‌بعدی دیده نمی‌شود، نشان می‌دهد. تابع پتانسیل را در این حالت به‌صورت زیردرنظر می‌گیریم

$$\begin{aligned} V(x, y, z) &= 0 \qquad 0 \leqslant x \leqslant a,\ 0 \leqslant y \leqslant a,\ 0 \leqslant z \leqslant a \\ &= \infty \quad x < 0,\ x > a,\ y < 0,\ y > a,\ z < 0,\ z > a \end{aligned} \tag{۵۳.۲}$$

بدین‌گونه، این ذره در جعبه‌ای مکعبی شکل به ابعاد a محبوس است. چنانکه قبلا دیدیم، درخارج از دیوارهای نفوذناپذیراین جعبه $\psi = 0$ است. معادلهٔ شرودینگردر داخل چاه به‌صورت زیرنوشته می‌شود

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right)=E\psi(x, y, z) \tag{۵۴.۲}$$

روش رایج حل معادلات دیفرانسیل جزئی این است که سعی می‌شود جوابی با متغیرهای جداگانه، مثل $\psi(x, y, z)=X(x)Y(y)Z(z)$ پیدا شود، که درآن هر یك ازعبارات X، Y، و Z تابع یك متغیرمنفرد هستند. در اینجا از تفصیل ریاضی این راه‌حل صرفنظر می‌کنیم، وفقط نتیجهٔ محاسبه را درنظرمی‌گیریم

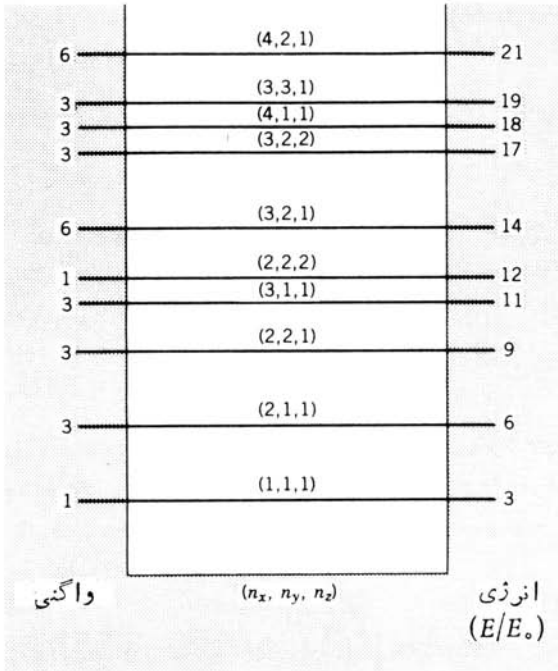
$$\psi_{n_x n_y n_z}(x, y, z)=\sqrt{\left(\frac{2}{a}\right)^3}\sin\frac{n_x\pi x}{a}\sin\frac{n_y\pi y}{a}\sin\frac{n_z\pi z}{a} \tag{۵۵.۲}$$

$$E_{n_x n_y n_z}=\frac{\hbar^2\pi^2}{2ma^2}(n_x^2+n_y^2+n_z^2) \tag{۵۶.۲}$$

که در آنها n_x، n_y، و n_z اعداد درست غیرصفر ومستقل از یکدیگرند. اعدادکوانتومی پایینترین حالت، که حالت پایه نام دارد، عبارت‌اند از $(n_x, n_y, n_z)=(1, 1, 1)$. بیشینهٔ توزیع احتمال در مرکز جعبه $(x=y=z=a/2)$ دیده می‌شود، واحتمال وجود با نزدیك شدن به‌دیوارها همانند تابع $\sin^2$ به‌سوی صفرمیل می‌کند.

نخستین حالت برانگیخته را می‌توان با سه دسته اعداد کوانتومی (۲, ۱, ۱)، (۱, ۲, ۱)، و (۱, ۱, ۲) به‌دست‌آورد. هریك ازاین حالتهای مستقل و متمایز دارای یك تابع موج خاص است، و بنابراین چگالی احتمال و مقادیرانتظاری کمیتهای فیزیکی قابل مشاهده هم برای هر یك ازآنها متفاوت خواهد بود. اما تمام این حالتها انرژی یکسان دارند. این وضعیت را باعنوان واگنی می‌شناسیم، و واگنی نخستین‌حالت برانگیختهٔ سه‌تایه است. اهمیت مفهوم واگنی درساختاراتمی فوق‌العاده زیاد است، زیرا به‌کمك‌آن می‌توان فهمیدکه در هر زیرپوستهٔ اتمی چند الکترون جای می‌گیرد. بزودی نقش مشابه آن را در مدل پوسته‌ای هسته مورد بحث قرارخواهیم داد.

پایینترین قسمت طیف انرژی حالتهای برانگیخته را در شکل ۱۰.۲ نشان داده‌ایم. به‌این‌نکته توجه کنیدکه ترتیب وفاصلهٔ ترازها به‌همان صورتی نیست‌که درمسئلهٔ یك‌بعدی مشاهده‌کردیم.



شکل ۱۰.۲ ترازهای انرژی یك ذرهٔ محبوس درجعبهٔ مکعبی سه‌بعدی. انرژی حالتها برحسب یکای $E_\circ = \hbar^2\pi^2/2ma^2$ مشخص شده است.

چاه کروی نامتناهی

اگر چارچوب مرجع را دستگاه مختصات کروی انتخاب کنیم و در آن پتانسیلی را که فقط وابسته به r باشد (وبه θ یا ϕ وابسته نباشد) در نظر بگیریم، بـه ویژگی جدید دیگری برمی‌خوریم کـه درآینده در بررسی ساختار هسته‌ای برای مـا حائز اهمیت خواهد شد. هنگامی که جوابهای با متغیرهای جداگانه را به‌صورت $\psi(r, \theta, \phi) = R(r)\Theta(\theta)\Phi(\phi)$ می‌نویسیم، پتانسیل مرکزی $V(r)$ فقط درقسمت شعاعی تابع موج ظاهرمی‌شود، وقسمتهای زاویه‌ای معادله هـم به‌طور مستقیم قابل حل خواهد بود. معادلهٔ دیفرانسیل $\Phi(\phi)$ به‌قرار زیراست

$$\frac{d^2\Phi}{d\phi^2} + m_l^2\Phi = \circ \qquad (۵۷.۲)$$

که در آن m_l^2 ثابت جداسازی است.

جواب این معادله به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$\Phi_{m_l}(\phi)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{im_l\phi} \qquad (۵۸.۲)$$

که در آن $m_l=0, \pm 1, \pm 2, \ldots$ است. معادلهٔ $\Theta(\theta)$ چنین می‌شود

$$\frac{1}{\sin\theta}\frac{d}{d\theta}\left(\sin\theta\frac{d\Theta}{d\theta}\right)+\left[l(l+1)-\frac{m_l^2}{\sin^2\theta}\right]\Theta=0 \qquad (۵۹.۲)$$

که در آن $l=0, 1, 2, 3, \ldots$ و $m_l=0, \pm 1, \pm 2, \ldots, \pm l$ است. جواب $\Theta_{lm_l}(\theta)$ را به‌صورت یك چندجمله‌ای درجهٔ l برحسب $\sin\theta$ یا $\cos\theta$ می‌توان به‌دست آورد. جوابهای $\Phi_{m_l}(\phi)$ و $\Theta_{lm_l}(\theta)$ پس از ادغام و بهنجار شدن، به‌صورت‌هماهنگهای کروی $Y_{lm_l}(\theta, \phi)$ درمی‌آیند که نمونه‌هایی ازآن را در جدول ۲.۲ نشان داده‌ایم. این توابع، بخش زاویه‌ای جواب معادلهٔ شرودینگر را برای هر پتانسیل مرکزی به دست می‌دهند. برای نمونه، همین توابع زاویه‌ای هستند که خواص فضایی اوربیتالهای اتمی را که منشأ پیوندهای مولکولی به‌شمار می‌روند تعیین می‌کنند.

درمورد هر پتانسیلی مانند $V(r)$، تمام آنچه باید انجام شود این است که جواب معادلهٔ شعاعی زیر را پیدا کنیم

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{d^2R}{dr^2}+\frac{2}{r}\frac{dR}{dr}\right)+\left[V(r)+\frac{l(l+1)\hbar^2}{2mr^2}\right]R=ER \qquad (۶۰.۲)$$

جملهٔ $l(l+1)$ را عموماً به‌صورت ضمیمهٔ پتانسیل می‌نویسند و آن را «پتانسیل گریز از مرکز» می‌نامند، زیرا وقتی که $l>0$ باشد این قسمت همانند پتانسیلی عمل می‌کند که ذره را از مرکز سیستم دور نگه می‌دارد.

برای نمونه، مورد چاه کروی نامتناهی را درنظر می‌گیریم

$$\begin{aligned} V(r)&=0 \qquad r<a \\ &=\infty \qquad r>a \end{aligned} \qquad (۶۱.۲)$$

دراینجا چون دیوارهای چاه نامتناهی را نفوذناپذیر می‌دانیم، برای نواحی $r>a$ بخش شعاعی را باید به صورت $R(r)=0$ درنظر بگیریم. در داخل چاه، جواب معادلهٔ (۶۰.۲) برای $V=0$ را می‌توانیم به‌صورت توابع نوسانی $j_l(kr)$ که توابع کروی بسل نامیده می‌شوند بنویسیم. درجدول ۳.۲ چند نمونه از این توابع را نشان داده‌ایم. برای تعیین ویژه‌مقدارهای انرژی، درست به همان شیوهٔ مسائل یك‌بعدی عمل می‌کنیم و شرط پیوستگی ψ را در $r=a$ به‌کار می‌بریم. بدین‌ترتیب خواهیم داشت

$$j_l(ka)=0 \qquad (۶۲.۲)$$

جدول ۲.۲ هماهنگهای کروی برای چند مقدار پایین l.

l	m_l	$Y_{lm_l}(\theta, \phi) = \Theta_{lm_l}(\theta)\Phi_{m_l}(\phi)$
۰	۰	$\left(\frac{۱}{۴\pi}\right)^{۱/۲}$
۱	۰	$\left(\frac{۳}{۴\pi}\right)^{۱/۲}\cos\theta$
۱	± ۱	$\mp\left(\frac{۳}{۸\pi}\right)^{۱/۲}\sin\theta\, e^{\pm i\phi}$
۲	۰	$\left(\frac{۵}{۱۶\pi}\right)^{۱/۲}(۳\cos^{۲}\theta - ۱)$
۲	± ۱	$\mp\left(\frac{۱۵}{۸\pi}\right)^{۱/۲}\sin\theta\cos\theta\, e^{\pm i\phi}$
۲	± ۲	$\left(\frac{۱۵}{۳۲\pi}\right)^{۱/۲}\sin^{۲}\theta e^{\pm ۲i\phi}$

$$\Phi_{m_l}(\phi) = \frac{۱}{\sqrt{۲\pi}} e^{im_l\phi}$$

$$\Theta_{lm_l}(\theta) = \left[\frac{۲l+۱}{۲}\,\frac{(l-m_l)!}{(l+m_l)!}\right]^{۱/۲} P_l^{m_l}(\theta)$$

که در آن $P_l^{m_l}(\theta)$ چندجمله‌ای وابستهٔ لژاندر است

این معادله هم درعمل یك معادلهٔ غیرجبری است که باید به‌طریقهٔ عددی حل‌شود. جداولی از توابع کروی بسل چاپ و منتشرشده‌اند که برای تعیین مواضع صفر هر مقداری از l می‌توان به آنها مراجعه کرد.[1] به‌عنوان مثال، مورد $l = ۰$ را در نظرمی‌گیریم. با رجوع به‌جدول معلوم می‌شود که تابع $j_۰(x)$ به‌ازای مقادیر

$$x = ۳٫۱۴,\ ۶٫۲۸,\ ۹٫۴۲,\ ۱۲٫۵۷,\ \cdots$$

برابر صفر خواهد شد. برای $l = ۱$، مواضع چند صفراول تابع $j_۱(x)$ عبارت‌اند از

1. M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions* (New York : Dover, 1965).

جدول ۳.۲ توابع کروی بسل ـ چند نمونه ازعبارات وحدودآنها.

$$j_0(kr)=\frac{\sin kr}{kr}$$

$$j_1(kr)=\frac{\sin kr}{(kr)^2}-\frac{\cos kr}{kr}$$

$$j_2(kr)=\frac{3\sin kr}{(kr)^3}-\frac{3\cos kr}{(kr)^2}-\frac{\sin kr}{kr}$$

$$j_l(kr)\cong\frac{(kr)^l}{1\cdot 3\cdot 5\cdots(2l+1)}\qquad kr\to 0$$

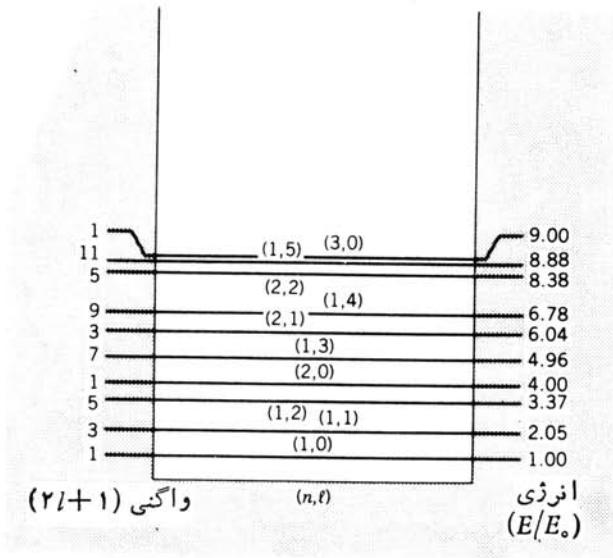
$$j_l(kr)\cong\frac{\sin(kr-l\pi/2)}{kr}\qquad kr\to\infty$$

$$j_l(kr)=\left(-\frac{r}{k}\right)^l\left(\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\right)^l j_0(kr)$$

$x=4.49,\ 7.73,\ 10.90,\ 14.07$. چون می‌دانیم $E=\hbar^2k^2/2m$ است، ازاینجا می‌توانیم مقادیرمجاز انرژی را به‌دست آوریم. با تکرار این عمل برای $l=2$، $l=3$، وغیره، می‌توان طیف حالتهای انرژی را به صورتی کـه در شکل ۱۱.۲ نموده شده است به‌دست آورد. همچنانکه دربررسی چاه دکارتی دیده‌ایم، دراین طیف هم از آن نظم خاص مسئلهٔ یك‌بعدی خبری نیست. نکتهٔ قابل توجه دیگر در این مورد، واگنی ترازهای انرژی است: چون انرژی فقط بـه‌مقدار l بستگی دارد، همهٔ تابع موجهایی‌که از لحاظ مقادیر m_l متفاوت‌اند انرژی یکسان دارند. بدین‌گونه، واگنی ترازی‌که بامقدار $l=2$ مشخص می‌شود پنج‌تـایه است، و تـابع‌مـوجهای ممکن عبارت‌اند از $j_2(kr)Y_{22}(\theta,\phi)$، $j_2(kr)Y_{21}(\theta,\phi)$، $j_2(kr)Y_{20}(\theta,\phi)$، $j_2(kr)Y_{2-1}(\theta,\phi)$، و $j_2(kr)Y_{2-2}(\theta,\phi)$. درواقع، چون m_l محدود به‌مقادیر ۰، ± 1، ± 2، ...، $\pm l$ است، به‌ازای هرمقداری از l دقیقاً تعداد $(2l+1)$ تابع Y_{lm_l} وجود دارد، وبنابراین واگنی هر تراز $(2l+1)$تایه است. (این وضع خیلی شبیه به وضع مدارهای الکترونی دراتمهاست‌که درآن مورد هم پتانسیل ازنوع مرکزی است. در ظرفیت زیرپوستهٔ اتمی هم با عامل $(2l+1)$ روبه‌رو می‌شویم که از واگنی m_l ناشی می‌شود.)

احتمال وجود ذره درحجم dv برابر $|\psi|^2dv$ است‌که درآن جزء حجم dv همان است‌که درمعادلهٔ (۱۷.۲) مطرح شد. نمایش ترسیمی این‌توزیعهای سه بعدی کار دشواری

www.ghaem.info



شکل ۱۱.۲ ترازهای انرژی ذره‌ای که در یك محفظهٔ سه‌بعدی کروی محبوس است. انرژیها برحسب یکای $E_0=\hbar^2\pi^2/2ma^2$ مشخص شده‌اند. فواصل و واگنیهای این طیف را با شکل ۱۰.۲ مقایسه کنید. دراین مورد عدد کوانتومی n مستقیماً از حل معادله حاصل نمی‌شود، بلکه برای شماره‌گذاری حالتهای l مشخص از آن استفاده می‌شود.

است، و ازهمین‌رو اغلب بخشهای شعاعی و زاویه‌ای را به‌طور جداگانه درنظرمی‌گیریم. برای تعیین چگالی احتمال شعاعی که متوسط احتمال وجود ذره را در فاصلهٔ بین r و $r+dr$ وتحت تمام زوایا به‌دست می‌دهد، چگالی احتمال را روی θ و ϕ انتگرال‌گیری می‌کنیم

$$P(r)\,dr=\int|\psi|^2\,dv$$

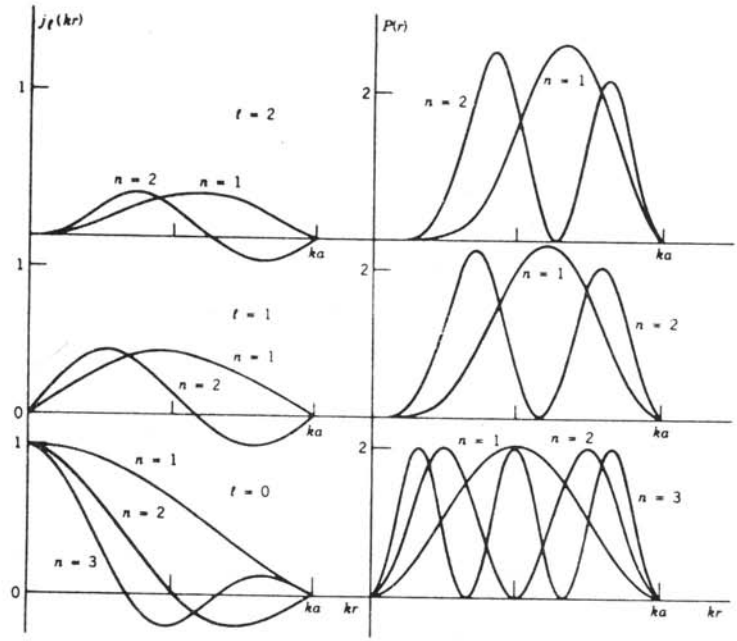
$$=r^2|R(r)|^2\,dr\int\sin\theta\,d\theta\int d\phi|Y_{lm_l}|^2 \qquad (۶۳.۲)$$

چون هماهنگهای کروی Y_{lm_l} بهنجار شده‌اند، مقدار انتگرال برابر ۱ می‌شود و در نتیجه خواهیم داشت

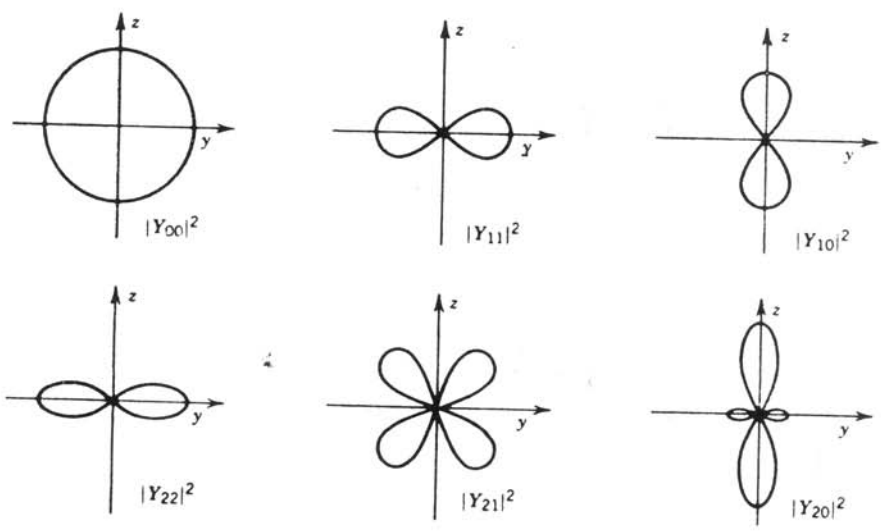
$$P(r)=r^2|R(r)|^2$$

نمونه ازتوزیع احتمال شعاعی را برای چاه نامتناهی درشکل ۱۲.۲ نشان داده‌ایم.

وابستگی زاویه‌ای چگالی احتمال برای هر پتانسیل مرکزی از $|Y_{lm_l}(\theta,\phi)|^2$ به‌دست می‌آید، که چند نمونه ازآن را درشکل ۱۳.۲ نشان داده‌ایم.



شکل ۱۲.۲ درسمت چپ، منحنیهای بهنجارنشدهٔ $j_l(kr)$ را پس‌ازتنظیم براساس $j_l(ka)=0$ برای چند تراز انرژی پایین نشان داده‌ایم. درسمت راست، چگالی احتمال شعاعی r^2R^2 همان توابع سمت چپ را پس از بهنجارش نشان داده‌ایم. توجه کنید که درمبدأ، غیراز j_0، توابع دیگر j_l برابرصفرند، وچگالی‌احتمال هم برای همهٔ آنها برابرصفراست. به این نکته هم توجه کنید که «دافعهٔ گریز از مرکز» همراه باافزایش l، بیشینه‌های $P(r)$ را از مبدأ دورترمی‌کند.



شکل ۱۳.۲ توزیعهای احتمال فضایی حاصل از Y_{lm_l}. با دوران هریك ازشکلها حول محور z می‌توان نمایش سه‌بعدی چگالی احتمال را به‌دست آورد.

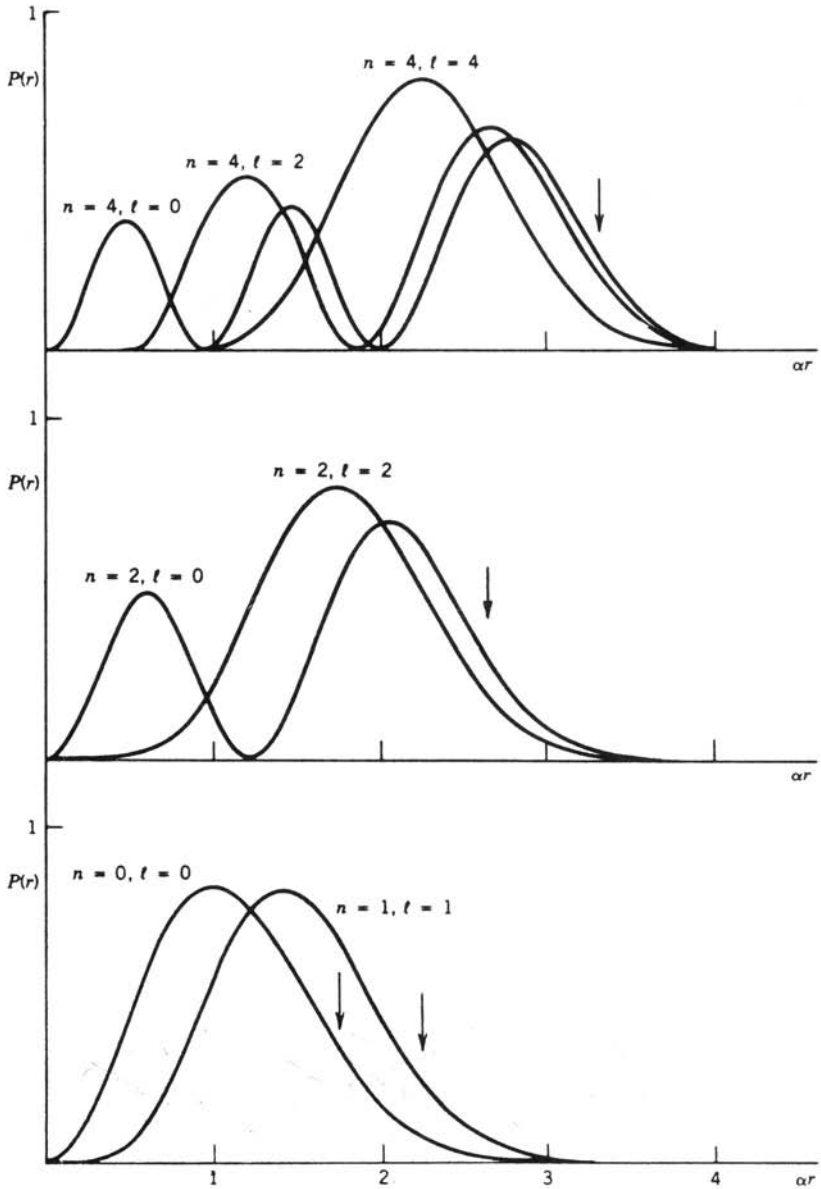
نوسانگر هماهنگ ساده

پتانسیل مرکزی یک نوسانگر را به‌صورت $V(r)=(1/2)kr^2$ درنظر می‌گیریم. جواب بخش زاویه‌ای معادلهٔ شرودینگر برای تمام پتانسیلهای مرکزی بـه صورت $Y_{lm_l}(\theta, \phi)$ است، و بنابراین تمام آنچه دراین موارد لازم داریم حل معادلهٔ شعاعی است. چنانکه در حالت یک‌بعدی دیدیم، جواب را به‌صورت حاصلضرب یک تابع نمایی و یک چندجمله‌ای محدود می‌توان نشان داد. چند نمونه ازجوابها را درجدول ۴.۲، وچگالی احتمال شعاعی آنها را درشکل ۱۴.۲ نشان داده‌ایم. خواص عمومی جوابهای یک‌بعدی را در این مورد

جدول ۴.۲ نمونه‌هایی ازتابع‌موج شعاعی برای نوسانگرهماهنگ‌ساده درحالت‌سه‌بعدی.

n	l	E_n	$R(r)$
۰	۰	$\frac{3}{2}\hbar\omega_0$	$\left(\frac{2\alpha^{3/2}}{\pi^{1/4}}\right)e^{-\alpha^2r^2/2}$
۱	۱	$\frac{5}{2}\hbar\omega_0$	$\left(\frac{2\alpha^{3/2}\sqrt{2}}{\sqrt{3}\pi^{1/4}}\right)(\alpha r)e^{-\alpha^2r^2/2}$
۲	۰	$\frac{7}{2}\hbar\omega_0$	$\left(\frac{2\alpha^{3/2}\sqrt{2}}{\sqrt{3}\pi^{1/4}}\right)\left(\frac{3}{2}-\alpha^2r^2\right)e^{-\alpha^2r^2/2}$
۲	۲	$\frac{7}{2}\hbar\omega_0$	$\left(\frac{4\alpha^{3/2}}{\sqrt{15}\pi^{1/4}}\right)(\alpha^2r^2)e^{-\alpha^2r^2/2}$
۳	۱	$\frac{9}{2}\hbar\omega_0$	$\left(\frac{4\alpha^{3/2}}{\sqrt{15}\pi^{1/4}}\right)\left(\frac{5}{2}\alpha r-\alpha^3r^3\right)e^{-\alpha^2r^2/2}$
۳	۳	$\frac{9}{2}\hbar\omega_0$	$\left(\frac{4\alpha^{3/2}\sqrt{2}}{\sqrt{105}\pi^{1/4}}\right)(\alpha^3r^3)e^{-\alpha^2r^2/2}$
۴	۰	$\frac{11}{2}\hbar\omega_0$	$\left(\frac{4\alpha^{3/2}\sqrt{2}}{\sqrt{15}\pi^{1/4}}\right)\left(\frac{15}{8}-\frac{5}{2}\alpha^2r^2+\frac{1}{2}\alpha^4r^4\right)e^{-\alpha^2r^2/2}$
۴	۲	$\frac{11}{2}\hbar\omega_0$	$\left(\frac{4\alpha^{3/2}\sqrt{2}}{\sqrt{105}\pi^{1/4}}\right)\left(\frac{7}{2}\alpha^2r^2-\alpha^4r^4\right)e^{-\alpha^2r^2/2}$
۴	۴	$\frac{11}{2}\hbar\omega_0$	$\left(\frac{8\alpha^{3/2}}{3\sqrt{105}\pi^{1/4}}\right)\alpha^4r^4e^{-\alpha^2r^2/2}$

به‌شباهت صوری (حاصلضرب تـابع‌نمایی در چندجمله‌ای) بین این جوابها و جوابهای مسئلهٔ یک‌بعدی درجدول ۱.۲ توجه کنید. چندجمله‌ایها را دراین‌حالت چندجمله‌ایهای لژاندرمی‌نامند. بحث تفصیلی این جوابها را در فصل ۷ کتاب **مکانیک کوانتومی**، تألیف جان ل.پاول و برند کریسمن، مرکز نشردانشگاهی (۱۳۶۸) ببینید.



شکل ۱۴.۲ چگالی احتمال شعاعی چند حالت از نوسانگرهماهنگ سه‌بعدی. پیکانهای قائم، نقاط برگشت کلاسیك را نشان می‌دهند. توجه کنید که همانند شکل ۱۲.۲، احتمال $P(r)$ در $r=0$ برابرصفر است (ولی طبق جدول۴.۲، تابع $R(r)$ در $r=0$ برای مورد $l=0$ غیرصفر است). «دافعهٔ گریز از مرکز» به‌ازای مقادیر بزرگ l نیز قابل توجه است.

هم مشاهده می‌کنیم. بدین‌معنی که درناحیهٔ مجاز کلاسیک جواب نوسانی است، و درناحیهٔ ممنوع کلاسیک جواب به‌طورنمایی به‌سوی صفرمیل می‌کند.

ترازهای انرژی به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند

$$E_n = \hbar\omega_0\left(n+\frac{3}{2}\right) \qquad (۶۵.۲)$$

که درآن $n = 0, 1, 2, 3, \ldots$ است. این انرژی بـه مقدار l بستگی ندارد، ولی همهٔ مقادیر l هم مجاز نیستند. محدودیتی که حل ریاضی معادلهٔ شعاعی برمقدار l تحمیل می‌کند بدین شرح است: حداکثرمقدار l برابر n است وبسته به‌اینکه n زوج یا فرد باشد، l هم فقط می‌تواند یا مقادیرزوج ویا مقادیرفرد را دارا شود. برای مثال وقتی‌که $n = 5$ باشد، مقادیر مجاز l عبارت‌اند از ۱، ۳، و ۵، و چنانچه $n = 4$ باشد مقادیرمجاز l برابر ۰، ۲، و ۴ می‌شوند. چون مقدار انرژی به m_l هم بستگی ندارد، بـرای هر مقدار l تعداد $(2l+1)$ واگنی اضافی نیزخواهیم داشت. بدین‌سان، واگنی تراز $n = 5$ به‌صورت

$$[(2\times1+1)+(2\times3+1)+(2\times5+1)] = 21 \text{(تایه)}$$

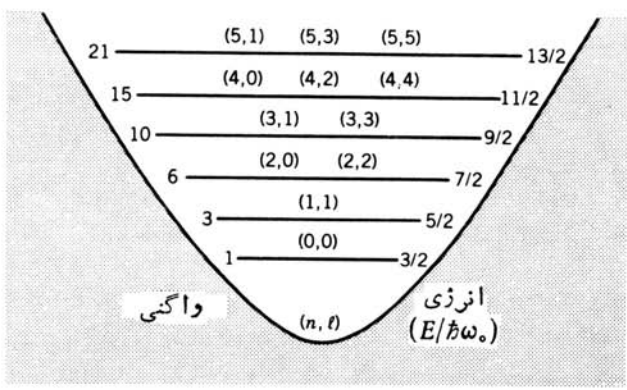
و واگنی تراز $n = 4$ به‌صورت

$$[(2\times0+1)+(2\times2+1)+(2\times4+1)] = 15 \text{(تایه)}$$

خواهد شد. چندنمونه از ترازهای انرژی و واگنی آنهاراکه برابر $\frac{1}{2}(n+1)(n+2)$ است درشکل ۱۵.۲ نشان داده‌ایم.

سد کولنی

برای برهم‌کنش بین بارهای الکتریکی $+Ze$ و $-e$ نیز همانند مورد اتم تك‌الکترون با عـدد اتمی Z، تابع انرژی پتانسیل جاذبهٔ کولنی بـه‌صورت پتانسیل مرکـزی سادهٔ



شکل ۱۵.۲ چند تراز انرژی پایین برای یك ذره در پتانسیل مرکزی نوسانگرسه‌بعدی.

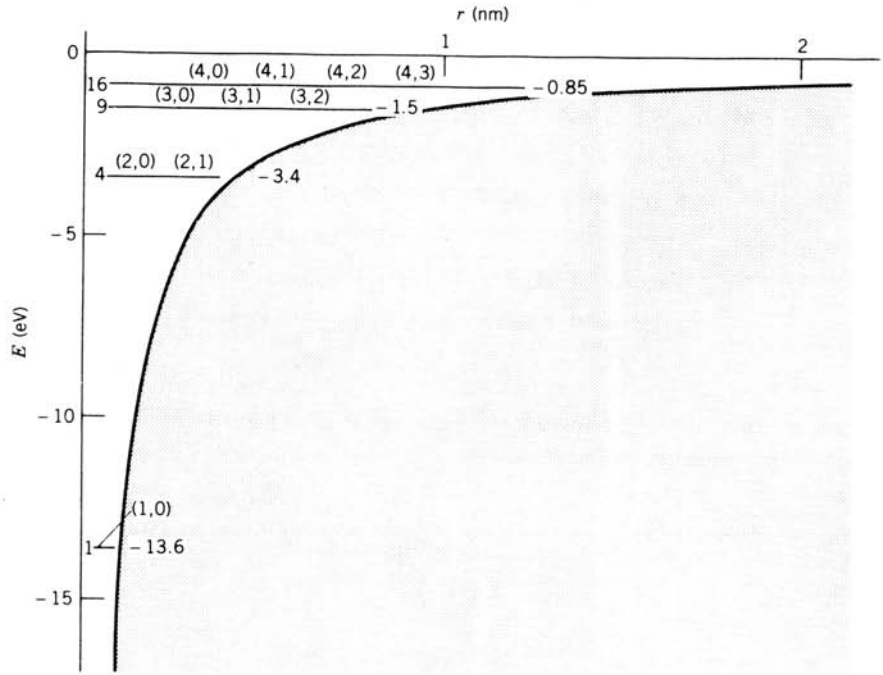
$V(r) = -Ze^2/4\pi\varepsilon_0 r$ نوشته می‌شود. دراینجاهم بخش زاویه‌ای تابع موج به‌صورت $Y_{lm_l}(\theta, \phi)$ به‌دست می‌آید، وبعضی‌از تابع‌موجهای شعاعی $R(r)$ آن درجدول۵.۲نشان داده شده است. ترازهای انرژی‌از $E_n = (-mZ^2e^4/32\pi^2\varepsilon_0^2\hbar^2n^2)$ به‌دست می‌آیند که چند حالت آن را درشکل ۱۶.۲ نشان داده‌ایم. چگالی احتمال شعاعی چند حالت نیز برای نمونه درشکل ۱۷.۲ نشان داده شده است. دراینجا رابطهٔ بین n و l بـا آنچه در مورد پتانسیل نوسانگر دیده‌ایم متفاوت است. دراین مورد، مقادیرمجاز l برای هرتراز n عبارت‌اند از ۰، ۱، ۲، ۳، ...، $(n-1)$. واگنی کل هر تراز انرژی، با احتساب مقادیر مختلف l وتعداد $(2l+1)$ واگنی برای هریك ازآنها، n^2تایه می‌شود.

جدول ۵.۲ چند تابع‌موج شعاعی کولنی (برای اتم هیدروژنی).

n	l	$R(r)$
۱	۰	$2\left(\frac{Z}{a_0}\right)^{3/2} e^{-Zr/a_0}$
۲	۰	$\left(\frac{Z}{2a_0}\right)^{3/2}\left(2-\frac{Zr}{a_0}\right)e^{-Zr/2a_0}$
۲	۱	$3^{-1/2}\left(\frac{Z}{2a_0}\right)^{3/2}\left(\frac{Zr}{a_0}\right)e^{-Zr/2a_0}$
۳	۰	$\frac{2}{3}\left(\frac{Z}{3a_0}\right)^{3/2}\left[3-\frac{2Zr}{a_0}+2\left(\frac{Zr}{3a_0}\right)^2\right]e^{-Zr/3a_0}$
۳	۱	$\left(\frac{4\sqrt{2}}{9}\right)\left(\frac{Z}{3a_0}\right)^{3/2}\left(\frac{Zr}{a_0}\right)\left(1-\frac{Zr}{6a_0}\right)e^{-Zr/3a_0}$
۳	۲	$\left(\frac{2\sqrt{2}}{27\sqrt{5}}\right)\left(\frac{Z}{3a_0}\right)^{3/2}\left(\frac{Zr}{a_0}\right)^2 e^{-Zr/3a_0}$

شکل ریاضی تابع‌موج بـه صورت حاصلضرب چندجمله‌ای وابستهٔ لژاندر در تابع‌نمایی است. a_0 شعاع بور و برابر $4\pi\varepsilon_0\hbar^2/me^2$ است. برای بحث مشروح این جوابها رجوع‌کنید به‌فصل پنجم ازکتاب

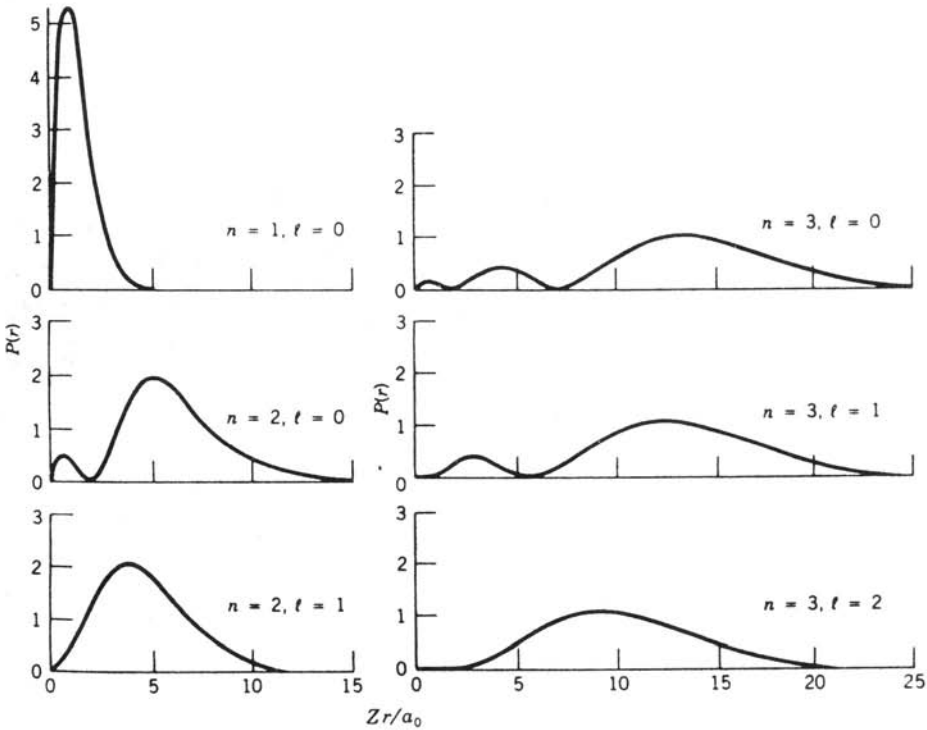
L. Pauling, E. B. Wilson, *Introduction to Quantum Mechanics* (New York: McGraw-Hill, 1935).



شکل ۱۶.۲ ترازهای انرژی پایین دریك پتانسیل کولنی باعدد اتمی $Z=1$ (اتم‌هیدروژن). حالتها با (n, l) مشخص شده‌اند. واگنیها در سمت چپ هر تراز و مقادیرانرژی آنها در سمت راست نوشته شده‌اند.

خلاصه

شیوه‌های ریاضی تعیین معادلهٔ شرودینگر درسه بعد وطرز استفاده از آنها به‌همان صورتی است که قبلا در مورد مسائل یك‌بعدی دیدیم. در محاسبات سه‌بعدی بـا دو ویژگی مهم و جدید روبه‌رو می‌شویم که در محاسبات یك‌بعدی دیـده نمی‌شوند: (۱) ترازهای انرژی واگنی دارنـد، یعنی چند تابع‌موج مختلف ممکن است انرژی یکسان داشته باشند. ایـن واگنیها درمدل پوسته‌ای هسته‌ای همان اثراتی‌را خواهندداشت که درمورد واگنی‌ترازهای انرژی پتانسیل کولنی در مدل پوسته‌ای اتم با آنها روبه‌رو بودیم. به‌کمك این واگنیها، تعداد ذراتی که در هر تراز می‌توان جا داد مشخص می‌شود. (۲) هنگامی که پتانسیل فقط به r (و نه به θ یـا ϕ) بستگی داشته باشد، به هر تابع‌موج می‌توان یك عددکوانتومی معین تکانهٔ زاویه‌ای l نسبت داد. این ویژگیهای جدید متضمن نتایج بسیار مهمی هستند که در بحث مدلهـای هسته‌ای درفصل ۵ آنها را بررسی خواهیم‌کرد. رفتارکوانتومی تکانهٔ زاویه‌ای را دربخش بعدی شرح می‌دهیم.



شکل۱۷.۲ توزیع احتمال شعاعی یك ذره در پتانسیل کولنی (اتم هیدروژن). احتمال در $r=0$ برابر صفر می‌شود، ولی تابع موج $l=0$ در آن نقطه صفر نمی‌شود. این خاصیت بویژه برای پدیده‌هایی که به همپوشی تابع‌موجهای اتم و هسته وابسته‌اند، حائز اهمیت فراوان است. فقط حالتهای $l=0$ است که در این پدیده‌ها (گیراندازی الکترون، ساختار فوق ریز، وغیره) سهم قابل توجه دارد. چرا «دافعهٔ گریز از مرکز» در این مورد ظاهر نمی‌شود؟

۵.۲ نظریهٔ کوانتومی تکانهٔ زاویه‌ای

در جوابهای معادلهٔ شرودینگر در مسائل سه‌بعدی، عدد کوانتومی l نقش برجسته‌ای دارد. برای نمونه، در فیزیك اتمی این عدد تابع موج الکترونهای مختلف را مشخص می‌کند و اطلاعاتی از رفتار فضایی تابع‌موج به‌دست می‌دهد. این عدد کوانتومی تکانهٔ زاویه‌ای در تمام مسائل سه‌بعدی با پتانسیل مرکزی $V=V(r)$ همین نقش را برعهده دارد.

در فیزیك کلاسیك، تکانهٔ زاویه‌ای $\mathbf{l}$ ذره‌ای که با تکانهٔ خطی $\mathbf{p}$ در مکان $\mathbf{r}$ نسبت به یك مبدأ در حرکت است، چنین تعریف می‌شود

$$\mathbf{l}=\mathbf{r}\times\mathbf{p} \qquad (۶۶.۲)$$

درمکانیک کوانتومی، می‌توانیم مقدار انتظاری تکانهٔ زاویه‌ای را با استفاده ازمعادلهٔ(۱۰.۲) به‌دست آوریم. نخست، بزرگی تکانهٔ زاویه‌ای را درنظر می‌گیریم و برای این منظورمقدار $\mathbf{l}^2$ را محاسبه می‌کنیم که آسانترین راه است. چنانکه در بخش ۲.۲ گفتیم، درگام اول باید برای $\mathbf{l}^2$ یك عملگر کوانتوم مکانیکی پیدا کنیم. با جانشین کردن مؤلفه‌های $\mathbf{p}$ با عملگرهای معادل $p_x = -i\hbar\partial/\partial x$ ، $p_y = -i\hbar\partial/\partial y$ ، و $p_z = -i\hbar\partial/\partial z$ ، به‌آسانی می‌توان عملگر موردنظر را به‌دست آورد. از مساوی قراردادن حاصلضربهای برداری، جملاتی به صورت $l_x = yp_z - zp_y$ حاصل می‌شود، و سرانجام از محاسبهٔ $\langle \mathbf{l}^2 \rangle = \langle l_x^2 + l_y^2 + l_z^2 \rangle$ نتیجه‌ای فوق‌العاده ساده به دست می‌آوریم که مستقل از شکل $R(r)$ است

$$\langle \mathbf{l}^2 \rangle = \hbar^2 l(l+1) \qquad (۶۷.۲)$$

هروقت که بامسئله‌ای مقید به‌پتانسیل مرکزی که تابع‌موج آن به‌صورت $R(r)Y_{lm_l}(\theta, \phi)$ باشد سروکار داشته باشیم، بزرگی تکانهٔ زاویه‌ای مقداری است ثابت که ازمعادلهٔ(۶۷.۲) به دست می‌آید. یعنی در موارد پتانسیل مرکزی (همچنانکه در فیزیك کلاسیك دیدیم)، تکانهٔ زاویه‌ای یك مقدار ثابت حرکت است. در فیزیك اتمی، زیرحالتهای مربوط به هر مقدار l را با استفاده از نمادهای طیف‌نمایی مشخص می‌کنیم. در فیزیك هسته‌ای نیز همان نمادها را به کار می‌بریم، مثلا برای نمایش $l = ۰$ از نماد s، برای $l = ۱$ از p، وغیره استفاده می‌کنیم. فهرست این نمادها را درجدول ۶.۲ نشان داده‌ایم.

هنگامی که سعی می‌کنیم جهت $\mathbf{l}$ را پیدا کنیم، با مشکل اصل عدم قطعیت روبه‌رو می‌شویم. بدین‌معنی که بنا برمکانیك کوانتومی، می‌توانیم درهر لحظه فقط یکی از مؤلفه‌های $\mathbf{l}$ را دقیقاً تعیین کنیم. همین که مقدار یکی از این مؤلفه‌ها را به‌دست آوردیم، دو مؤلفهٔ دیگر آن کاملا نامعین می‌شوند. (این نتیجه، محدودیتی بنیادی است که هیچ شگرد و ترفندی هم نمی‌تواند بر آن چیره شود. همان نفس عمل اندازه‌گیری یك مؤلفه است که عدم قطعیت در دومؤلفهٔ دیگر را موجب می‌شود. هنگامی که l_x را اندازه‌گیری می‌کنیم، درمقادیر l_y و l_z باعث ایجاد عدم قطعیت می‌شویم. سپس وقتی که l_y را برای همان سیستم اندازه می‌گیریم، شناسایی قبلی‌مان از l_x اعتبارش را ازدست می‌دهد وعدم‌قطعیت در آن وارد می‌شود.) قرارداد متداول این است که مؤلفهٔ z تکانهٔ زاویه‌ای $\mathbf{l}$ را برای اندازه‌گیری انتخاب می‌کنیم‌و $\langle l_z \rangle$ را به‌شرحی که در بالا گفته‌شد، چنین به‌دست می‌آوریم

جدول ۶.۲ نمادهای طیف‌نمایی.

مقدار l	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶
نماد	s	p	d	f	g	h	i

$$\langle l_z \rangle = \hbar m_l \qquad (۶۸.۲)$$

که در آن $m_l = ۰, \pm ۱, \pm ۲, \cdots, \pm l$ است. توجه کنید که

$$|\langle l_z \rangle| < |\mathbf{l}| = \hbar\sqrt{l(l+۱)}$$

است، یعنی مؤلفهٔ z بردار تکانهٔ زاویه‌ای همیشه از طول بردار کوچکتر است. اگر $|\langle l_z \rangle| = |\mathbf{l}|$ مجاز بود، آنگاه شناسایی دقیق هرسه مؤلفهٔ $\mathbf{l}$ امکان‌پذیر می‌شد (اگر $\mathbf{l}$ در راستای محور z قرار می‌گرفت، مؤلفه‌های l_x و l_y صفر می‌شد). نمایش برداری متداول را برای این عدم قطعیت در شکل ۱۸.۲ نشان داده‌ایم. در حالی که $\mathbf{l}$ با حرکت تقدیمی به‌دور محور z در گردش است، l_z ثابت می‌ماند ولی l_x و l_y همیشه در حال تغییرند.

توصیف کامل حالت الکترون در یك اتم مستلزم یك عدد کوانتومی جدید به‌نام عدد کوانتومی تکانهٔ زاویه‌ای ذاتی یا اسپین است. عدد کوانتومی اسپین برای الکترون برابر $s = ۱/۲$ است. بزرگی اسپین را به همان روش محاسبهٔ تکانهٔ زاویه‌ای می‌توان تعیین کرد (هرچند که این کمیت را نمی‌توان برحسب متغیرهای کلاسیك نمایش داد، چون برای آن هیچ مشابه کلاسیکی سراغ نداریم). پس می‌نویسیم

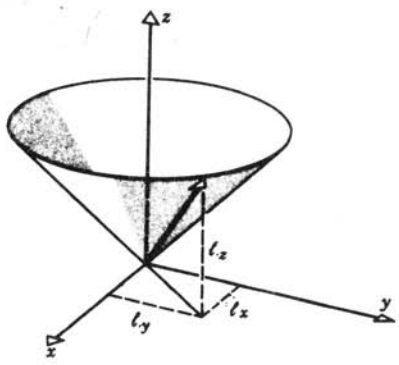
$$\langle \mathbf{s}^۲ \rangle = \hbar^۲ s(s+۱) \qquad (۶۹.۲)$$

$$\langle s_z \rangle = \hbar m_s \qquad \left(m_s = \pm\frac{۱}{۲}\right) \qquad (۷۰.۲)$$

دراغلب موارد آسانتر است که اسپین را به صورت بردار $\mathbf{s}$ با دومؤلفهٔ $\pm(۱/۲)\hbar$ در راستای z درنظر بگیریم.

عدد کوانتومی اسپین نوکلئونها هم مانند الکترونها برابر ۱/۲ است. تکانهٔ زاویه‌ای کل نوکلئونی که با تکانهٔ زاویه‌ای مداری $\mathbf{l}$ و اسپین $\mathbf{s}$ در یك پتانسیل مرکزی در حرکت است، چنین به‌دست می‌آید

$$\mathbf{j} = \mathbf{l} + \mathbf{s} \qquad (۷۱.۲)$$



شکل ۱۸.۲ بردار $\mathbf{l}$ حول محور z به‌سرعت در گردش است. بدین ترتیب مؤلفهٔ l_z ثابت است، ولی مؤلفه‌های l_x و l_y متغیرند.

خواص و رفتار تکانهٔ زاویه‌ای کل $\mathbf{j}$ همانند خواصی است که درمورد $\mathbf{l}$ و $\mathbf{s}$ دیدیم:

$$\langle \mathbf{j}^2 \rangle = \hbar^2 j(j+1) \qquad (۷۲.۲)$$

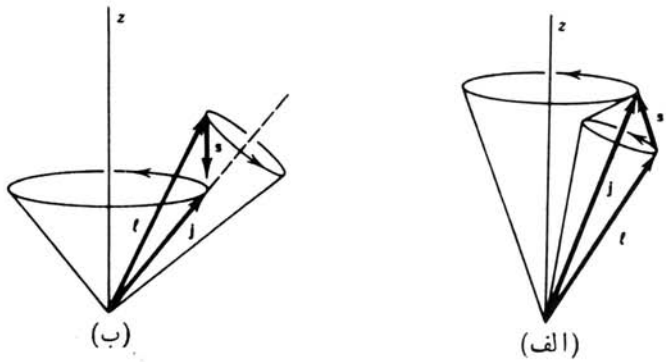
$$\langle j_z \rangle = \langle l_z + s_z \rangle = \hbar m_j \qquad (۷۳.۲)$$

که درآنها $m_j = -j, -j+1, \ldots, j-1, j$ و j عدد کوانتومی تکانهٔ زاویه‌ای کل است. با توجه به‌معادلات (۶۸.۲، ۷۰، و ۷۳) داریم

$$m_j = m_l + m_s = m_l \pm \frac{1}{2} \qquad (۷۴.۲)$$

چون m_l همیشه عددی درست است، m_j عددی نیم‌درست $(\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2, \ldots)$ و بنابراین j هم عددی نیم‌درست خواهد شد. برای جفت‌شدگی برداری معادلهٔ (۷۱.۲) فقط دومقدار j، یعنی $(l+1/2)$ و $(l-1/2)$، متصور است که آنها را درشکل ۱۹.۲ نشان داده‌ایم.

معمولا مقدار j را درنمادگذاری طیف‌نمایی به صورت شاخص زیرنشان می‌دهیم. مثلا برای $l=1$ (حالتهای p) دو مقدار j خواهیم داشت که عبارت‌اند از $l+1/2 = 3/2$ و $l-1/2 = 1/2$. این حالتها را به‌صورت $p_{3/2}$ و $p_{1/2}$ نشان



شکل ۱۹.۲ تکانهٔ زاویه‌ای کل $\mathbf{j}$ ازجفت‌شدگی تکانهٔ زاویه‌ای مداری $\mathbf{l}$ وتکانهٔ زاویه‌ای اسپین $\mathbf{s}$ حاصل می‌شود. (الف) نتیجهٔ جفت‌شدگی $j=l+(1/2)$ است. بردارهای $\mathbf{l}$ و $\mathbf{s}$ وهمین‌طور $\mathbf{j}$ طولهای مشخصی دارند. مجموعهٔ بردارهای $\mathbf{l}$ و $\mathbf{s}$ با حرکت تقدیمی حول $\mathbf{j}$ درگردش است. دراین جفت‌شدگی، مؤلفه‌های l_z و s_z مقادیرمشخصی ندارند. بردار $\mathbf{j}$ با حرکت تقدیمی حول z درگردش است، و بنابراین j_z مقداری مشخص خواهد داشت. (ب) مطالب فوق در مورد جفت‌شدگی $j=l-(1/2)$ نیز صادق است. درتعبیراین شکلها همیشه باید به‌خاطرداشته باشیم که تمام این نمایشهای برداری که ازقواعد مکانیک کوانتومی پیروی می‌کنند، دربهترین حالت نمادین و در بدترین حالت گمراه کننده هستند.

خواهیم‌داد. هنگامی که یك عدد کوانتومی دیگر هم نظیرعدد کوانتومی اصلی n (که شمارهٔ ردیف حالتها را برحسب افزایش انرژی نشان می‌دهد) دراختیار داشته باشیم، حالتهای موردنظر را به‌صورت $2p_{3/2}$، $3p_{3/2}$، وغیره، مشخص خواهیم کرد.

در مورد اتمها، اغلب آسانتر است که الکترونها را در حال حرکت در مدارهای خوش‌تعریف با مقادیر مشخص l و j درنظربگیریم. اما به‌هیچوجه روشن نیست که تصویر مشابهی از نوکلئونهای درون هسته هم قابل استفاده باشد. بنابراین، سودمندی برچسبهای l و j برای نوکلئونها مورد تردید است. در بحث مدل پوسته‌ای هسته درفصل ۵ این موضوع را به‌تفصیل بررسی خواهیم کرد.

۶.۲ پاریته

عمل پاریته در انواع دستگاه مختصات نسبت به مبدأ ایجاد انعکاس می‌کند، یعنی باعث تبدیل $\mathbf{r} \to -\mathbf{r}$ می‌شود. این بدان معنی است که در دستگاه مختصات دکارتی $x \to -x$، $y \to -y$، $z \to -z$، و در دستگاه مختصات کروی $r \to r$، $\theta \to \pi - \theta$، $\phi \to \phi + \pi$ تبدیل می‌شود. اگر سیستمی تحت عمل پاریته بدون تغییر بماند، در این صورت انتظار داریم که هیچ یك ازخواص قابل مشاهدهٔ آن دراثرانعکاس تغییرنکند. چون مقادیری که برای کمیتهای قابل‌مشاهده اندازه‌گیری می‌کنیم به $|\psi|^2$ بستگی دارد، به‌طور منطقی می‌توانیم ادعا کنیم

اگر $V(\mathbf{r}) = V(-\mathbf{r})$ باشد، آنگاه خواهیم داشت $|\psi(\mathbf{r})|^2 = |\psi(-\mathbf{r})|^2$

این ادعا که عکس آن هم درست است، در عرصهٔ فیزیك هسته‌ای دو پیامد بسیار مهم به‌شرح زیردارد:

۱. اگر $|\psi(\mathbf{r})|^2 = |\psi(-\mathbf{r})|^2$ باشد، آنگاه داریم $\psi(-\mathbf{r}) = \pm\psi(\mathbf{r})$. یعنی عمل پاریته برتابع‌موج یکی از این دو اثر را خواهد داشت. حالت $\psi(-\mathbf{r}) = +\psi(\mathbf{r})$ را پاریتهٔ زوج یا مثبت، وحالت $\psi(-\mathbf{r}) = -\psi(\mathbf{r})$ را پاریتهٔ فرد یا منفی می‌گویند. اگر پتانسیل $V(\mathbf{r})$ تحت عمل پاریته بدون تغییر بماند، آنگاه تابع‌موجهای حالت مانا باید دارای یکی‌از دونوع پاریتهٔ فرد یا زوج باشد. تابع‌موجهای با پاریتهٔ آمیخته مجاز نیستند. جوابهای نوسانگر هماهنگ یك‌بعدی را در نظر می‌گیریم. پتانسیل $(1/2)kx^2$ مسلماً تحت عمل پاریتهٔ $x \to -x$ ناوردا می‌ماند. توانهای x در تابع‌موجهایی که درجدول ۱.۲ فهرست شده‌اند، یا فقط فرد است که دراین صورت پاریته فرد می‌شود، یا فقط زوج است که پاریته هم درآنها زوج می‌شود. چندجمله‌ایها هیچگاه به صورت آمیخته‌ای از توانهای فرد و زوج نیستند. جوابهای چاه پتانسیل متناهی را هم در اینجا مورد توجه قرار می‌دهیم. چون این چاه در فاصلهٔ بین $x = +a/2$ و $x = -a/2$ قرار دارد، پتانسیل نسبت به عمل پاریته تقارن دارد:

$V(x)=V(-x)$. بـا توجه به جوابهایی که در شکل ۸.۲ نموده شده است معلـوم می‌شود که در بعضی ازجوابها $\psi(-x)=\psi(x)$ و پاریته زوج است، درحالی که در جوابهای دیگر $\psi(-x)=-\psi(x)$ و پاریته فرد است.

درموارد سه‌بعدی، درنتیجهٔ عمل پاریته بر تابع‌موج Y_{lm_l} فازی به‌صورت $(-1)^l$ به‌دست می‌آید

$$Y_{lm_l}(\pi-\theta,\ \phi+\pi)=(-1)^l Y_{lm_l}(\theta,\ \phi) \qquad (۷۵.۲)$$

بدین ترتیب، پتانسیلهای مرکزی کـه فقط به مقدار $\mathbf{r}$ بستگی دارند تحت تأثیر پاریته ناوردا می‌مانند وپاریتهٔ تابع‌موجهای مربوط به‌آنها ثابت است. پاریتهٔ این‌توابع، در صورت فرد بودن l فرد و درصورت زوج بودن l زوج است.

تابع‌موج سیستمی که‌از تعدادی ذره تشکیل‌شده‌باشد، ازحاصلضرب تابع‌موجهای تك‌تك ذرات آن به‌دست می‌آید. اگرسیستم از تعدادی ذره بـا پاریتهٔ زوج یا تعداد زوجی از ذرات بـا پاریتهٔ فرد تشکیل شده باشد تابع‌موج سیستم زوج خواهد شد، و چنانچه سیستم از تعداد فردی ذره با پاریتهٔ فرد تشکیل شود تابع‌موج آن فرد خواهد بود. بدین ترتیب به هرحالت هسته‌ای می‌توان یك پاریتهٔ مشخص، فرد یا زوج، نسبت داد. معمولا علامت پاریته را همراه با تکانهٔ زاویه‌ای کل حالت موردنظر نشان می‌دهند، مثلا به‌صورت $(5/2)^+$ یا $(3/2)^-$. در فصل ۱۰ طرز تعیین پاریتهٔ حالتها را به‌طور تجربی خواهیم دید.

۲. دومین پیامد از قاعدهٔ معکوس پاریته حاصل می‌شود. اگر بـا سیستمی روبه‌رو شویم که درآن $|\psi(\mathbf{r})|^2\neq|\psi(-\mathbf{r})|^2$ باشد، آنگاه باید نتیجه بگیریم که $V(\mathbf{r})\neq V(-\mathbf{r})$ است. یعنی دراین‌صورت، سیستم‌نسبت به‌پاریته ناوردا نیست. درسال۱۹۵۷ فرایندهای خاصی (ازنوع واپاشیهای بتازا) کشف شدکه مقادیر اندازه‌گیری‌شدهٔ کمیتهای قابل مشاهده درآنها از تقارن پاریته برخوردار نبود. از سوی دیگر، هنوز هیچ شاهدی در دست نیست که برهم‌کنش هسته‌ای قوی یا برهم‌کنش الکترومغناطیسی با نقض پاریته همـراه باشد. اثبات نقض پاریته در واپاشی بتازا یکـی از هیجان‌انگیزترین کشفهای فیزیك هسته‌ای بوده است کـه در پیدایش نظریات برهم‌کنشهای بنیادی بیـن ذرات، تأثیری عمیق واساسی داشته‌است. آزمایش‌نقض پاریته را دربخش۹.۹ شرح داده‌ایم.

۷.۲ آمارکوانتومی

هنگامی که‌از گردهمایی تعدادی ذره یك سیستم‌کوانتومی بزرگتر به‌وجود می‌آوریم (مانند مورد نوکلئونهای موجود دریك هسته، الکترونهای موجود دریك اتم، واتمهای موجود در یك مولکول)، درصورتی که ذرات سیستم از همدیگر تمایزناپذیر باشند، با اثرکوانتومی جدیدی روبه‌رو خواهیم شد. اجازه دهیدکه یك مورد دو ذره‌ای، مثلا دو الکترون موجود

در اتم هلیم، را درنظر بگیریم. فرض کنید تابع‌موج الکترونی که در $\mathbf{r}_1$ قراردارد ψ_A، و تابع‌موج الکترونی که در $\mathbf{r}_2$ قرار دارد ψ_B باشد. تابع‌موج سیستم متشکل از این دو ذره از حاصلضرب همین مؤلفه‌های تابع‌موج، به‌صورت $\psi=\psi_A(\mathbf{r}_1)\psi_B(\mathbf{r}_2)$، به‌دست می‌آید. حال اگر این دو الکترون را با هم تعویض کنیم، تابع‌موج جدید به صورت $\psi'=\psi_B(\mathbf{r}_1)\psi_A(\mathbf{r}_2)$ درمی‌آید. آیا آزمایشی وجود دارد که تحقق یا عدم تحقق این تعویض را آشکارسازد؟

اگر الکترونها براستی تمایزناپذیر باشند، پاسخ این پرسش باید منفی باشد. هیچ طرح قابل مشاهده‌ای برای متمایز کردن «الکترون اول» از «الکترون دوم» وجود ندارد. بدین ترتیب، نتیجه‌ای که به دست می‌آید تا حدودی شبیه به نتیجهٔ عمل پاریته است: چگالیهای احتمال نسبت به‌تعویض ذرات یکسان باید ناوردا باشند. یعنی حداکثر تفاوتی که تابع‌موج تعویضی ψ_{21} با تابع‌موج اولیهٔ ψ_{12} دارد، فقط در علامت جبری است. بنابراین‌دراینجا دوحالت پیش‌می‌آید. اگردرتعویض ذرات علامت تغییرنکند، با تابع‌موج متقارن سروکارداریم که دراین صورت $\psi_{12}=\psi_{21}$ می‌شود. اگردرتعویض ذرات علامت تغییر کند، تابع‌موج پاد متقارن است و دراین صورت داریم $\psi_{21}=-\psi_{12}$. تمام تابع‌موجهای ترکیبی برای ذرات یکسان باید یا کاملا متقارن یا کاملا پاد متقارن باشند. تابع‌موجهای با «تقارن آمیخته» مجاز نیستند.

هنگامی که برای تأیید این ادعا به آزمایشگاه می‌رویم و به‌آزمایش دست می‌زنیم، به‌رده‌بندی دیگری می‌رسیم که تاکنون استثنایی درآن دیده نشده است: تابع‌موج ترکیبی تمام ذراتی که اسپین درست (۰، ۱، ۲، ...) دارند متقارن است، درحالی که تابع ترکیبی تمام ذرات با اسپین نیم‌درست (۱/۲، ۳/۲، ۵/۲، ...) پادمتقارن است.

تابعهای دو ذره‌ای ψ و ψ' که دربالا ذکرشدند نه متقارن‌اند ونه پادمتقارن (یعنی ψ' هیچ شباهتی با ψ یا $-\psi$ ندارد)، و از این‌رو برای نمایش تابع‌موجهای ترکیبی مناسب نیستند. درعوض، تابع‌موج ترکیبی زیررا درنظر می‌گیریم

$$\psi_{12}=\frac{1}{\sqrt{2}}[\psi_A(\mathbf{r}_1)\psi_B(\mathbf{r}_2)\pm\psi_B(\mathbf{r}_1)\psi_A(\mathbf{r}_2)] \qquad (۷۶.۲)$$

اگر علامت مثبت را اختیارکنیم، آنگاه تابع‌موج ترکیبی نسبت به تعویض ذرات متقارن است. چنانچه علامت منفی را اختیارکنیم، نتیجه یك تابع‌موج پاد متقارن خواهد بود. ضریب $1/\sqrt{2}$ برای بهنجارکردن موج ترکیبی در نظرگرفته شده است (فرض این است که هریك از مؤلفه‌های موج از قبل بهنجار بوده‌اند).

هنگامی که با حالتهای کوانتومی یکسان A و B سروکار داشته باشیم، با وضعیتی خاص روبه‌رو می‌شویم. (می‌توان A و B را به صورت مجموعه‌ای از اعدادکوانتومی در نظرگرفت.) هرگاه A و B یکسان باشند، تابع موج ترکیبی پادمتقارن آنها برابرصفر می‌شود، ودرنتیجه چگالی‌احتمال آن همواره برابرصفر است. احتمال وجود دو ذرهٔ یکسان

که اسپین نیم‌درست دارند، در حالت کوانتومی یکسان همیشه باید برابر صفر شود. البته این همان اصل طرد پاؤلی است که وضعیت خاص پرشدن زیرپوسته‌های اتمی را تعیین می‌کند. مبنای ریاضی اصل پاؤلی همین صفرشدن تابع‌موج پادمتقارن است. در ترکیب متقارن تابع‌موج برابرصفر نمی‌شود، بنابراین برای ذرات یکسانی که اسپین درست دارند هیچ مانعی نیست که حالتهای کوانتومی یکسان داشته باشند.

درقسمتهای آیندهٔ این کتاب، اصل پاؤلی را برای نوکلئونها به‌کار می‌بریم و اهمیت آن را برای درك مدل پوسته‌ای هسته نشان می‌دهیم. همچنین برای کوآرکها که اجزای سازندهٔ نوکلئونها و دیگر ذرات مشابه هستند، چند تابع‌موج پادمتقارن ساده در نظر می‌گیریم.

۸.۲ گذار بین حالتها

حالتی که‌حقیقتاً مانا باشد، برای‌همیشه‌پایدار می‌ماند. مقادیر انتظاری کمیتهای قابل‌مشاهده‌ای که با استفاده از تابع‌موج حالت مانا محاسبه می‌شوند، درطی زمان تغییر نمی‌کنند. بویژه، مقدار انتظاری انرژی درطی زمان ثابت می‌ماند. انرژی حالت مانا دقیقاً معلوم است، و عدم قطعیت آن

$$\Delta E=\sqrt{\langle E^{۲}\rangle-\langle E\rangle^{۲}} \qquad (۷۷.۲)$$

برابرصفرمی‌شود، زیرا در این حالت داریم $\langle E^{۲}\rangle=\langle E\rangle^{۲}$. پس بنابررابطهٔ هایزنبرگ، $\Delta E\,\Delta t\geqslant\hbar/۲$، داریم $\Delta t=\infty$. از این‌رو، حالتی که انرژی دقیقاً مشخصی دارد برای همیشه پایدار است، یعنی طول عمرش در برابر واپاشی (به حالتهای پایینتر) بینهایت است.

اکنون فرض می‌کنیم که براین‌سیستم، علاوه‌بر پتانسیل اولیهٔ V، یك پتانسیل پریشندهٔ ضعیف V' هم وارد شود. درغیاب پتانسیل V'، می‌توانیم معادلهٔ شرودینگررا برای‌پتانسیل V حل کنیم و مجموعه‌ای از ویژه‌ـحالتها ψ_n و ویژه‌ـمقدارهای E_n را به‌دست آوریم. حال اگر پتانسیل اضافی وضعیف V' را هم درنظربگیریم، معلوم می‌شودکه حالتها تقریباً، اما نه دقیقاً، همان ویژه‌ـحالتهای قبلی ψ_n هستندکه از پتانسیل V حاصل شده‌اند. این پتانسیل اضافی ضعیف موجب می‌شودکه سیستم بتواند بین ویژه‌ـحالتهای «تقریبی» ψ_n در نوسان باشد. به‌همین ترتیب است که اتم هیدروژن، تحت برهم‌کنش یك میدان ضعیف الکترومغناطیسی می‌تواندگذارهایی مثلا به‌صورت $۱s \rightarrow ۲p$ یا $۲p \rightarrow ۳d$داشته‌باشد. دراینجا، ترازهای مختلف را به‌صورتی توصیف می‌کنیم که گویی همان ویژه‌ـحالتهای سیستم هستند.

با وجود اینکه سیستم می‌تواند از یك حالت انرژی اولیهٔ E_i به‌حالت نهایی E_f گذرکند، انرژی آن باید پایسته بماند. بنابراین انرژی‌کل واپاشی باید ثابت باشد.

چنانچه انرژی حالت نهایی E_f از انرژی E_i پایینتر باشد، اختلاف انرژی $(E_i - E_f)$ در واپاشی باید به‌صورت تابش گسیل شود. درگذارهای بین حالتهای برانگیختهٔ اتمی یا هسته‌ای، اختلاف انرژی $(E_i - E_f)$ به‌صورت فوتون درمی‌آید.

عدم قطعیت درانرژی حالت نامانا برابربا یك مقدارغیرصفر ΔE است. این کمیت را اغلب «پهنای» آن حالت می‌نامند و معمولا بـا Γ نمایش می‌دهند. طول عمر τ حالت نامانا (یا متوسط زمان دوام آن پیش ازگذار به‌حالت پایینتر) را از طریق وابستگی آن با زمان Δt، که درفاصلهٔ آن می‌توانیم انرژی این حالت را اندازه گیری کنیم، و با استفاده از اصل عدم قطعیت می‌توان براوردکرد. بدین ترتیب داریم $\tau \simeq \hbar/\Gamma$. احتمال‌واپاشی یا احتمال گذار λ (که برابرتعداد واپاشی در واحد زمان است) با عمرمیانگین τ نسبت معکوس دارد

$$\lambda = \frac{1}{\tau} \qquad (۷۸.۲)$$

دستیابی به روشی که بـا کاربرد آن بتوانیم λ یا τ را مستقیماً ازتـابع موج هسته محاسبه‌کنیم، بسیارمفید خواهد بود. مـا با داشتن اطلاعات زیرمی‌توانیم این‌کار را انجام دهیم: (۱) تابع‌موجهای حالتهای اولیه ونهایی، ψ_i و ψ_f، راکه به تقریب همان حالتهای مانای پتانسیل V هستند، باید دراختیار داشته باشیم؛ (۲) برهم‌کنش V' کـه باعث‌گذار بین این‌حالتها می‌شود باید معلوم باشد. محاسبهٔ λ مفصلتر ازآن است که آن را دراین‌کتاب بررسی کنیم، ولی در هرکتاب درسی مکانیك‌کوانتومی پیشرفته می‌توان آن را یافت. مـا دراینجا، صرفاً نتیجهٔ محاسبه راکه قاعدهٔ طلایی فرمی نامیده می‌شود می‌آوریم

$$\lambda = \frac{2\pi}{\hbar} |V'_{fi}|^2 \rho(E_f) \qquad (۷۹.۲)$$

کمیت V'_{fi} به‌شکل یك مقدار انتظاری است

$$V'_{fi} = \int \psi_f^* V' \psi_i dv \qquad (۸۰.۲)$$

دراینجا هم باید به ترتیب حالتهای f و i درانتگرال توجه داشته باشیم. انتگرال V'_{fi} را **گاهی جزء ماتریسی عملگرگـذار** V' می‌گویند. این اصطلاح بـه صورتبندی دیگری از مکانیك‌کوانتومی مربوط‌می‌شود که به‌جای معادلهٔ‌دیفرانسیل برماتریس‌مبتنی‌است. مخصوصاً ایـن نکته را باید در نظرداشت‌کـه احتمال واپاشی با استفاده **از مجـذور جزء ماتریس** گذار به‌دست می‌آید.

کمیت $\rho(E_f)$ را چگالی حالتهای نهایی می‌گویندکه منظورازآن، تعدادحالتهای موجود درفاصلهٔ واحد انرژی درانرژی E_f است. دلیل استفاده از این مفهوم به‌این شرح

است: احتمال واپاشی وقتی که حالت نهایی E_f به‌صورت یك تك حالت منزوی باشد، نسبت به‌وقتی که تعداد بسیار زیادی حالت نهایی در یك نوار باریك در نزدیکی E_f متمرکز شود، خیلی کمتر است. در صورتی که چگالی حالتها در نزدیکی E_f زیاد باشد، حالتهای نهایی ممکن برای گذار فراوانترو درنتیجه احتمال گذار هم بیشترخواهد شد. چگالی حالتهای نهایی را براساس نوع واپاشی مورد نظر باید محاسبه کرد. هنگام بحث دربارهٔ سطح مقطعهای واپاشی بتازا، واپاشی گامازا، و پراکندگی، نمونه‌هایی از این مسئله را بررسی خواهیم کرد.

مراجع مطالعات تکمیلی

کتابهای فیزیك جدید زیر که در سطحی مقدماتی تهیه شده‌اند، زمینهٔ لازم را برای مطالعهٔ مکانیك کوانتومی فراهم می‌آورند:

A. Beiser, *Concepts of Modern Physics*, 3rd Ed. (New York: McGraw-Hill, 1981),

K. S. Krane, *Modern Physics* (New York: Wiley, 1983),

P. A. Tipler, *Modern Physics* (New York: Worth, 1978),

ریچارد وایدنر و رابرت سلز، مبانی فیزیك نوین (مرکز نشردانشگاهی، ۱۳۶۵).

مراجع مکانیك کوانتومی درسطح کتاب حاضرعبارت‌اند از

R. Eisberg and R. Resnick, *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*, 2nd ed. (New York: Wiley, 1985),

ترجمهٔ فارسی نیمهٔ اول این کتاب با عنوان فیزیك کوانتومی جلد اول، در سال ۱۳۶۲ توسط مرکز نشردانشگاهی منتشرشده است.ـو.

A. P. French and E. F. Taylor, *An Introduction to Quantum Physics* (New York: Norton, 1978),

R. B. Leighton, *Principles of Modern Physics* (New York: McGraw-Hill, 1969),

D. S. Saxon. *Elementary Quantum Mechanics* (San Francisco: Holden-Day, 1968).

کتابهای مکانیك کوانتومی پیشرفته که برای بحث تفصیلی مطالب مطرح شده دراین کتاب می‌توان بدانها مراجعه کرد، عبارت‌اند از:

C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, and F. Laloë, *Quantum Mechanics* (New York: Wiley-Interscience, 1977).

بخشی ازترجمهٔ فارسی این کتاب تحت عنوان مکانیك کوانتومی جلد اول، درسال ۱۳۶۵ توسط مرکز نشردانشگاهی منتشرشده است.ـو.

D. Park, *Introduction to the Quantum Theory*, 2nd ed. (New York: McGraw-Hill, 1974),

E. Merzbacher, *Quantum Mechanics*, 2nd ed. (New York: Wiley 1970).

مسائل

۱. معادلهٔ (۳۷.۲) را محاسبه کنید ومنحنی ضریب عبور را برحسب انرژی ذرهٔ فرودی E رسم کنید. دربارهٔ چگونگی تغییرات T بحث کنید.

۲. معادلهٔ (۳۹.۲) را محاسبه کنید ومنحنی ضریب عبور را برحسب E رسم کنید.

۳. معادلهٔ شرودینگر را با پتانسیل زیر حل کنید:

$$\begin{aligned} V(x) &= \infty & x &< 0 \\ &= -V_0 & 0 &< x < a \\ &= 0 & x &> a \end{aligned}$$

دراینجا V_0 مثبت است و می‌خواهیم جوابها را در انرژیهای $E > 0$ تعیین کنیم. همهٔ ضرایب نامعین را برحسب یك ضریب منفرد به دست آورید، ولی لازم نیست که تابع‌موج را بهنجار کنید. فرض کنید که ذرات از $x = -\infty$ تابیده می‌شوند.

۴. تعداد حالتهای مقید وانرژی آنهارا درچاه مربعی یك‌بعدی متناهی، هنگامی که $P = 10$ است، تعیین کنید.

۵. جواب نوسانگر «نیم» هماهنگ زیر را پیدا کنید

$$\begin{aligned} V(x) &= \infty & x &< 0 \\ &= \frac{1}{2}kx^2 & x &> 0 \end{aligned}$$

تابع‌موجها و مقادیر انرژی این نوسانگر را با نوسانگر تمام هماهنگ مقایسه کنید. چرا در این مسئله، تعدادی از جوابهای نوسانگر کامل را مشاهده می‌کنیم و تعدادی را نمی‌یابیم؟

۶. برای حالت پایه و دو حالت برانگیختهٔ اول در نوسانگرهماهنگ سادهٔ یك بعدی، احتمال وجود ذره را درخارج ازنقاط بازگشت کلاسیك پیدا کنید.

۷. (الف) مقادیر $\langle x \rangle$ و $\langle x^2 \rangle$ را برای نوسانگرهماهنگ سادهٔ یك‌بعدی تعیین کنید.

(ب) مقدار $\Delta x = [\langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2]^{1/2}$ را دراین مسئله پیدا کنید.

(ج) بدون هیچگونه محاسبهٔ اضافی، مقادیر $\langle p_x \rangle$ و $\langle p_x^2 \rangle$ رابه‌دست آورید. (راهنمایی: مقدار $\langle p_x^2/2m \rangle$ را تعیین کنید.)

(د) مقدار Δp_x وحاصلضرب $\Delta x \cdot \Delta p_x$ را به دست آورید. چرا بسته‌موجی به این

شکل را (که شکل گاؤسی نامیده می‌شود) بسته‌موجی با «حداقل عدم‌قطعیت» می‌دانند؟

۸. (الف) تابع‌موجها و ترازهای انرژی ذره‌ای را که در یك جعبهٔ مربع ـ مستطیل دو بعدی محبوس است، پیدا کنید. پتانسیل ذره را به‌صورت زیر در نظر بگیرید

$$V(x, y) = 0 \qquad -a \leqslant x \leqslant +a, \ -b \leqslant y \leqslant +b$$
$$= \infty \qquad |x| > a, \ |y| > b$$

(ب) نموداری مشابه شکل ۱۰.۲ رسم کنید کـه ترازها و واگنیها را برای موارد $b = a$ و $b = 2a$ نشان دهد.

۹. شکل ۱۰.۲ را تا حد $50E_0$ ادامه دهید.

۱۰. شکل ۱۱.۲ را تا حد $20E_0$ ادامه دهید.

۱۱. برای حل معادلهٔ (۵۴.۲)، جداسازی مورد نیاز را انجام دهید.

۱۲. نشان دهید که چهار تابع‌موج شعاعی اول درجدول ۴.۲، جوابهای معادلهٔ شرودینگر باهمان مقادیر انرژی هستند، و بهنجار بودن آنها را نیز تحقیق کنید.

۱۳. جوابهای چاه مربعی نامتناهی یك‌بعدی را وقتی که گسترهٔ پتانسیل، به‌جای از ۰ تـا $+a$، از $-a/2$ تـا $+a/2$ باشد، پیدا کنید. آیـا این پتانسیل نسبت به پاریته ناورداست؟ آیـا تابع‌موج نسبت به‌پاریته ناورداست؟ دربارهٔ انتساب پاریتهٔ فرد و زوج به‌این جوابها بحث کنید.

۱۴. زاویهٔ بین بـردار تکانهٔ زاویه‌ای $\mathbf{l}$ ومحور z را، وقتی که $l = 3$ است، برای تمـام سمتگیریهای ممکن پیدا کنید.

۱۵. (الف) مقادیر ممکن j را برای حالتهای $\mathbf{f}$ پیدا کنید.

(ب) مقادیر متناظر m_j را پیدا کنید.

(ج) تعداد کل حالتهای m_j را پیدا کنید.

(د) اگر به‌جای m_j از m_l و m_s استفاده می‌کردیم، تعداد حالتها چقدر می‌شد؟

۱۶. یك تابع موج ترکیبی معرف اسپین کل S برای مجموعه‌ای سه الکترونی را می‌توان به‌صورت $\psi = \psi_1(m_s)\psi_2(m_s)\psi_3(m_s)$ نشان داد که در آن برای هر الکترون با اسپین ۱/۲ داریم $m_s = \pm 1/2$. (الف) فهرستی از تمام تابع‌موجهای ممکن و تصاویر اسپین کل آنها M_S تهیه کنید. (ب) نشان دهید که تعداد مقادیر M_S با تعداد مقادیر مختلف اسپین کل S برابر است. (بعضی از مقادیر S ممکن است بیش از یکبار ظاهر شوند.) (ج) با رسم نمودارهای برداری ساده از جفت شدگیهای مختلف $\mathbf{s}_1$، $\mathbf{s}_2$، و $\mathbf{s}_3$ نشان دهید کـه می‌توان به‌تعداد S و مقادیر آنها دست یافت. (راهنمایی: نخست دوتا از اسپینها را با هم جفت کنید، و سپس جفت‌شدگی اسپین سوم را با برایندهای دو اسپین اول درنظر بگیرید.) (د) درجفت‌شدگی چهار الکترون، مقادیر ممکن S و چندتایگی آنها را به دست آورید، و نشان دهید که تعداد حالتهای M_S با آنچه از فهرست تابع‌موجهای ممکن به‌دست می‌آید سازگاری دارد.

۳

خواص هسته‌ها

هسته هم مانند بسیاری از سیستمهای پیرو قوانین مکانیك کوانتومی، جسمی پیچیده و اسرارآمیز است که توصیف رفتار و خواص آن خیلی دشوارتر از اجسام ماکروسکوپی است. مثلا توصیف کامل یك هستهٔ میان ـ وزن ۵۰ نوکلئونی، برحسب کلیهٔ برهم‌کنشهای بین نوکلئونهای موجود در هسته، مستلزم تعداد !۵۰ عبارت یا درحدود $۱۰^{۶۴}$ جمله است! بنابراین ما باید رهیافتی متفاوت در پیش بگیریم و سعی کنیم که مشخصات کلی هرسیستم هسته‌ای را به عنوان یك واحد جداگانه شناسایی کنیم. اکنون باید پرسید که **آیا خواصی** فیزیکی سراغ داریم که بااستفاده ازآنها بتوانیم توصیف کاملی ازهرهسته به‌دست دهیم؟

هسته‌ها را به کمك تعدادی از پارامترهای هسته‌ای تا حد قابل توجهی می‌توان توصیف کرد. این پارامترها عبارت‌اند از: بار الکتریکی، شعاع، جرم، انرژی بستگی، تکانهٔ زاویه‌ای، پاریته، گشتاور دوقطبی مغناطیسی، گشتاور چارقطبی الکتریکی، و انرژی حالتهای برانگیخته. اینها خواص استاتیکی هسته‌ها هستندکه درهمین فصل آنها را بررسی می‌کنیم. درفصلهای بعدی خواص دینامیکی هسته‌ها، ازجمله احتمال واپاشی و احتمال واکنش هسته‌ها را بررسی خواهیم کرد. درك خواص استاتیکی و دینامیکی و تفسیرآنها برپایهٔ برهم‌کنش بین تك‌تك نوکلئونهای موجود در هسته، وظیفه‌ای بس خطیراست که هر متخصص فیزیك هسته‌ای باید با آن دست و پنجه نرم کند.

۱.۳ شعاع هسته

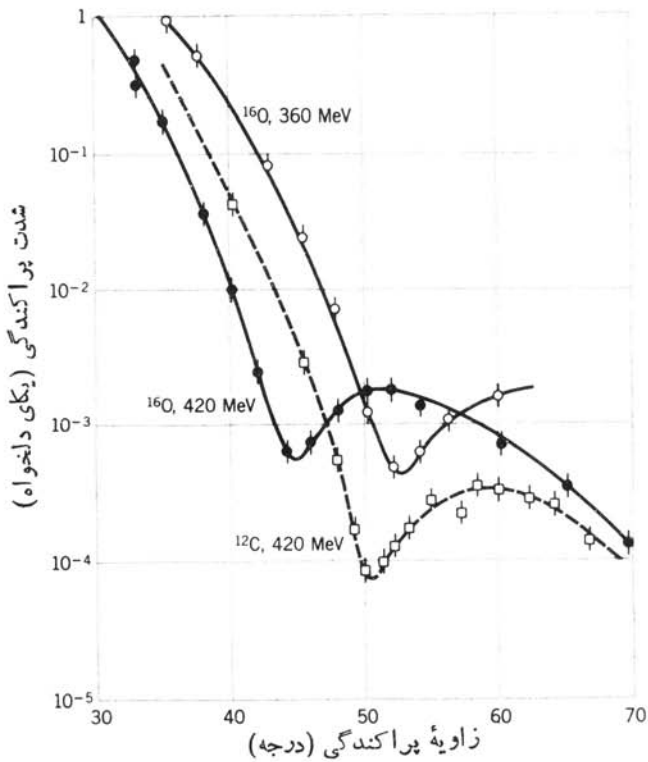
شعاع هسته هم مانند شعاع اتم، کمیتی دقیقاً تعریف شده نیست. هیچیك از این دو (یعنی اتم و هسته) را نمی‌توان به‌صورت کره‌هایی جامد با مرزهای مشخص تصور کرد. در هر دومورد، پتانسیل کولنی که عامل پیوند اتمی و توزیع بارالکترونهاست تا بینهایت ادامه دارد، هرچند که مقدار آن در فواصل دورتراز شعاع اتمی (10^{-10}m) فوق‌العاده ناچیز است. چیزی که در اینجا نیاز داریم این است که با به‌دست دادن یك «تعریف عملیاتی» مقصودمان را از شعاع اتم روشن کنیم. برای نمونه، می‌توانیم شعاع اتم را به صورت مقدارمتوسط بزرگترین شعاع حالتهای الکترونی مختلف اتم تعریف کنیم. اما اندازه‌گیری چنین شعاعی فوق‌العاده دشوار است و به‌همین دلیل از تعاریفی عملیتر، مانند فاصلهٔ بین اتمها دریك ترکیب یونی از اتمهای مورد نظر، استفاده می‌شود. این تعریف نیز مشکلاتی دارد: وقتی که اتم تحت بررسی را در ترکیبهای مختلف یا درحالتهای ظرفیتی مختلف در نظرمی‌گیریم، شعاعهای متفاوتی برای آن به‌دست می‌آوریم.

وضع هسته‌ها، ازجهاتی بهتر و ازجهات دیگری بدتراست. چنانکه بزودی خواهیم دید، وضعیت بستگی فضایی چگالی نوکلئونها و پتانسیل هسته‌ای مشابه یکدیگراست، بدین‌معنی که چگالی و پتانسیل تافواصل کوتاهی توزیع نسبتاً ثابت دارند وآنگاه بسرعت به‌صفرمیل می‌کنند. بنابراین تا حدودی طبیعی است که شکل هسته را با دو پارامترمشخص کنیم: شعاع میانگین که نشانگر فاصله‌ای از مرکز هسته است که چگالی نوکلئونی درآن به نصف مقدار مرکزی آن کاهش می‌یابد، و «ضخامت پوست» که در طی آن چگالی نوکلئونی ازمقدار نزدیك به‌حداکثر به‌مقدار نزدیك به‌حداقل کاهش می‌یابد. (دربخش ۵ همین‌فصل، پارامترسومی را هم معرفی خواهیم کرد که برای شناسایی هسته‌های غیرکروی لازم می‌شود.)

مسائلی که در اینجا باآنها روبه‌رو می‌شویم، به‌تعیین دقیق نوع کمیتی که با توزیع موردنظر توصیف می‌شود مربوط است. مثلا شعاعی که اندازه‌گیری می‌کنیم، به‌نوع آزمایشی که برای تعیین شکل‌هسته انجام می‌دهیم بستگی دارد. دربعضی آزمایشها نظیرپراکندگی الکترونهای پرانرژی، پرتوهای‌ایکس موئونی، انتقال **ایزوتوپی پرتوایکس وتابش‌اپتیکی**، و اختلاف انرژی هسته‌های آینه‌ای، برهم‌کنش کولنی بین یك ذرهٔ باردار و هسته را اندازه‌گیری می‌کنیم. پس کمیت مورد اندازه‌گیری دراین آزمایشها، توزیع بار هسته‌ای است (این‌توزیع عمدتاً توزیع پروتونها و اندکی هم‌توزیع نوترونها را، به‌خاطرساختار داخلی‌شان، شامل می‌شود). در آزمایشهای دیگر نظیر پراکندگی رادرفورد، واپاشی آلفازا، و پرتوهای ایکس پیونی، برهم‌کنش هسته‌ای قوی بین ذرات موجود در هسته اندازه‌گیری می‌شود، و توزیع تعیین شده توزیع نوکلئونهاست که **توزیع مادهٔ هسته‌ای** نامیده می‌شود.

توزیع بار هسته‌ای

روش معمولی تعیین اندازه وشکل جسم، بررسی تابش پراکنده شده توسط آن جسم است (و این درست همان کاری است که در نگاه‌کردن به یك جسم یا عکسبرداری از آن انجام می‌دهیم). برای اینکه بتوانیم جسم و جزئیات آن را ببینیم باید طول‌موج تابش مورد استفاده از ابعاد جسم کوچکتر باشد، چه درغیراین صورت اثرات پراش تمام یا بخشی از تصویرجسم را محو خواهد کرد. تابش مورد نیاز برای هسته‌هایی به‌ابعاد حدود ۱۰ fm باید دارای طول موج $\lambda \lesssim 10$ fm یا تکانهٔ $p \gtrsim 100$ MeV/c باشد. باریکه‌های الکترونی با انرژی ۱۰۰ MeV تا ۱ GeV را با استفاده از شتابدهنده‌های پرانرژی نظیر شتابدهندهٔ خطی استانفورد می‌توان تولید کرد، و بررسی و تحلیل آنها نیز نیازمند طیف‌سنجهای دقیقی است که بتوانند فقط الکترونهای پراکنده شده از هدفهای هسته‌ای خاصی‌را آشکارسازی کنند. نمونه‌ای ازنتایج چنین‌آزمایشی را درشکل۱.۳ نشان داده‌ایم. دراین‌شکل، اولین کمینهٔ منحنی سطح مقطع راکه مشابه نقش پراش است به‌وضوح مشاهده می‌کنیم. اولین کمینهٔ نقش‌پراش برای پراش‌ازیك‌قرص دایره‌ای به‌قطر D باید تحت زاویهٔ

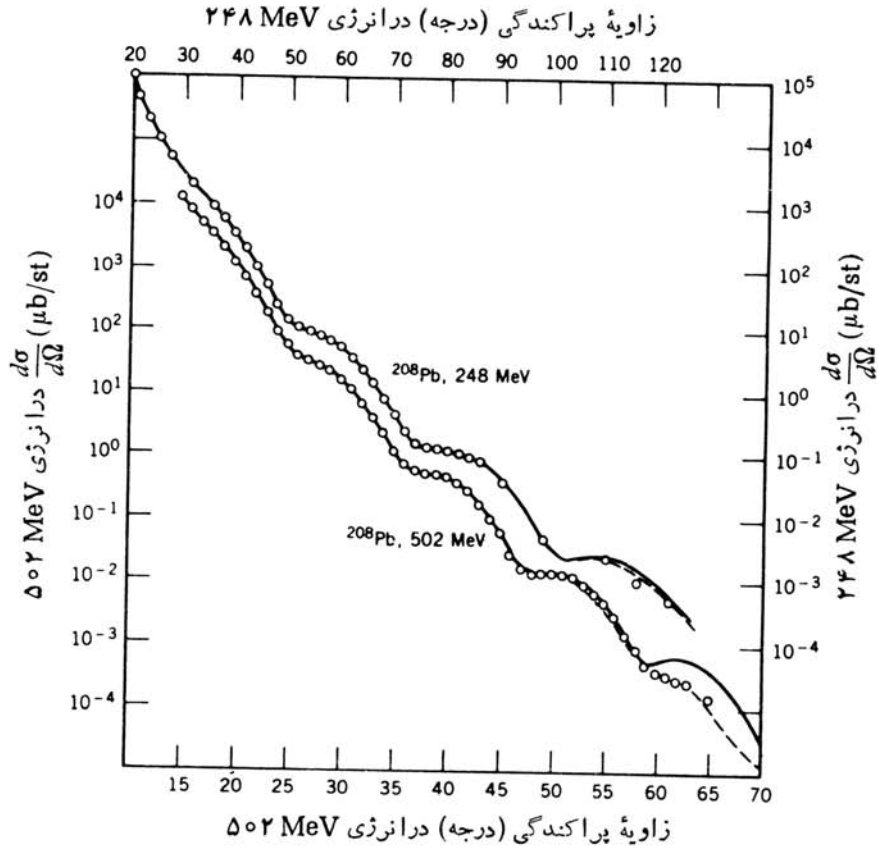


شکل ۱.۳ پراکندگی الکترون ازهدفهای ^{16}O و ^{12}C. شکل سطح‌مقطع تا حدودی مشابه نقش پراش حاصل از امواج نوری است.

$\theta = \sin^{-1}(۱٫۲۲\lambda/D)$ ظاهر شود. براوردی که از شعاع هسته در این آزمایش به‌دست می‌آید عبارت است از ۲٫۶ fm برای ^{۱۶}O و ۲٫۳ fm برای ^{۱۲}C. مقادیر این براوردها خیلی تقریبی است، زیرا پتانسیل پراکندگی را باید یك مسئلهٔ سه بعدی در نظر گرفت که فقط به‌طور تقریبی با پراش حاصل از یك قرص دوبعدی قابل مقایسه است.

نتایج حاصل از پراکندگی الاستیك از یك هستهٔ سنگین، ^{۲۰۸}Pb، را درشکل ۲.۳ نشان داده‌ایم. درمنحنی پراش ـ مانند سطح مقطع پراکندگی، چندین کمینه دیده می‌شود. علت اینکه این کمینه‌ها مانند کمینه‌های پراش نورتابیده‌شده برقرص کدر به‌صفر نمی‌رسند، این است که هسته مرز دقیقاً مشخصی ندارد.

اجازه دهید که این مسئله را به‌صورت کمی‌تری بررسی کنیم. تابع موج اولیهٔ الکترون که ذره‌ای آزاد با تکانهٔ $\mathbf{p}_i = \hbar\mathbf{k}_i$ محسوب می‌شود، به شکل $e^{i\mathbf{k}_i\cdot\mathbf{r}}$ است. الکترون



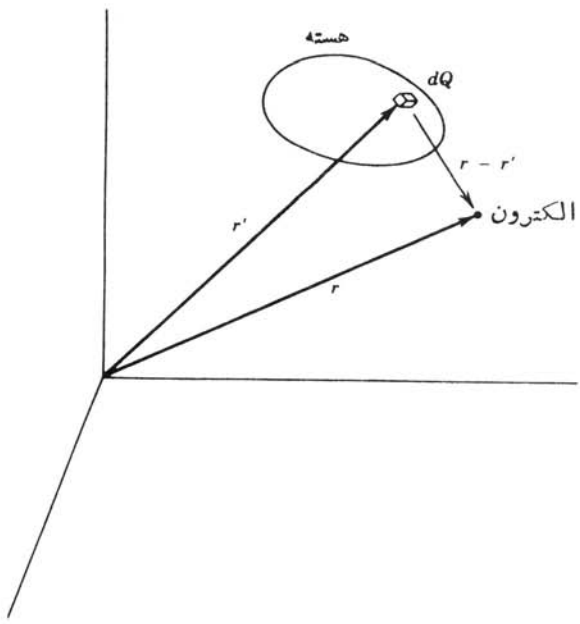
شکل ۲.۳ پراکندگی الاستیك الکترونها از هدف ^{۲۰۸}Pb. توجه داشته باشید که مقیاسهای افقی متناظر با دومقدار انرژی باهم تفاوت دارند. دراین آزمایش هم رفتار پراش ـ مانند دیده می‌شود، اما کمینه‌ها به‌صفر نمی‌رسند.

پراکنده را هم می‌توان به‌صورت ذره‌ای آزاد با تکانهٔ $\mathbf{p}_f = \hbar\mathbf{k}_f$ و تابع‌موج $e^{i\mathbf{k}_f\cdot\mathbf{r}}$ در نظر گرفت. برهم‌کنشی که موج اولیه را به موج پراکنده تبدیل می‌کند از پتانسیل $V(r)$ سرچشمه می‌گیرد وطبق معادلهٔ (۸۰.۲)، احتمال گذار با مربع کمیت زیرمتناسب می‌شود

$$F(\mathbf{k}_i, \mathbf{k}_f) = \int \psi_f^* V(r) \psi_i \, dv \qquad (۱.۳)$$

$$F(\mathbf{q}) = \int e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}} V(r) \, dv \qquad (۲.۳)$$

دراینجا ثابت بهنجارش را بایدچنان انتخاب کرد که $F(0) = 1$ شود. کمیت $\mathbf{q} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_f$ همان تغییر تکانهٔ الکترون پراکنده است. برهم‌کنش $V(r)$ به چگالی بار هسته‌ای $Ze\rho_e(\mathbf{r}')$ بستگی دارد که درآن $\mathbf{r}'$ بردار مکان نقطه‌ای از هسته و ρ_e توزیع بار هسته است. چنانکه درشکل ۳.۳ دیده می‌شود، انرژی پتانسیل الکترونی که در $\mathbf{r}$ قرار داردبر اثرجزء بار dQ مستقردر $\mathbf{r}'$ عبارت است از



شکل ۳.۳ نمایش هندسی آزمایش پراکندگی. مبدأ مختصات را دلخواه در نظر گرفته‌ایم. بردار مکان $\mathbf{r}'$ جای جزء بار dQ را در داخل هسته مشخص می‌کند، و بردار $\mathbf{r}$ مکان الکترون را درهمان دستگاه مختصات نشان می‌دهد.

$$dV = -\frac{e\,dQ}{4\pi\varepsilon_0|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}$$
$$= -\frac{Ze^2\rho_e(\mathbf{r}')\,dv'}{4\pi\varepsilon_0|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \qquad (۳.۳)$$

برای تعیین انرژی کل برهم‌کنش $V(r)$ باید ازمقدار فوق برای تمام مقادیر dQ درداخل هسته انتگرال گیری کرد

$$V(r) = -\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0}\int\frac{\rho_e(\mathbf{r}')\,dv'}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \qquad (۴.۳)$$

بـا قرار دادن $\mathbf{q}\cdot\mathbf{r} = qr\sin\theta$ درمعادلهٔ (۲.۳) وانتگرال گیری روی $\mathbf{r}$، نتیجه پس‌از بهنجارشدن به‌صورت زیردرمی‌آید

$$F(\mathbf{q}) = \int e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}'}\rho_e(\mathbf{r}')\,dv' \qquad (۵.۳)$$

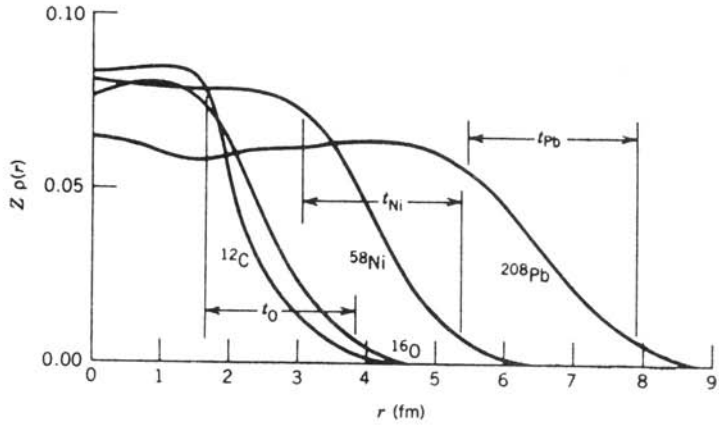
چنانچه $\rho_e(\mathbf{r}')$ فقط به‌مقدار r' (ونه به θ' یا ϕ') بستگی داشته باشد، خواهیم داشت

$$F(q) = \frac{4\pi}{q}\int\sin qr'\,\rho_e(r')r'\,dr' \qquad (۶.۳)$$

این کمیت فقط تابع q، یعنی بزرگی $\mathbf{q}$، است. چون پراکندگی را ازهمان آغاز الاستیك در نظر گرفتیم، داریم $|\mathbf{p}_i| = |\mathbf{p}_f|$ و q صرفاً تابعی از زاویهٔ پراکندگی α (زاویهٔ بین $\mathbf{p}_i$ و $\mathbf{p}_f$) است. اندکی محاسبهٔ برداری نشان می‌دهد که $q = (2p/\hbar)\sin\alpha/2$ که در آن p تکانهٔ الکترون است. اندازه‌گیری احتمال پراکندگی به‌صورت تابعی‌از α، بستگی معادلهٔ (۶.۳) را بـه مقدار q مشخص می‌کند. کمیت $F(q)$ را عامل شکل می‌گویند، و معکوس عددی معادلهٔ(۶.۳) که درواقع همان تبدیل معکوس فوریه است چگالی $\rho_e(r')$ را به‌دست می‌دهد.

نتایج این روش محاسباتی را برای چنـد هستهٔ مختلف درشکل ۴.۳ نشان داده‌ایم. نکتـهٔ مهمی که با توجه به‌این منحنیها حاصل می‌شود این است که چگالی بار هسته‌ای در مرکز تمام هسته‌ها تقریباً مقـداری ثابت است. نوکلئونها ظاهراً در مـرکز هسته متراکم نمی‌شوند، بلکه توزیع آنهـا در تمام حجم هسته نسبتاً ثـابت می‌ماند. (نتیجه‌ای‌کـه از اندازه‌گیریهای توزیع‌مادهٔ هسته‌ای به‌دست می‌آید نیزهمین امر را تأیید می‌کند.) بنابراین، نتیجه می‌گیریم که تعداد نوکلئونهای موجود در واحد حجم هسته تقریباً ثابت است

$$\frac{A}{(4/3)\pi R^3} \sim \text{const.} \qquad (۷.۳)$$



شکل ۴.۳ نمونه‌هایی از توزیع شعاعی بار در هسته که بـا استفاده از پراکندگی الکترونها حاصل شده است. ضخامت پوست t برای هسته‌های O، Ni، و Pb نشان داده شده‌است که مقدار آن ثابت ودرحدود ۲٫۳ fm است. تغییرچگالی بار مرکزی ازسبکترین تاسنگینترین هسته، چندان زیاد نیست.

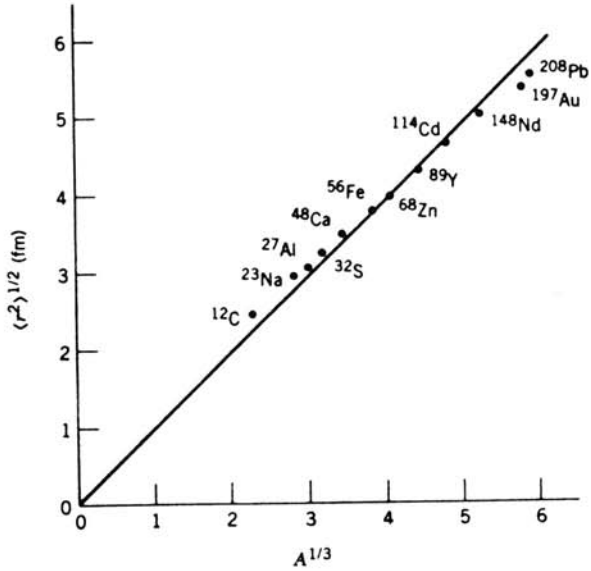
که در آن R شعاع میانگین هسته است. از این‌رو داریم $R \propto A^{1/3}$ و بـا تعریف ثابت تناسب R_0 می‌توان نوشت

$$R = R_0 A^{1/3} \qquad (۸.۳)$$

با توجه بـه اندازه‌گیریهای پراکندگی الکترون، نظیرآنچه درشکل ۴.۳ نشان داده شده است، معلوم می‌شود که $R_0 \simeq$ ۱٫۲ fm است. تمام جزئیات مربوط به‌توزیع بارهسته‌ای را می‌توان ازاین اندازه‌گیریها به‌دست آورد.

شکل۴.۳ میزان پخش‌شدگی سطح هسته‌ها (ونامشخص بودن مرزآنها) را هم نشان می‌دهد. چگالی بارتا نقطهٔ معینی تقریباً ثابت می‌ماند وآنگاه به‌کندی به صفرمیل می‌کند. فاصله‌ای کـه در طی آن چگالی بار به‌صفرمی‌رسد، تقریباً مستقل از اندازهٔ هسته است و معمولا مقداری ثابت در نظر گرفته می‌شود. ضخامت پوست را به صورت پارامتر t چنان تعریف می‌کنیم که در طی آن چگالی بار هسته از ۹۰٪ مقدار مرکزی بـه ۱۰٪ مقدارآن کاهش می‌یابد. مقدار t تقریباً برابر ۲٫۳ fm است.

ارتباط کمی بین شعاع هسته وعدد جرمی درشکل ۵.۳ که مبتنی برنتایج پراکندگی الکترون است، به‌صورت آشکارتری نموده شده است. دراین شکل، ریشهٔ میانگین مربعی شعاع $\langle r^2 \rangle^{1/2}$ مستقیماً از توزیع الکترونهای پراکنده به‌دست آمده است. برای کره‌ای که به‌طور یکنواخت باردار باشد، داریم $\langle r^2 \rangle = (3/5)R^2$ که درآن R شعاع کره است. شکل ۵.۳ نشان می‌دهد که بستگی خطی بین R و $A^{1/3}$ به‌طور تقریبی از سبکترین هسته



شکل ۵.۳ ریشهٔ میانگین مربعی شعاع هسته‌ها که از آزمایشهای پراکندگی الکترون به‌دست آمده است. با توجه به شیب خط داریم $R_\circ = ۱٫۲۳\ \mathrm{fm}$. این خط، از برازش حقیقی نقاط تجربی حاصل نشده است، بلکه آن را از مبدأ مختصات عبور داده‌ایم تا معادلهٔ $R=R_\circ A^{۱/۳}$ برقرارشود. خطای آزمایش نوعاً ازقطرنقاط تجربی ($\pm ۰٫۰۱\ \mathrm{fm}$) کوچکتر است.

تاسنگینترین‌هسته اعتباردارد. باتوجه به‌شیب خط‌معلوم می‌شودکه $R_\circ = ۱٫۲۳\ \mathrm{fm}$ است.

چگالی بار هسته‌ای را با مطالعهٔ دقیق گذارهای اتمی هم می‌توان تعیین کرد. درحل معادلهٔ شرودینگر برای اتم تك‌الکترونی، همیشه فرض می‌شودکه الکترون تحت جاذبهٔ یك هستهٔ نقطه‌ای با پتانسیل $V(r) = -Ze^۲/۴\pi\varepsilon_\circ r$ قرار دارد. چون هسته‌های واقعی به صورت نقطه نیستند، تابع‌موج الکترون می‌تواند به $r<R$ نفوذ کند، و بدین‌گونه الکترون قسمتی‌از اوقاتش را درون توزیع بار هسته‌ای می‌گذراند، و درآنجا برهم‌کنشی کاملا متفاوت با پتانسیل‌کولنی را تجربه می‌کند. بویژه برای هسته‌ای‌که شعاع غیرصفر دارد، وقتی‌که $r \to ۰$، پتانسیل $V(r)$ به‌سوی بینهایت میل نخواهدکرد. به‌طور تقریبی می‌توان هسته را کرهٔ باردار یکنواختی به‌شعاع R تصورکردکه انرژی پتانسیل الکترون درفواصل $r \leqslant R$ عبارت است از

$$V'(r) = -\frac{Ze^۲}{۴\pi\varepsilon_\circ R}\left\{\frac{۳}{۲}-\frac{۱}{۲}\left(\frac{r}{R}\right)^۲\right\} \qquad (۹.۳)$$

واین درحالی است‌که انرژی پتانسیل الکترون درفواصل $r \geqslant R$ به همان شکل پتانسیل هستهٔ نقطه‌ای است.

انـرژی کل E الکترون در حالت ψ_n برای یك هستهٔ نقطه‌ای، تا حدودی به مقدار انتظاری انرژی پتانسیل بستگی دارد

$$\langle V\rangle=\int\psi_n^* V\psi_n dv \qquad (۱۰.۳)$$

که در آن V انرژی پتانسیل کولنی هستهٔ نقطه‌ای است. اگر (در تقریب اول) فرض کنیم که تبدیل هستهٔ نقطه‌ای بـه هستهٔ کروی با بار یکنواخت تغییر قابل توجهی در تابع‌موج الکترون ψ_n به‌وجود نمی‌آورد، آنگاه انرژی کل E' الکترون درهرحالت ازهستهٔ کروی به‌مقدار انتظاری پتانسیل V' بستگی پیدا می‌کند

$$\langle V'\rangle=\int_{r<R}\psi_n^* V'\psi_n dv+\int_{r>R}\psi_n^* V\psi_n\, dv \qquad (۱۱.۳)$$

کـه در آن انتگرال دوم فقط به انرژی پتانسیل $1/r$ بستگـی دارد. بنابراین، اثـر هستهٔ کروی ایـن است که انرژی حالتهـای الکترون را بـه نسبت هستهٔ نقطه‌ای بـه مقـدار $\Delta E=E'-E=\langle V'\rangle-\langle V\rangle$ تغییر می‌دهد. اینکه‌اختلاف انرژی از تفاضل $\langle V'\rangle-\langle V\rangle$ به‌دست بیاید، ازاین فرض ناشی می‌شود کـه تابع‌موجها تغییر نکرده‌اند. در این صورت، جملات مربوط به انرژی جنبشی در E و E' یکسان خواهند بود. با استفاده از تابع‌موج هیدروژنی 1s درجدول ۵.۲ حاصل می‌شود

$$\Delta E=\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{4Z^4}{a_0^3}\int_0^R e^{-2Zr/a_0}\left\{\frac{1}{r}-\frac{3}{2R}+\frac{1}{2}\,\frac{r^2}{R^3}\right\}r^2\,dr \qquad (۱۲.۳)$$

عامل‌نمایی در زیرانتگرال تقریباً برابر واحد است، زیرا $R/a_0\simeq 10^{-5}$ می‌شود، و با توجه به‌جملات باقیمانده خواهیم داشت

$$\Delta E=\frac{2}{5}\,\frac{Z^4e^2}{4\pi\varepsilon_0}\,\frac{R^2}{a_0^3} \qquad (۱۳.۳)$$

این مقدار ΔE مابه‌التفاوت انرژی بین حالت 1s دراتمی باهستهٔ «نقطه‌ای» وحالت 1s دراتم با هستهٔ کروی باردار یکنواخت به شعاع R است. هستهٔ کروی باردار یکنواخت با شعاع R، چنانکه شکل ۴.۳ نشان می‌دهـد، تقریب خوبی ازهستهٔ واقعی است. هرگاه چشمه‌ای از اتمها بـا هسته‌های «نقطه‌ای» در اختیار داشته باشیم، می‌توانیـم ΔE را اندازه‌گیری کنیم و از آنجا R را به‌دست آوریم! چون چنین هسته‌هایی وجـود ندارند، راه‌حل مناسب بعدی این است که E' را از طریق اندازه‌گیری (مثلا پرتوهای ایکس K) تعیین کنیم وسپس بااستفاده ازتابع‌موج اتم درحالت 1s مقدار E متناظر به‌هستهٔ نقطه‌ای را محاسبه کنیم. متأسفانه تابع‌موجهای اتم با دقت کافی در اختیار نیست که این‌کار انجام شود. مابه‌التفاوت ΔE خیلی کوچك و شاید در حدود $10^{-4}E$ است، وتابع‌موجهای 1s

اتمهای هیدروژنی برای محاسبهٔ E بـا دقت ۱ قسمت در 10^4 کافی نیست (عوامل جنبی نظیر اثرات نسبیتی وحضور الکترونهای دیگر دراتم هم برمقدار انرژی حالت 1s تأثیر می‌گذارند). بنابراین، بااستفاده ازیك اندازه‌گیری منفرد انرژی پرتوایکس K نمی‌توان شعاع هسته را به‌دست آورد.

به جای اندازه‌گیری منفـرد، اجازه دهید انرژی پرتو ایکس K (حاصل از گذار الکترونی $2p \to 1s$) را در دو ایزوتوپ مجاور با اعداد جرمی A و A' اندازه‌گیری وآنها را باهم مقایسه‌کنیم. اگراین انرژیها را با $E_K(A)$و$E_K(A')$ نمایش دهیم، داریم

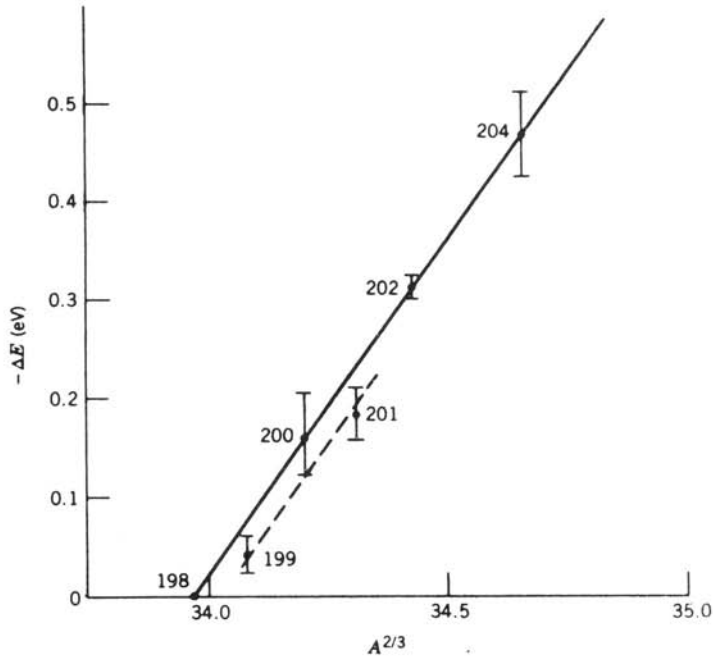
$$E_K(A)-E_K(A')=E_{2p}(A)-E_{1s}(A)-E_{2p}(A')+E_{1s}(A') \quad (۱۴.۳)$$

اگراختلاف انرژی 2p را ناچیز بگیریم (یادآور می‌شودکه بنابرآنچه درفصل ۲ دیدیم، تابع‌موجهای p الکترون در $r=0$ ناپدید می‌شوند)، اختلاف انرژی حالتهای باقیماندهٔ 1s بـه اختلاف مقادیـر ΔE حاصل از معادلـهٔ (۱۳.۳) تبـدیل می‌شـود، زیـرا $E_{1s} \equiv E'=E+\Delta E$ است ومقـادیر E هستهٔ «نقطه‌ای» بـرای ایزوتوپهای A و A' یکسان خواهد بود. پس خواهیم داشت

$$E_K(A)-E_K(A')=\Delta E(A')-\Delta E(A)$$
$$=-\frac{2}{5}\frac{Z^4e^2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{a_0^3}R_0^2(A^{2/3}-A'^{2/3}) \quad (۱۵.۳)$$

کمیت $E_K(A)-E_K(A')$ را انتقال ایزوتوپی پرتوایکس K می‌نامند. از ترسیم منحنی تغییرات این کمیت برحسب $A^{2/3}$ برای تعـدادی ایزوتوپ با مقادیر مختلف A و مقایسهٔ همهٔ آنها با A' یکسان، خط راستی حاصل می‌شودکـه شیب آن مقدار R_0 را به دست می‌دهد. شکل۶.۳ نمونه‌ای ازاین نوع منحنی را برای چند ایزوتوپ Hg نشان می‌دهد. تناسب بین انتقال ایزوتوپی ومقدار $A^{2/3}$ در این شکل بسیار خوب است. اما مقدار R_0 حاصل از شیب خط مقـدار مناسبی نیست، زیـرا تابع‌موج 1s مورد استفاده در معادلهٔ (۱۲.۳) نمـایندهٔ خیلی خـوبی از تـابع‌موج حقیقی 1s نیست. بـرای مثال، مقـادیر محاسبه شدهٔ انرژی پرتو ایکس K در حدود ۱۰درصد کمتراز مقادیرمشاهده شده است. چنانچه درمحاسبات تفصیلی الکترون 1s اثرات نسبیتی واثرات حضورالکترونهای دیگر را در اتم در نظر بگیریم، رابطهٔ واقع‌بینانه‌تری بین شیب شکل ۶.۳ ومقدار R_0 به‌دست می‌آید. مقـادیرحاصل برای R_0 درگسترهٔ ۱٫۲fm قرار دارند، و بـا نتایج حاصل از آزمایشهای پراکندگی الکترون سازگارند.

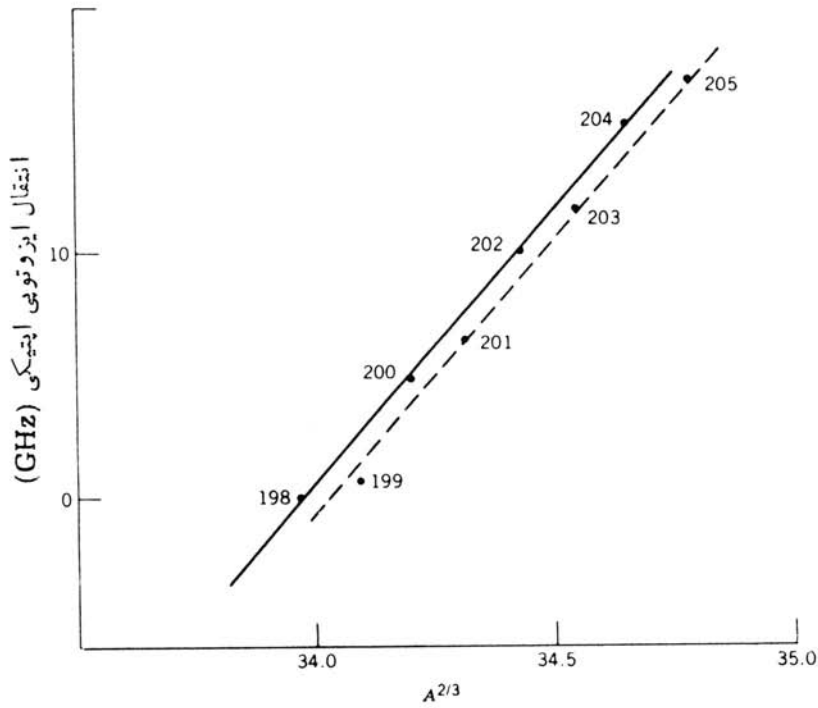
انتقال ایزوتوپی رابه‌کمك تابش اپتیکی دراتمها (گذارهای بین پوسته‌های بیرونی الکترون که منجر به تولید نور مرئی می‌شود) هم می‌توان اندازه‌گیری کرد. چـون این مدارهای الکترونی نسبت به‌مدار 1s خیلی دورتراز هسته قرار می‌گیرند، انتقال حاصل ازانتگرال‌گیری تابع‌موج آنها درحجم هسته‌که نظیرمعادلهٔ (۱۲.۳) است، خیلی‌کوچکتر از انتقال الکترونهای درونی 1s خواهد بود. درفصل ۲ نشان دادیم‌که حد تابع‌موجهای



شکل ۶.۳ انتقال ایزوتوپی پرتوایکس K در Hg. انرژی پرتوایکس K در Hg در حدود ۱۰۰ keV است، بنابراین انتقال ایزوتوپی نسبی از مرتبهٔ 10^{-6} می‌شود. تناسب پیش‌بینی شده با $A^{2/3}$ با این اطلاعات تأیید می‌شود. جابه‌جایی «فرد ـ زوج» منحنی بر اثر مدار ذرهٔ فرد در هسته به وجود می‌آید. به همین دلیل، ایزوتوپهای A فرد را باید جدا از ایزوتوپهای A زوج رسم کرد. اما تناسب با $A^{2/3}$ در هردو گروه دیده می‌شود.

ψ برای حالتهای s (تابع‌موجهای $l=0$) به‌ازای مقادیر کوچك r غیرصفر است. اگر گذارهای اپتیکی به‌حالتهای s مربوط باشد، انتقالهای ایزوتوپی آنها می‌تواند به حدی بزرگ شود که اندازه‌گیری‌شان، بویژه با استفاده از روشهای نوین تداخل‌سنجی لیزری، بدقت امکان‌پذیر باشد. نمونه‌ای‌از انتقالهای اپتیکی در ایزوتوپهای Hg را درشکل ۷.۳ نشان داده‌ایم. دراین اطلاعات هم تناسب مورد انتظار با $A^{2/3}$ تأیید می‌شود. مقدار $R_0 = 1.2$ fm با اندازه‌گیریهای انجام شده درگسترهٔ وسیعی از هسته‌ها سازگار است.

این‌گونه اثرات اندازهٔ هسته بر انتقالهای اپتیکی و پرتو ایکس، خیلی کوچك و در حدود 10^{-4} تا 10^{-6} برابر انرژی گذار هستند. علت آن هم به‌اختلاف مقیاس 10^4 بین شعاع بور a_0 و شعاع هستهٔ R مربوط می‌شود. برای آنکه اثرات ناشی از انتگرالهای (۱۲.۳) بزرگ باشد، تابع‌موج اتم به ازای مقادیر r نزدیك به R باید بزرگ باشد. اما تابع‌موجهای اتم به‌ازای مقادیر نزدیك به $r = a_0/Z$ که خیلی بزرگتر از R هستند، بزرگ می‌شوند. برای بهبود این‌وضع می‌توان از اتم موئونی استفاده کرد. موئون ذره‌ای

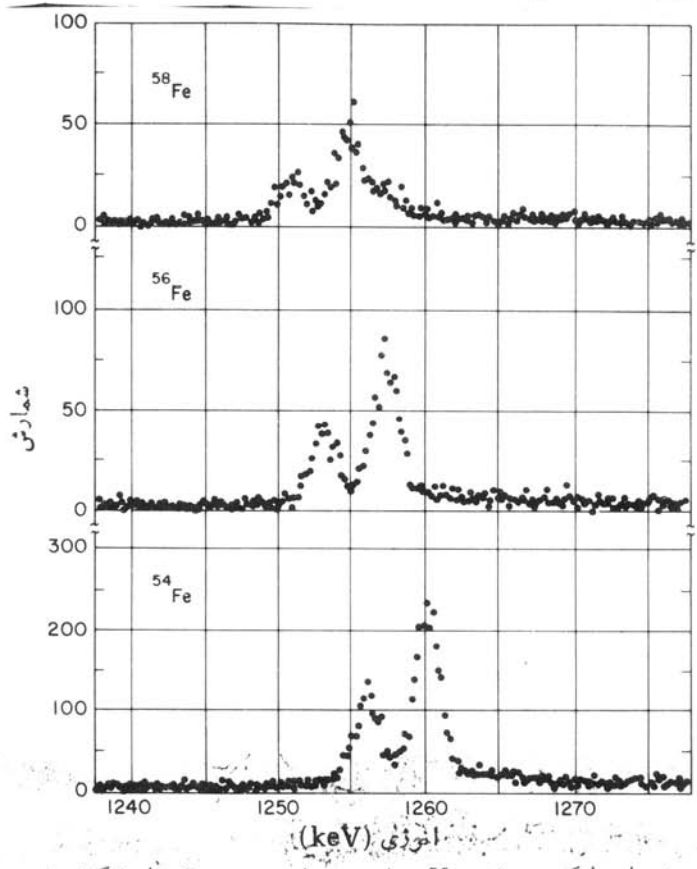


شکل ۷.۳ انتقالهای ایزوتوپی ایتیکی در ایزوتوپهای Hg از ۱۹۸ تـا ۲۰۵ درمقایسه با ایزوتوپ ۱۹۸. این اطلاعات ازطریق طیف‌نمایی لیزری به‌دست آمده است که خطای آزمایشی آن درحدود ۱ ± درصد است. طول موج گذار ایتیکی دراین‌اندازه‌گیریها برابر ۲۵۳٫۷nm، و انتقال ایزوتوپی در حدود یك قسمت در هر 10^7 قسمت بوده است. ایـن نتایج را با نتایج شکل ۶.۳ مقایسه کنید.

است که تمام خصوصیاتش، غیرازجرم، همانند الکترون‌است، جرم موئون ۲۰۷ برابر جرم الکترون است. چون شعاع بور نسبت معکوس باجرم دارد، شعاع مدارهای موئونی برابر ۱/۲۰۷ شعاع مدارهای الکترونی متناظرخواهدبود. درواقع، درهستهٔ سنگینی مانند Pb، شعاع متوسط مدار موئونی ۱s کمتراز شعاع هسته خواهد شد. بدین‌ترتیب، اندازهٔ هسته با ضریب ۲ در انرژی گذار تأثیرخواهدگذاشت که درمقایسه با ضریب 10^{-4} تا 10^{-6} درگذارهای الکترونی، بهبود قابل توجهی به‌شمار می‌رود.

در مواد معمولی موئون وجود ندارد، اما می‌توان آن را بااستفاده از شتابدهنده‌های بزرگ که باریکه‌های شدید مزونهای π تولید می‌کنند به‌طور مصنوعی به وجود آورد. این مزونهای π پس ازتولید، به‌سرعت (در زمانی از مرتبهٔ 10^{-8}s) واپاشیده وبه موئون تبدیل می‌شوند. (خواص موئونها و مزونهای π را درفصلهای ۱۷ و ۱۸ بررسی خواهیم کرد.) هنگامی کـه باریکه‌های موئون روی هدفهای مناسبی متمرکز شوند، اتمهای هدف

موئونها را گیراندازی می‌کنند و آنها را در مدارهایی مشابه مدارهای الکترونی قرار می‌دهند. موئون درآغاز درحالتی باعددکوانتومی اصلی n خیلی بالا قرارمی‌گیرد، وسپس درحالی که به‌حالت پایهٔ 1s نزدیك می‌شود، ازخود فوتونهایی گسیل می‌کند که بافوتونهای گسیل‌شونده در گذارهای الکترونی بین ترازهای انرژی اتم قابل مقایسه است. ترازهای انرژی اتم هیدروژن مستقیماً به‌جرم الکترون بستگی دارد. بنابراین، می‌توان انتظارداشت که انرژی ترازهای موئونی و انرژی گذار آنها، ۲۰۷ برابرانرژی حالتهای الکترونی باشد. چون انرژی پرتوهای ایکس K درحالت عادی درحدود دهها keV است، انرژی پرتوایکس K درحالت موئونی درحدود چند MeV خواهدشد. چند نمونه از پرتوهای ایکس موئونی K درشکل ۸.۳ نشان داده شده است. این انتقال ایزوتوپی، در مقایسه با

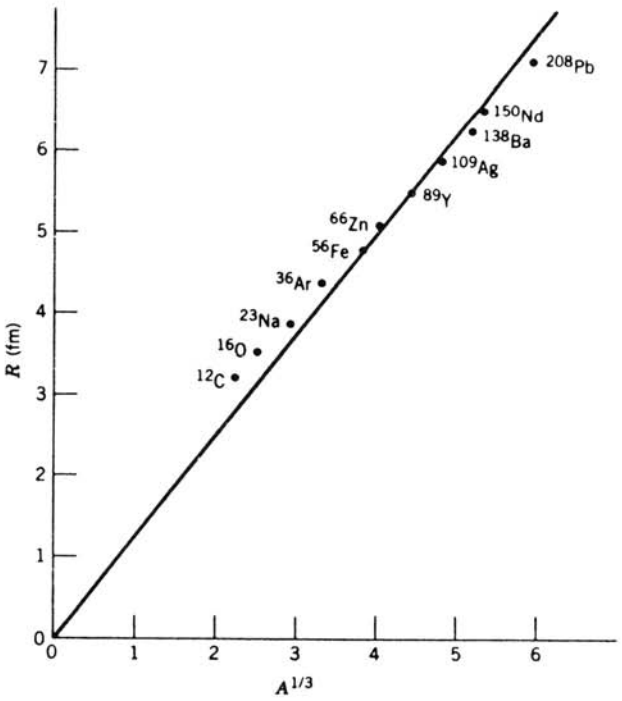


شکل ۸.۳ پرتوهای ایکس موئونی K برای چند ایزوتوپ Fe. قله‌ها گذارهای $2p_{3/2}$ به $1s_{1/2}$ و $2p_{1/2}$ به $1s_{1/2}$ را نشان می‌دهند که شدت نسبی آنها به‌نسبت ۲:۱ است. این نسبت ازطریق وزن آماری $(2j+1)$ حالت اولیه قابل تعیین است. انتقال ایزوتوپی را به روشنی می‌توان از تغییرانرژی گذار تشخیص داد. اثرنسبی انتقال دراینجا درحدود ۰٫۴ درصد است که باید آن را با مقدار 10^{-6} حاصل از پرتوهای ایکس الکترونی K (شکل۶.۳) مقایسه کرد.

انتقال ایزوتوپی پرتوایکس الکترونی K که نوعاً درحدود 10^{-2} eV به‌ازای واحدتغییر عدد جرمی A است، خیلی زیاد است.

برخلاف مورد پرتوهای ایکس الکترونی K که درآنها عدم قطعیت تابع‌موجهای اتم باعث دشواری تعبیرانتقال ایزوتوپی می‌شود، دراینجا می‌توانیم بااستفاده ازانرژیهای مشاهده‌شدهٔ پرتوایکس موئونی مستقیماً پارامترهای توزیع بار هسته‌را محاسبه‌کنیم. نتایج حاصل‌را براساس مدل کرهٔ باردار یکنواخت برای ریشهٔ میانگین مربعی(rms) شعاعهای هسته‌ای درشکل ۹.۳ نشان داده‌ایم. اطلاعات موجود در این شکل بـه تقریب با عبارت $R_0A^{1/3}$ که درآن $R_0 = 1.25$ fm باشد، سازگار است.

راه‌دیگرتعیین‌شعاع بار هسته، استفاده از اندازه‌گیری مستقیم اختلاف انرژی‌کولنی هسته‌هاست. برای نمونه، $^3_1H_2$ و $^3_2He_1$ را درنظرمی‌گیریم. برای آنکه از ^3He به ^3H برسیم، باید یك پروتون را به یك نوترون تبدیل کنیم. چنانکه در بحث فصل ۴ خواهیم دید، شواهدی قوی دال براین امر در دست‌است که نیروی هسته‌ای تفاوتی بین پروتون و نوترون نمی‌گذارد. بنابراین، تبدیل پروتون به نوترون نباید تأثیری در انرژی هسته‌ای



شکل ۹.۳ تعیین شعاع میانگین هسته بـا استفاده از اندازه‌گیریهای پرتوایکس موئونی. در اینجاهم، مانند مورد شکل۵.۳، بستگی خطی بین شعاع و $A^{1/3}$ به‌تقریب تأیید می‌شود (دراین مورد نیزخط را عمداً از مبدأ مختصات عبورداده‌ایم). باتوجه به‌شیب خطداریم $R_0 = 1.25$fm.

این سیستم سه نوکلئونی برجای بگذارد. امـا انرژی کولنی سیستم باید تغییر کند، زیرا پروتونها در ^{3}He تحت تأثیر دافعه‌اند درحالی‌کـه در ^{3}H چنین دافعه‌ای وجود ندارد. بدین تـرتیب، اختلاف انرژی بین ^{3}He و ^{3}H براوردی از انرژی کولنی پروتون دوم به‌دست می‌دهد. برای محاسبهٔ فاصلهٔ بین پروتونها، وتعیین اندازهٔ هسته، می‌توان ازفرمول معمولی انرژی دافعهٔ کولنی استفاده کرد.

اکنون یك هستهٔ پیچیده‌تر، مانند $^{238}_{92}U_{146}$، را در نظرمی‌گیریم. در این مورد اگر بخواهیم یك پروتون را به یك نوترون تبدیل کنیم، با وضعیتی کاملا متفاوت با حالت قبل روبه‌رو می‌شویم. زیرا دراین حالت، نود و دومین پروتون باید به یکصد وچهل و هفتمین نوترون تبدیل شود. چون نوترونها و پروتونها هـردو تابع اصل پاؤلی هستند، اوربیتال ۹۲امین پروتون بـا اوربیتال ۱۴۷امین نوترون تفاوت خواهـد داشت، و درحالت‌کلی محاسبهٔ این اثر به‌طور دقیق امکان‌پذیرنیست و نمی‌توان به‌انرژی‌کولنی دست یافت. اگر موردی را درنظربگیریم که (مانند نمونهٔ تبدیل ^{3}He به ^{3}H) متضمن تغییراوربیتال نباشد، یعنی اگر شمارهٔ آخرین پروتون تبدیل‌شونده به نوترون با شمارهٔ آخرین نوترون بعد از تبدیل یکسان باشد، مشکل برطرف خواهد شد. دراین صورت، Z هستهٔ اول باید بـا N هستهٔ دوم برابر باشد (کـه در نتیجه، N هستهٔ اول هم بـا Z هستهٔ دوم برابر می‌شود). این‌گونه زوج هسته‌ها را هسته‌های آینه‌ای می‌نامند، زیرا از طریق انعکاس از آینه‌ای‌که پروتون را به‌نوترون تبدیل می‌کند یك هسته به‌هستهٔ دیگر بدل می‌شود. زوجهای $^{13}_{7}N_{6}$ و $^{13}_{6}C_{7}$ یا $^{39}_{20}Ca_{19}$ و $^{39}_{20}K_{19}$ رابه‌عنوان نمونه‌هایی‌ازهسته‌های‌آینه‌ای می‌توان‌درنظر گرفت.

انرژی‌کولنی یك‌کرهٔ باردار یکنواخت به‌شعاع R عبارت است از

$$E_c=\frac{3}{5}\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q^2}{R} \qquad (16.3)$$

که درآن Q بارکل کره است. بـا توجه به‌این عبارت، اختلاف انرژی‌کولنی بین زوج هسته‌های آینه‌ای چنین به‌دست می‌آید

$$\Delta E_c=\frac{3}{5}\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 R}[Z^2-(Z-1)^2]$$

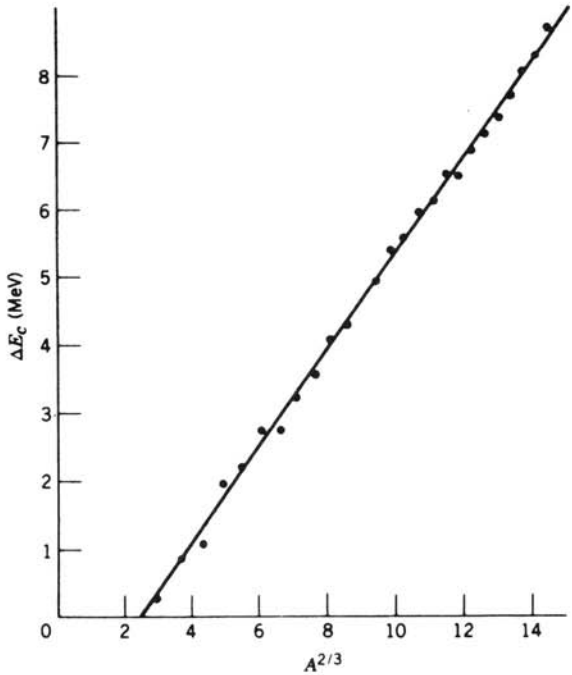
$$=\frac{3}{5}\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 R}(2Z-1) \qquad (17.3)$$

چون Z نمایندهٔ عدد اتمی هسته‌ای است‌کـه عدد اتمی بالاتری دارد، N آن باید برابر $(Z-1)$ شود. دراین صورت داریم $A=2Z-1$، وبا توجه به $R=R_0A^{1/3}$ حاصل می‌شود

$$\Delta E_c=\frac{3}{5}\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 R_0}A^{2/3} \qquad (18.3)$$

اختلاف انرژی کولنی را به‌دو روش می‌توان مستقیماً اندازه‌گیری کرد. در روش اول یکی از زوج هسته‌ها از طریق واپاشی هسته‌ای بتازا، که در طی آن یك پروتون با گسیل یك الکترون مثبت (پوزیترون) به‌نوترون تبدیل می‌شود، به‌صورت هستهٔ دیگردرمی‌آید. دراین روش، بیشینهٔ انرژی پوزیترون گسیل‌شده میـزان اختلاف انـرژی بین هسته‌ها را تعیین می‌کند. در روش دوم، بـرای اندازه‌گیری اختلاف انرژی از واکنشهای هسته‌ای استفاده می‌شود. برای نمونه، هنگامی که هسته‌ای مانند ^{11}B را با پروتون بمباران می‌کنیم، گاهی ازاین واکنش یك نوترون گسیل می‌شود و هسته‌ای به‌صورت ^{11}C برجای می‌ماند. کمینهٔ انرژی پروتون برای انجام این واکنش، میزان اختلاف انرژی بین ^{11}B و ^{11}C را به‌دست می‌دهد.[واپاشی بتازا درفصل۹ وسینماتیك‌واکنشهادرفصل۱۱(جلددوم،ترجمهٔ‌فارسی)مورد بحث‌قرارخواهد گرفت.] اختلاف‌انرژی اندازه‌گیری‌شده‌را برای‌تعدادی‌ازهسته‌ها برحسب $A^{2/3}$ در شکل ۱۰.۳ رسم کرده‌ایم. چنانکه از معادلهٔ (۱۸.۳) انتظار می‌رود، تناسب بین این دو کمیت تقریباً خطی است. از شیب خط حاصل خواهیم داشت $R_0 = 1.22\,\mathrm{fm}$.

هرچندکه دراین اندازه‌گیریهای شعاع بـار هسته از روشهای متفاوتی استفاده شده است، ولی نتایج حاصل از همهٔ آنهـا یکسان است. تغییرات شعاع هسته برحسب عـدد جرمی به صورت $R_0 A^{1/3}$ به‌دست می‌آیدکه درآن R_0 برابر ۱٫۲ تا ۱٫۲۵ fm است.



شکل ۱۰.۳ اختلاف انرژی‌کولنی بین هسته‌های آینه‌ای. چنانکه انتظار می‌رود، تناسب بین اختلاف انرژی و $A^{2/3}$ بخوبی مشهود است. با توجه به شیب خط، داریم $R_0 = 1.22\,\mathrm{fm}$.

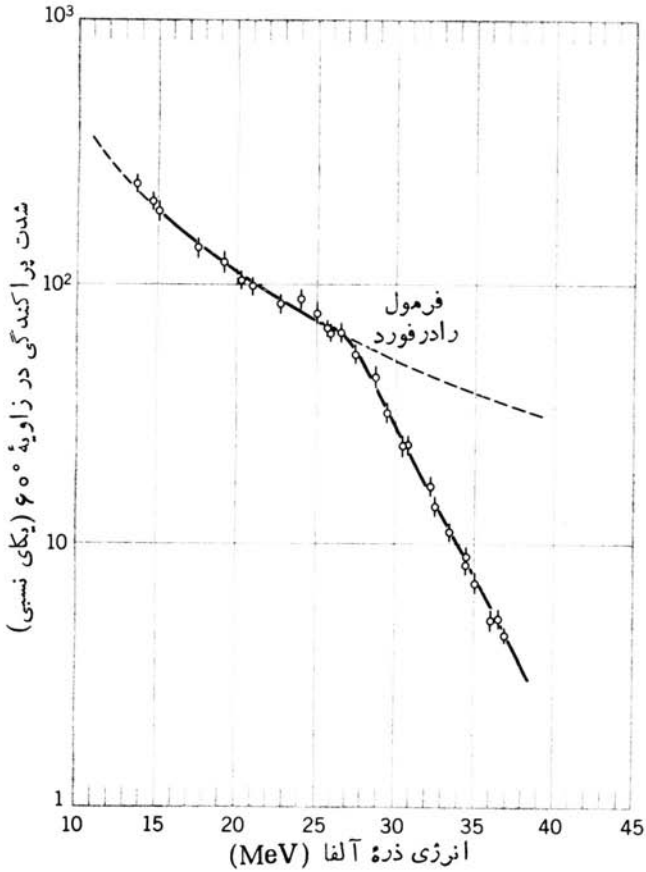
توزیع مادهٔ هسته‌ای

اغلب شعاع هسته را ازطریق آزمایشی که متضمن نیروی هسته‌ای بین دوهسته است، تعیین می‌کنیم. باتعیین تغییرات فضایی نیروی بین هسته‌ها می‌توان شعاع هسته‌ها را محاسبه‌کرد. دراین‌صورت، شعاع تعیین‌شده را باید به‌عنوان‌مشخصهٔ نیروی هسته‌ای تلقی‌کنیم نه‌نیروی کولنی. بنابراین، چنین شعاعی نمایانگرتوزیع پروتونها به‌تنهایی‌نیست بلکه توزیع‌تمامی نوکلئونهای موجود درهسته را نشان می‌دهد.

به عنوان نمونه‌ای از اندازه‌گیریهای توزیع مادهٔ هسته‌ای، آزمایشی را در نظر می‌گیریم که در طی آن هستهٔ ^{4}He (ذرهٔ آلفا) توسط هستهٔ هدف خیلی سنگینتری مانند ^{197}Au پراکنده می‌شود. اگرفاصلهٔ بین دوهسته همیشه از مجموع شعاعهای آنها بزرگتر باشد، همواره یك هسته درفراسوی برد نیروی هسته‌ای هستهٔ دیگرقرار می‌گیرد، و دراین صورت فقط نیروی کولنی در برهم‌کنش آنها دخالت دارد. [این فرایند را پراکندگی رادرفورد می‌نامندکه درفصل ۱۱ (جلد دوم) بررسی خواهد شد.] هنگامی‌که انرژی ذرهٔ فرودی‌کمتر از مقدار معینی باشد، احتمال پراکندگی تحت هر زاویهٔ مشخصی را می‌توان دقیقاً از فرمول رادرفورد پیش‌بینی‌کرد. با افزایش انرژی ذرات آلفای فرودی می‌توان بردافعهٔ کولنی غلبه کرد، که دراین صورت نزدیکی ذره و هسته ممکن است آنچنان زیاد باشدکه نیروی هسته‌ای وارد عمل شود. در این حالت، فرمول رادرفورد دیگر نمی‌تواند برقراربماندکه نمونه‌ای ازآن را درشکل ۱۱.۳ نشان داده‌ایم.

به‌عنوان نمونه‌ای دیگر، شکل واپاشی رادیواکتیو آلفازا راکه درآن یك ذرهٔ آلفا از هسته گسیل می‌شود در نظر می‌گیریم (بحث کامل واپاشی آلفازا را درفصل ۸ خواهیم دید). چنانکه درشکل ۱۲.۳ نشان داده‌ایم، ذرهٔ آلفای گسیل‌شونده باید با فرار از پتانسیل هسته‌ای در یك سد پتانسیل‌کولنی نفوذکند. احتمال واپاشی آلفازا را به‌کمك یك روش استاندارد نفوذ ازسد وبا استفاده ازمعادلهٔ شرودینگر، می‌توان محاسبه‌کرد. این مقادیرمحاسبه شدهٔ احتمال به‌شعاع مادهٔ هسته‌ای R بستگی دارد، واز مقایسهٔ آن با احتمال واپاشی اندازه‌گیری شده می‌توان مقدار R را تعیین‌کرد.

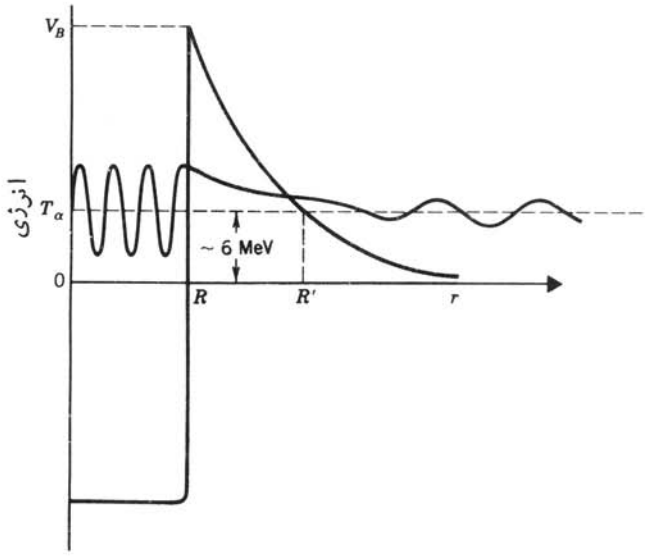
روش سوم در تعیین شعاع مادهٔ هسته‌ای، استفاده از اندازه‌گیری انرژی پرتوهای ایکس مزون π است. این روش خیلی شبیه به همان روش پرتوایکس موئونی است‌که در اندازه‌گیری‌شعاع بار هسته دربالا موردبحث‌قرارگرفت. اختلاف این‌دو روش، به‌اختلاف بین موئونها و مزونهای π مربوط می‌شود. برهم‌کنش موئونها با هسته از طریق نیروی کولنی است، درحالی‌که برهم‌کنش مزونهای π با هسته ازطریق نیروی‌کولنی و نیروی هسته‌ای است. مزونهای باردار منفی π هم، مانند موئونها، در گذار از مدارهایشان که مشابه مدارهای الکترونی است فوتونهایی به نام پرتوهای ایکس مزون π از خود گسیل می‌کنند. هنگامی‌که تابع‌موجهای مزون-π-شروع به همپوشی با هسته می‌کند، ترازهای انرژی این نوع اتمها تاحدودی جابه‌جا می‌شود و دیگر بامحاسباتی‌که صرفاً ازبرهم‌کنش کولنی حاصل شده است، مطابقت نخواهد داشت. بعلاوه، این امکان هم وجود داردکه



شکل ۱۱.۳ نقض فرمول پراکندگی رادرفورد. وقتی‌که ذرهٔ فرودی α آنچنان به هستهٔ هدف Pb نزدیك شودکه برهم‌کنش با نیروی هسته‌ای (علاوه‌برنیروی‌کولنی) امکان‌پذیرشود، فرمول رادرفورد اعتبارش را از دست می‌دهد. با استفاده از نقطهٔ شکست این قانون می‌توان بزرگی هسته را براوردکرد.

مزونهای π وبویژه مزونهای مدارهای درونی مستقیماً توسط هسته جذب شوند، که دراین صورت تعداد گذارهای پرتوایکس ترازهای درونی کاهش خواهد یافت. «آهنگ ناپدید شدن» مزونهای π را می‌توان به عنوان روش دیگری از تعیین شعاع هسته مورد بهره‌برداری قرار داد.

در اصل، تمام این اثرات را می‌توان به عنوان اساس محاسبات تعیین شعاع هسته به‌کاربرد. اما این محاسبات نسبت به مختصات دقیق همپوشی (یا برخورد) بین ذرهٔ کاونده و مادهٔ هسته‌ای، بسیار حساس است. بنابراین، در این محاسبات استفاده از مدل



شکل ۱۲.۳ نفوذ از سد در واپاشی آلفازا. نیمه عمر گسیل آلفا به‌احتمال نفوذ از سد بستگی دارد، واحتمال نفوذ هم به‌ضخامت سد بستگی دارد. بنابراین با استفاده از نیمه‌عمر اندازه‌گیری شده می‌توان شعاع R را در جایی که نیروی هسته‌ای به‌پایان می‌رسد و سپس دافعهٔ کولنی وارد عمل می‌شود، تعیین کرد.

«کرهٔ یکنواخت» به‌صورتی که چگالی درفاصلهٔ R برابرمقدارثابت ودرخارج از R برابر صفرباشد، کاری نادرست است. به‌جای این‌کار، باید از توزیعی مانند منحنیهای شکل ۴.۳ استفاده‌کنیم، وعلاوه‌برشعاع متوسط هسته دنبالهٔ مناسبی هم برای آن درنظر بگیریم.

در اینجا شعاع مادهٔ هسته‌ای را به‌تفصیل محاسبه نمی‌کنیم، زیراکه از محاسبات قبلی شعاع بارهسته‌ای خیلی پیچیده‌تراست. اکنون نتیجهٔ این محاسبه را ذکـرمی‌کنیم‌که ممکن است تاحدودی شگفت‌انگیزباشد: شعاعهای بار و مادهٔ هسته‌ها، باتقریب حدود $1.0\,fm$، باهم برابرند. هردوشعاع به $A^{1/3}$ بستگی‌دارند، وضریب تناسب آنهابرابر $R_0 \simeq 1.2\,\mathrm{fm}$ است. درهسته‌های سنگین، چون تعداد نوترونها درحدود ۵۰درصد بیشتراز پروتونهاست، ممکن است انتظار داشته‌باشیم‌که شعاع نوترونی هسته‌ها اندکی‌بزرگتر ازشعاع پروتونی آنها باشد. امـا، از سوی دیگر باید توجه‌کرد کـه نیروی دافعهٔ پروتونی درصدد است پروتونها رابه‌قسمت بیرونی هسته براند ونیروی نوترون-پروتون هم مایل‌است نوترونها را بـه قسمت درونی هسته بکشاند. این‌کشاکش، نوترونها و پروتونهای هسته را آنچنان درهم می‌آمیزدکه شعاعهای بار و ماده تقریباً باهم برابرمی‌شوند.

۲.۳ جرم نوکلیدها و فراوانی آنها

فهرست مقادیر اندازه‌گیری شدهٔ جرم وفراوانی نسبی اتمهای خنثی را برای انواع هسته‌های پایدار و رادیواکتیو درجدول پیوست ج گردآوری کرده‌ایم. بااینکه توازن انرژی در واپاشیها و واکنشهای هسته‌ای را باید براساس جرمهای هسته‌ای محاسبه کنیم، ولی رسم براین است که جرم اتمهای خنثی را دراین‌گونه جدولها ذکرمی‌کنند. بنابراین، گاهی لازم می‌شود که بادرنظر گرفتن جرم وانرژی بستگی الکترونها این‌مقادیرجرمی راتصحیح کنیم.

ساختار ماده را هرچه ژرفتر درنظر بگیریم، انرژی بستگی سیستم نیز درمقایسه با انرژی سکون بیشترمی‌شود. برای نمونه، انرژی بستگی اتمی هیدروژن برابر ۱۳٫۶ eV و نسبت آن به انرژی سکون کل اتم فقط در حدود $۱٫۴ \times ۱۰^{-۸}$ است. درحالی که در ساده‌ترین هسته یعنی دوتریم، انرژی بستگی برابر ۲٫۲ MeV ونسبت آن به‌انرژی سکون جرم کل آن درحدود $۱٫۲ \times ۱۰^{-۳}$ است. انرژی بستگی دوتریم نسبتاً کم، و بدین‌جهت این عدد در مقایسه با هسته‌های دیگرنسبتاً کوچك است. نسبت انرژی بستگی به انرژی سکون هسته‌های معمولی به‌حدود ۸×۱۰^{-۳} می‌رسد. در بررسی بازهم ژرفتراز ساختار ماده، با سه نوع کوارك سنگین که سازندهٔ نوکلئونها هستند سروکار پیدا می‌کنیم. جرم کوارکها معلوم نیست (هنوز درآزمایش با کوارك آزاد روبه‌رو نشده‌ایم و ممکن است وجود کوارکها در حالت آزاد امکان‌پذیر نباشد)، اما امکان دارد که جرم کوارك از $۱۰۰\ \mathrm{GeV}/c^{۲}$ هم بزرگتر باشد. دراین صورت، نسبت انرژی بستگی کوارکها به‌جرم کل آنها در هرنوکلئون کسری بزرگتراز ۰٫۹۹ خواهد بود ــ یعنی از ترکیب سه کوارك که انرژی سکون کل آنها شاید درحدود ۳۰۰ GeV است نوکلئونی با انرژی سکون حدود ۱ GeV تولید می‌شود!

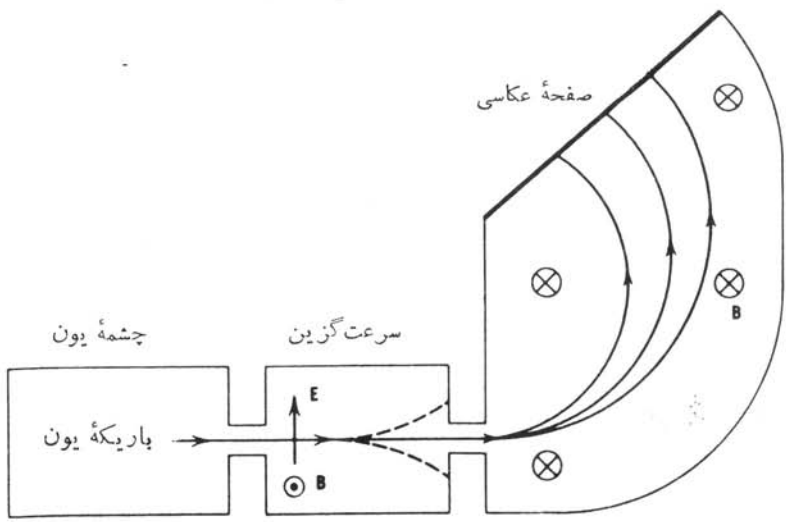
بدین‌گونه، بحث مربوط به‌جرم هسته‌ها ازبحث انرژی بستگی‌هسته‌ای جدایی‌ناپذیر است. درغیراین‌صورت، جرم هسته‌ها به‌شکل $Zm_p + Nm_n$ قابل‌محاسبه می‌شد وموضوعی چندان جالب توجه نبود. دراین بخش، بحث‌مان را به تعیین تجربی جرم هسته‌ها محدود می‌کنیم، وهسته را به‌صورت جسمی ساده وبدون هیچگونه ساختار داخلی درنظرمی‌گیریم. دربخش بعدی، بااستفاده ازجرم هسته‌های اندازه‌گیری‌شده، به‌تعیین انرژی بستگی هسته‌ها می‌پردازیم.

اندازه‌گیری جرم هسته‌ها، در تکامل فیزیك هسته‌ای نقش بسیار مهمی داشته است. طیف‌سنجی جرمی، نخستین تکنیك بادقت بالا بودکه در اختیار آزمایشگران قرار گرفت؛ و چون جرم هسته به‌طور منظم با افزایش یك پروتون یا نوترون افزایش می‌یابد، با اندازه‌گیری جرمها توانسته‌ایم نمودار کاملی از ایزوتوپهای پایدار تهیه کنیم. درحالی که درفیزیك اتمی وضع به‌این صورت نبوده است. اندازه‌گیریهای وزن اتمی متوسط درقرن نوزدهم به‌پیدایش اختلافاتی در جدول تناوبی عناصرمنجرشدکه ازجمله موارد آن، برهم خوردن ترتیب عناصر کبالت و نیکل در جدول بود. وزن کبالت سنگینتر از وزن نیکل به‌دست می‌آمد، درحالی که ترتیب‌استقرار آن درجدول برمبنای عدد اتمی(ونه وزن اتمی)

باید قبل از نیکل باشد. مطلب دیگری که به‌همان درجه از اهمیت است این است که بدون توجیه تغییرات خواص هسته از یك ایزوتوپ به ایزوتوپ دیگر، نمی‌توانیم درك درستی از ساختار هسته‌ای داشته باشیم. بنابراین، پیش از آنکه بـه اندازه‌گیری خواص هسته‌ها بپردازیم، باید انواع ایزوتوپهای موجود را مشخص کنیم و سعی کنیم که آنها را به‌منظور بررسیهای تجربی از یکدیگر جدا سازیم.

برای تعیین جرم هسته‌ها و فراوانی نسبی آنها در نمونه‌ای ازمادهٔ معمولی، با توجه به‌اینکه حتی در یك جسم خالص هم ممکن است مخلوطی از چند ایزوتوپ وجود داشته باشد، باید بتوانیم ایزوتوپها را بـه‌کمك جرمشان از یکدیگر جدا کنیم. اگرمقصود فقط جداسازی ایزوتوپها ازیکدیگر باشد، به‌دستگاهی باحساسیت فوق‌العاده زیاد نیازی نیست. اختلاف جـرم ایزوتوپهای مجـاور در هسته‌های میان ـ وزن در حـدود ۱٪ است. برای اندازه‌گیری جرم بـا مرتبهٔ دقت 10^{-6} به دستگاههای خیلی پیچیده‌تری کـه طیف‌نمای جرمی نامیده می‌شوند نیاز داریم. اگر بتوانیم جرمهای جدا شده را بـه‌صورت تصاویر جداگانه‌ای روی یك صفحهٔ عکاسی متمرکز کنیم، چنین دستگاهی را طیف‌نگار می‌گوییم. هرگاه جرمهای جدا شده پس از عبور ازشکافهای آشکارساز بـه طور الکترونیکی (مثلا به صورت جریان الکتریکی) ثبت شوند، چنین دستگاهی را طیف‌سنج می‌نامند. نمودار ساده‌ای از یك نوع طیف‌نگار جرمی را درشکل ۱۳.۳ نشان داده‌ایم.

اولین قسمت از هر دستگاه طیف‌نمای جرمی، یك چشمهٔ یون است که باریکه‌ای از



شکل ۱۳.۳ نمودارساده‌ای ازطیف‌نگار جرمی. چشمهٔ یون، باریکه‌ای با توزیع سرعت‌گرمایی تولید می‌کند. درناحیهٔ سرعت‌گزین به یونهایی اجازهٔ عبور داده می‌شود که سرعت خاصی داشته باشند (وبقیه مطابق‌شکل منحرف می‌شوند). سپس جرمهای مختلف موجود درباریکه، متناسب باتکانه‌هایشان، درمیدان مغناطیسی یکنواختی منحرف وبدین‌ترتیب قابل شناسایی خواهندشد.

اتمها یا مولکولهای یونیده تولید می‌کند. اغلب برای تولید یون، بخار مادهٔ مورد مطالعه را بااستفاده از الکترون بمباران می‌کنند. در برخی ازحالتها هم یونها را از طریق تخلیهٔ جرقه‌ای بین الکترودهای آغشته به‌مادهٔ موردنظر تولید می‌کنند. سرعت یونهای خارج‌شده از چشمه، هم به سبب توزیع گرمایی و هم به خاطر جرم متفاوت یونها، گسترهٔ وسیعی را در برمی‌گیرد.

قسمت بعدی دستگاه، سرعت‌گزین نام دارد و ناحیه‌ای است که در آن دو میدان متعامد الکتریکی و مغناطیسی وجود دارد. میدان $\mathbf{E}$ بر یون خارج شده از چشمه، نیروی qE وارد می‌کند ومی‌خواهدآن را مطابق شکل۱۳.۳ به‌طرف بالا منحرف کند. اما میدان $\mathbf{B}$ نیروی روبه‌پایین qvB را بر یون وارد خواهد ساخت. اگر این دو نیرو اثر همدیگر را خنثی کنند، آنگاه یونها انحرافی نخواهند داشت و از شکاف خروجی سرعت‌گزین عبور خواهندکرد. دراین‌صورت داریم

$$qE = qvB$$

$$v = \frac{E}{B} \qquad (۱۹.۳)$$

قسمت نهایی این دستگاه تکانه-گزین نام دارد و اساساً از یك میدان مغناطیسی یکنواخت تشکیل شده است که مسیر باریکهٔ ذرات را به صورت دایره‌ای به شعاع r درمی‌آوردکه بزرگی آن به‌مقدار تکانهٔ ذرات بستگی دارد

$$mv = qBr$$

$$r = \frac{mv}{qB} \qquad (۲۰.۳)$$

چون q، B، و v برای تمام ذرات یکسان اختیارشده است، ذرات با جرمهای مختلف شعاعهای متفاوت خواهند داشت. اغلب میدان مغناطیسی در قسمتهای سرعت‌گزین و تکانه‌گزین یکسان اختیار می‌شودکه در این صورت داریم

$$m = \frac{qrB^{۲}}{E} \qquad (۲۱.۳)$$

برای تعیین جرم با دقت یك قسمت در هر $۱۰^{۶}$، باید تمام‌کمیتهای معادلهٔ (۲۱.۳) را با همین دقت دراختیار داشته باشیم‌که احتمال آن خیلی ضعیف است. درعمل مقیاس سنجش را روی یك ذرهٔ خاص تنظیم می‌کنیم، و سپس اندازه‌گیری جرم سایر ذرات را نسبت به‌آن انجام می‌دهیم. نقطهٔ ثابت درمقیاس جرم اتمی ^{۱۲}C است‌که جرم اتمی آن را دقیقاً برابر ۱۲٫۰۰۰۰۰۰ u اختیار می‌کنیم. برای تعیین جرم اتمهای دیگری مانند ^{۱}H لازم است‌که E و B رابه‌میزان قابل‌توجهی تغییردهیم. پس اینکه درجه‌بندی مقیاس

سنجش درچنین گستره‌ای باهمان دقت یك قسمت در 10^6 معتبر بماند، می‌تواند محل تردید باشد. اما بهتر است که اندازه‌گیری را به‌تعیین اختلاف میان جرمهای تقریباً یکسان محدود کنیم. برای نمونه، دستگاه را برای جرم ۱۲۸ تنظیم می‌کنیم و اختلاف جرم بین مولکولهای C_9H_{20} (نونان) و $C_{10}H_8$ (نفتالین) را به‌دست می‌آوریم. این اختلاف جرم به صورت $\Delta = 0.093900032 \pm 0.000000012\ u$ اندازه‌گیری می‌شود. با صرفنظر کردن ازاختلاف انرژی بستگی مولکولی این دو مولکول (که از مرتبهٔ $10^{-9}\ u$ است)، می‌توان نوشت

$$\Delta = m(C_9H_{20}) - m(C_{10}H_8) = 12m(^1H) - m(^{12}C)$$

پس خواهیم داشت

$$m(^1H) = \frac{1}{12}[m(^{12}C) + \Delta]$$

$$= 1.000000000 + \frac{1}{12}\Delta$$

$$= 1.007825003 \pm 0.000000001\ u$$

با در دست داشتن این مقدار دقیق جرم هیدروژن، اکنون می‌توانیم دستگاه طیف‌سنج را برای جرم ۲۸ تنظیم کنیم و به‌تعیین اختلاف بین C_2H_4 و N_2 بپردازیم

$$\Delta = m(C_2H_4) - m(N_2) = 2m(^{12}C) + 4m(^1H) - 2m(^{14}N)$$

$$= 0.025152196 \pm 0.000000030\ u$$

که از آن حاصل می‌شود

$$m(^{14}N) = m(^{12}C) + 2m(^1H) - \frac{1}{2}\Delta = 14.003073966 \pm 0.000000002\ u$$

این روش اندازه‌گیری اختلاف جرم بین جرمهای خیلی نزدیك به هم را روش دوتایهٔ جرمی می‌نامند، و همچنانکه دیده می‌شود، با استفاده از آن مقادیرجرم را با دقت فوق‌العاده زیاد به‌دست آوردند. بویژه توجه کنید که خطای ۱ قسمت در 10^6 دراندازه‌گیری Δ، به‌خطاهایی ازمرتبهٔ ۱ قسمت در 10^8 یا 10^9 درجرمهای اتمی تبدیل می‌شود.

با اندازه‌گیری انرژی ذرات در واکنشهای هسته‌ای هم می‌توان اختلاف جرمها را تعیین کرد. واکنش هسته‌ای $x + X \rightarrow y + Y$ را در نظر می‌گیریم که درآن ذرهٔ بمباران‌کنندهٔ x برهدف ساکن X فرود می‌آید. با اندازه‌گیری انرژی ذرات درگیردر واکنش، می‌توان اختلاف جرمها راکه مقدار Q واکنش نامیده می‌شود تعیین کرد

$$Q=[m(\mathrm{x})+m(\mathrm{X})-m(\mathrm{y})-m(\mathrm{Y})]c^{2} \qquad (۲۲.۳)$$

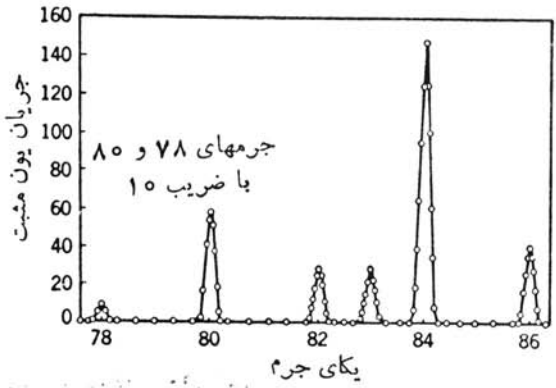
مقدار Q واکنش را در بخش ۲.۱۱ (جلددوم، ترجمهٔ فارسی) به‌تفصیل بررسی خواهیم کرد. به عنوان نمونه، واکنش $^{1}\mathrm{H}+{}^{14}\mathrm{N}\rightarrow{}^{12}\mathrm{N}+{}^{3}\mathrm{H}$ را در نظر می‌گیریم. با توجه به اندازه‌گیریهای دوتایهٔ جرمی می‌دانیم: $m(^{1}\mathrm{H})=1{,}007825\ \mathrm{u}$، $m(^{14}\mathrm{N})=14{,}003074\ \mathrm{u}$، و $m(^{3}\mathrm{H})=3{,}016049\ \mathrm{u}$. مقدار اندازه‌گیری شدهٔ Q عبارت است از $-22{,}1355\pm0{,}0010\ \mathrm{MeV}$. پس با استفاده از این اطلاعات به‌دست می‌آید

$$m(^{12}\mathrm{N})=m(^{1}\mathrm{H})+m(^{14}\mathrm{N})-m(^{3}\mathrm{H})-\frac{Q}{c^{2}}$$

$$=12{,}018613\pm0{,}000001\ \mathrm{u}$$

بخش عمدهٔ خطای موجود درجرم تعیین شده ازخطای Q ناشی می‌شود، زیرا جرمهای $^{1}\mathrm{H}$، $^{3}\mathrm{H}$، و $^{14}\mathrm{N}$ را بادقتی خیلی بالاتر در دست داریم. نوکلید $^{12}\mathrm{N}$ ناپایدار است و با نیمه‌عمری درحدود $0{,}01\ \mathrm{s}$ واپاشیده می‌شود، یعنی طول عمر آن به‌قدری کوتاه است که اندازه‌گیری جرم آن با استفاده از طیف‌سنج جرمی امکان‌پذیر نیست. اما به کمك روش واکنش هسته‌ای، تعیین جرم نوکلیدهای ناپایداری که جرمشان به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست نیز امکان‌پذیر می‌شود.

فراوانی نوکلیدها. با استفاده از طیف‌سنج جرمی، فراوانی نسبی ایزوتوپهای مختلف یك عنصر را نیز می‌توان اندازه‌گیری کرد. اگر در شکل ۱۳.۳ به‌جای صفحهٔ عکاسی یك صفحهٔ شکاف‌دار قرار دهیم، با تغییر مقادیر E یا B و اندازه‌گیری جریان گذرنده از شکاف می‌توان جرم ذرات مختلف موجود در باریکه را مورد بررسی قرار داد، و نتایجی مطابق شکل ۱۴.۳ به‌دست آورد. دراین شکل، با توجه به مساحت نسبی قله‌ها می‌توان فراوانی ایزوتوپهای پایدار کریپتون را به‌شرح زیر تعیین کرد



شکل ۱۴.۳ نمونه‌ای ازطیف جرمی کریپتون. برای آنکه قله‌های مربوط به‌جرمهای ۷۸ و ۸۰ با قله‌های دیگر قابل مقایسه باشد، باید مقیاس محور قائم آنها برعدد ۱۰ تقسیم شود.

^{78}Kr ٪۰٫۳۵۶ ^{83}Kr ٪۱۱٫۵
^{80}Kr ٪۲٫۲۷ ^{84}Kr ٪۵۷٫۰
^{82}Kr ٪۱۱٫۶ ^{86}Kr ٪۱۷٫۳

جرمهایی که در این بررسی ظاهر نشده‌اند (^{79}Kr، ^{81}Kr، ^{85}Kr، وهمچنین ایزوتوپهای پایینتراز ^{78}Kr و بالاتراز ^{86}Kr) رادیواکتیوهستند و در کریپتون طبیعی دیده نمی‌شوند. هر نمونه‌ای از کریپتون طبیعی، مخلوطی است ازاین شش ایزوتوپ پایدار که فراوانی نسبی هریك ازآنها نیز درجدول فوق مشخص شده است. اگر جرم اندازه‌گیری‌شدهٔ این شش ایزوتوپ را بااحتساب فراوانی هریك ازآنها به‌عنوان ضریب وزن نسبی باهم جمع کنیم، جرم اتمی «متوسط» کریپتون به‌دست می آید

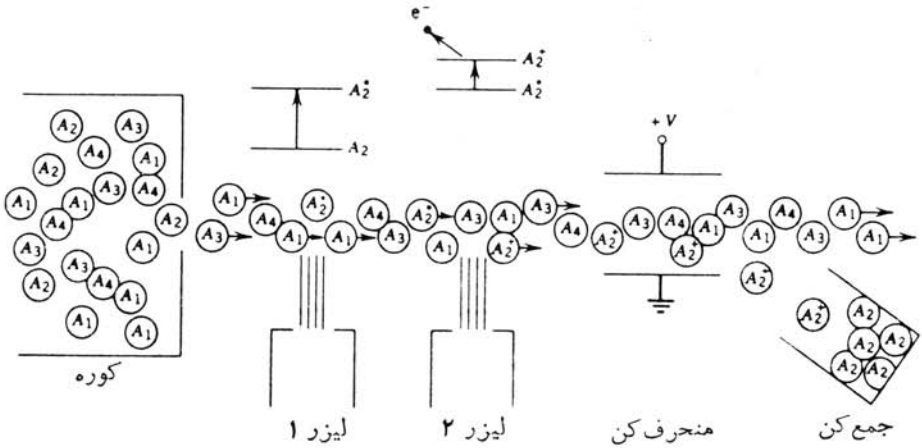
$$\bar{m} = ۰٫۰۰۳۵۶m(^{78}Kr) + ۰٫۰۲۲۷m(^{80}Kr) + \cdots$$
$$= ۸۳٫۸\ u$$

که‌همان جرم اتمی پذیرفته شدهٔ Kr است که معمولا درجدول تناوبی عناصر درج می‌شود.

جداسازی ایزوتوپها. اگر طیف‌سنج جرمی را روی یك جرم منفردتنظیم کنیم و به جمع‌آوری ایزوتوپ خاصی بپردازیم، پس ازمدتی می‌توانیم مقدار قابل توجهی از یك نوع ایزوتوپ را برای بررسیهای آزمایشگاهی در اختیار داشته باشیم. بعضی از طیف‌سنجهای جرمی را چنان طراحی می‌کنندکه به‌کمك آنها بتوان‌کار فرایش وجداسازی مقادیرعظیمی از مواد را انجام داد (این کارایی به‌قیمت ازدست رفتن برخی ویژگیهای دیگردستگاه ازجمله توان تفکیك جرمی‌آن تمام می‌شود). این‌گونه دستگاههای جداسازی ایزوتوپها (که نمونه‌ای ازآن درآزمایشگاه ملی «اوك‌ریج» درایالات متحدهٔ امریکا وجود دارد) برای مقاصد متنوع به‌کار می‌روند. ایزوتوپهای جداشده‌ای‌که در این مراکز تهیه می‌شوند، نه‌تنها در فیزیك هسته‌ای بلکه در زمینه‌های دیگری مانند شیمی یا زیست‌شناسی نیز کاربرد دارند. در فیزیك هسته‌ای، با استفاده از ایزوتوپهای جداشده می‌توان خواص مشخصی همچون سطح مقطع واکنشها را اندازه‌گیری‌کرد. به‌عنوان نمونه‌ای ازکاربرد در زمینه‌های دیگر، می‌توان به‌جذب مواد غذایی درگیاهان وجانشینی ایزوتوپهای پایداراین موادباایزوتوپهای رادیواکتیو ردیاب اشاره‌کرد. می‌دانیم که‌کربن معمولی به‌نسبت حدود ٪۹۹ از ^{12}C و ٪۱ از ^{13}C، ونیتروژن به‌نسبت ٪۹۹٫۶ از ^{14}N و ٪۰٫۴ از ^{15}N تشکیل شده است. اگر یك نوع‌گیاه را با جوی از گاز CO_2 که از ایزوتوپهای ^{13}C ساخته شده است احاطه کنیم، وآن را با کود حاوی ^{15}N (به‌جای ^{14}N) پرورش دهیم، دراین صورت نحوهٔ جذب این ایزوتوپها در این گیاه برای ما قابل مطالعه خواهد شد. نیمهٔ‌عمر مربوط به‌دراز ـ عمرترین ایزوتوپ نیتروژن درحدود ۱۰دقیقه است، پس‌مطالعهٔ درازمدت بااستفاده از ردیابهای‌رادیواکتیو امکان‌پذیر نیست. همچنین باید توجه‌داشت‌که واپاشیهای رادیواکتیو ممکن است اثرات نامطلوبی برگیاه و اشخاصی که با آن سروکار دارند، برجای بگذارد.

جداسازی لیزری ایزوتوپها. دریکی ازروشهای‌کاملا متفاوت جداسازی ایزوتوپها،

از باریکه‌های لیـزری فوق‌العاده تکفام استفاده می‌شود. چنانکه در بخش قبلـی دیدیم، تابشهای اپتیکی نـاشی از ایزوتوپهای مختلف یك عنصر انرژی دقیقـاً یکسانی ندارند. اختلاف اندازهٔ هسته‌ها باعث تغییراتی درانرژیهای گذار می‌شود که بـه انتقال ایزوتوپی معروف است. تکفامی باریکه‌های لیزری به حدی دقیق است کـه به‌کمك ایـن باریکه‌ها می‌توان در مخلوطی از ایزوتوپها الکترونهای ایزوتوپ خاصی را بـه حالت برانگیخته درآورد. چگونگی ایـن فرایند جداسازی را به طور ساده درشکل ۱۵.۳ نشان داده‌ایم. بسامد باریکهٔ لیزر اول را چنان تنظیم می‌کنیم کـه توسط الکترونهای ایزوتوپ موردنظر (و نه الکترونهای ایزوتوپهای دیگر) قابل جذب باشد. در حالی‌که باریکه‌ای از اتمهای خنثی از مقابل باریکهٔ لیزر عبور می‌کند، ایزوتوپهای مورد نظر با جذب فوتونهای لیزر به‌حالت برانگیخته درمی‌آیند. باریکهٔ لیزر دوم را روی چنان طول موجی تنظیم می‌کنیم که بتواند اتمهای برانگیخته را یونیده کند. چـون حالتهای انـرژی نهایی الکترونهای آزاد غیرکوانتومی و پیوسته است، گسترهٔ انرژی لیزر دوم باید پهن و پیوسته باشد. اما این امر به‌یونش ایزوتوپهای ناخواسته نخواهد انجامید، زیرا فقط اتمهایی‌که دراثر لیزر اول برانگیخته شده‌اند دارای حالتهای برانگیخته‌اند. اتمهای موجـود در باریکهٔ اتمی، پس‌ازعبور ازمقابل لیزردوم، به‌صورت اتمهای یونیدهٔ یکی از ایزوتوپها واتمهای خنثای



شکل ۱۵.۳ جداسازی لیزری ایزوتوپها. باریکهٔ اتمهـای خنثای خارج‌شده از کـوره شامل چهارنوع ایزوتوپ A_1، A_2، A_3، و A_4 است. لیزر اول چنان تنظیم شده‌است‌که باگذارخاصی از ایزوتوپ A_2 درحال تشدید است. به‌خاطرتکفامی انرژی لیزر ومتفاوت بودن انرژی‌گذار درایزوتوپهای دیگر، فقط اتمهای A_2 به‌حالت برانگیخته درمی‌آیند. لیزر دوم‌گسترهٔ انرژی پهنی دارد، ومی‌تواند تعداد زیادی ازاتمهای برانگیختهٔ A_2 را به‌حالت انرژی‌آزاد برساند. اما چون فقط اتمهای A_2 در حـالت برانگیخته‌اند، فقـط همین اتمها یونیده می‌شوند. سپس یونهای A_2 را درمیدان الکتریکی منحرف و جمع‌آوری می‌کنند.

ایزوتوپهای دیگر خواهد بود. بدین ترتیب، اتمهای یونیدهٔ موجود در باریکه را می‌توان به‌کمك یك میدان الکتریکی منحرف و به‌طور جداگانه جمع آوری کرد.

۳.۳ انرژی بستگی هسته‌ای

انرژی متناظر به جرم هر نوکلید، $m_N c^2$، عبارت است ازحاصل تفریق انرژی جرم اتمی آن نوکلید $m_A c^2$ و انرژی جرمی Z الکترون وانرژی بستگی الکترونی کل آن

$$m_N c^2 = m_A c^2 - Z m_e c^2 + \sum_{i=1}^{Z} B_i \qquad (۲۳.۳)$$

که درآن B_i انرژی بستگی iامین الکترون‌است. انرژی بستگی الکترونی دراتمهای سنگین ازمرتبهٔ 10^5 تا $100\ \mathrm{keV}$ است، درحالی‌که انرژی جرم‌اتمی‌ازمرتبهٔ $A \times 1000\mathrm{MeV}$ است. بنابراین با دقت حدود ۱ قسمت در 10^6 می‌توان از آخرین جملهٔ معادلهٔ (۲۳.۳) صرفنظر کرد. (وجود این جمله، حتی به‌میزان 10^{-6} هم دراندازه‌گیریهای فیزیك هسته‌ای تأثیرندارد، زیرا در انرژیهای جرمی معمولا بـا اختلافات سروکار داریم. مثلا در تعیین انرژی واپاشی یا انرژی واکنش، انرژیهای بستگی الکترونی تأثیری درمحاسبهٔ اختلافات نخواهند داشت.)

انرژی بستگی B یك هسته عبارت است از اختلاف انرژی بین جرم هستهٔ ${}^A_Z\mathrm{X}_N$ و جرم‌کل پروتونها (Z پروتون) و نوترونهای تشکیل دهندهٔ آن (N نوترون)

$$B = \{Z m_p + N m_n - [m({}^A\mathrm{X}) - Z m_e]\} c^2 \qquad (۲۴.۳)$$

که درآن شاخص پایین جرم اتمی m_A را حذف کرده‌ایم. ازاین پس همیشه دراین‌گونه روابط از جـرم اتمی استفاده می‌کنیم، مگر آنکـه مورد خاصی را به صورت دیگـری متذکرشویم.

اگرمجموع جرم Z پروتون و Z الکترون را به‌صورت جرم Z اتم خنثای هیدروژن درنظر گیریم، معادلهٔ (۲۴.۳) چنین می‌شود

$$B = [Z m({}^1\mathrm{H}) + N m_n - m({}^A\mathrm{X})] c^2 \qquad (۲۵.۳)$$

با توجه به‌اینکه جرمها معمولا برحسب یکای جرم اتمی بیان می‌شوند، بهتراست‌که ضریب تبدیل c^2 را به‌صورت $c^2 = 931.50\ \mathrm{MeV/u}$ درنظر بگیریم.

گاهی با جدولهایی از جرم اتمی روبه‌رو می‌شویم که درآنها، به جای جرم اتمی $m({}^A\mathrm{X})$، کاستی جرم $\Delta = (m - A)c^2$ درج شده است. با در دست داشتن کاستی جرم و استفاده ازمعادلهٔ (۲۵.۳)، جرم اتمی را می‌توان تعیین کرد.

انرژی جداسازی پروتون ونوترون هم ازجمله اطلاعات مفید دیگری‌است‌که اغلب درجداول خواص هسته‌ای با آنها برخورد می‌کنیم. انرژی جداسازی نوترون S_n درهستهٔ

${}^{A}_{Z}X_N$ عبارت است ازمقدار انرژی لازم برای دور کردن یك نوترون ازاین هسته و برابر است با اختلاف انرژیهای بستگی بین ${}^{A}_{Z}X_N$ و ${}^{A-1}_{Z}X_{N-1}$

$$S_n = B({}^{A}_{Z}X_N) - B({}^{A-1}_{Z}X_{N-1})$$
$$= [m({}^{A-1}_{Z}X_{N-1}) - m({}^{A}_{Z}X_N) + m_n]c^2 \qquad (۲۶.۳)$$

به‌همین‌ترتیب، انرژی جداسازی پروتون S_p رابه‌صورت انرژی لازم برای دور کردن یك پروتون از هسته تعریف می‌کنیم

$$S_p = B({}^{A}_{Z}X_N) - B({}^{A-1}_{Z-1}X_N)$$
$$= [m({}^{A-1}_{Z-1}X_N) - m({}^{A}_{Z}X_N) + m({}^{1}H)]c^2 \qquad (۲۷.۳)$$

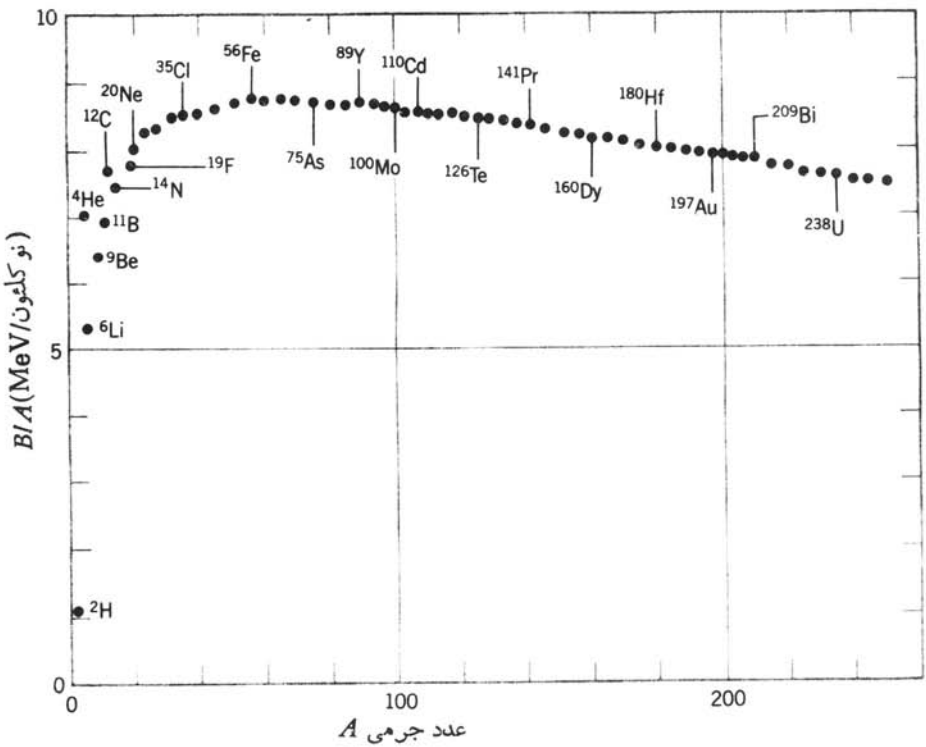
دراین معادله، به‌جای پروتون، جرم هیدروژن را قرارداده‌ایم. چون همیشه دراین روابط با جرمهای اتمی سروکار داریم، به‌آسانی می‌توان نحوهٔ حذف شدن جرم Z الکترون را درمعادلات (۲۶.۳) و (۲۷.۳) نشان داد.

انرژی جداسازی نوترون و پروتون در فیزیك هسته‌ای با انرژی یونش در فیزیك اتمی‌مشابهت دارد، یعنی‌مقدار آن میزان بستگی بیرونی‌ترین نوکلئون (یا نوکلئون‌ظرفیت) را به هسته نشان می‌دهد. انرژی جداسازی هم، درست مانند انرژی یونش دراتمها، بر ساختار پوسته‌ای هسته‌ها دلالت می‌کندکه مشابه ساختار پوسته‌ای اتمهاست. ازاین‌رو، ما بحث دربارهٔ انرژیهای جداسازی را به بحث مدلهای هسته‌ای درفصل ۵ موکول می‌کنیم. نمونه‌هایی ازمقادیرکاستی جرم وانرژی جداسازی را درجدول ۱.۳ نشان داده‌ایم.

همچنانکه دربسیاری ازموارد خواص هسته‌ای خواهیم دید، با بررسی نظم وترتیب انرژی بستگی هسته‌ها می‌توان مدارك ارزنده‌ای از ساختار هسته‌ای به‌دست آورد. چون انرژی بستگی کم و بیش به‌طور خطی برحسب A افزایش می‌یابد، عموماً درعمل انرژی بستگی متوسط هر نوکلئون، یعنی B/A، را به صورت تابعی از A نشان می‌دهند. در شکل ۱۶.۳ تغییرات B/A را برحسب عدد نوکلئونی نشان داده‌ایم. دراین شکل، چند ویژگی مهم مربوط به‌هسته‌ها جلب‌توجه می‌کند. نخست اینکه منحنی جزدرناحیهٔ هسته‌های بسیار سبك، مقدار نسبتاً ثابتی را نشان می‌دهد. انرژی بستگی متوسط بسیاری از هسته‌ها، با تقریب ۱۰٪، درحدود ۸ MeV برای هرنوکلئون است. دوم اینکه منحنی در نزدیکی $A=60$ قلهٔ پهنی دارد و درهمین ناحیه است‌که بستگی هسته‌ای به‌حداکثرمی‌رسد. وجود این قله بدان معنی است‌که به‌دو طریق می‌توان به «تولید» (یا آزادسازی) انرژی دست یافت: درنواحی پایینتراز $A=60$ از طریق ترکیب هسته‌های سبك و تشکیل هسته‌های سنگینتر، و در نواحی بالاتراز $A=60$ ازطریق شکستن هسته‌های سنگین و تبدیل آنها به‌هسته‌های سبکتر. در هردو صورت باید «ازمنحنی انرژی بستگی بالا رفت» که این امر به آزادسازی انرژی هسته‌ای منجر می‌شود. روش اول را همجوشی هسته‌ای (یا گداخت

جدول ۱۰۳ نمونه‌هایی ازمقادیرکاستی جرم وانرژی جداسازی.

نوکلید	Δ(MeV)	S_n(MeV)	S_p(MeV)
^{16}O	−۴٫۷۳۷	۱۵٫۶۶	۱۲٫۱۳
^{17}O	−۰٫۸۱۰	۴٫۱۴	۱۳٫۷۸
^{17}F	+۱٫۹۵۲	۱۶٫۸۱	۰٫۶۰
^{40}Ca	−۳۴٫۸۴۷	۱۵٫۶۴	۸٫۳۳
^{41}Ca	−۳۵٫۱۳۸	۸٫۳۶	۸٫۸۹
^{41}Sc	−۲۸٫۶۴۴	۱۶٫۱۹	۱٫۰۹
^{208}Pb	−۲۱٫۷۵۹	۷٫۳۷	۸٫۰۱
^{209}Pb	−۱۷٫۶۲۴	۳٫۹۴	۸٫۱۵
^{209}Bi	−۱۸٫۲۶۸	۷٫۴۶	۳٫۸۰



شکل ۱۶۰۳ انرژی بستگی هرنوکلئون درهسته.

هسته‌ای) و روش دوم را شکافت هسته‌ای می‌نامند. این موضوعات مهم را در فصلهای ۱۳ و ۱۴ (جلد دوم، ترجمهٔ فارسی) بررسی خواهیم کرد.

تلاش برای درك منحنی انرژی بستگی به فرمول نیمه تجربی جرم منتهی می‌شود که در طی آن با استفاده از چند پارامتر کلی، سعی می‌کنیم کـه تغییرات B را بـرحسب A توضیح دهیم.

بدیهی‌ترین جمله‌ای که دربراورد عبارت B/A باید درنظر گرفت جملهٔ ثابت‌است، زیرا درتمام موارد داریم $B \propto A$. بنابراین، سهم این‌جملهٔ «حجمی» را درانرژی بستگی به‌صورت $B = a_v A$ می‌نویسیم که در آن a_v مقدارثابت قابل تعیین است (مقدارآن باید درحدود $8\,\mathrm{MeV}$ باشد). این بستگی خطی بین BوA که درواقع تاحدودی شگفت‌انگیز است، درجهت شناخت خواص نیروی هسته‌ای اولین رهنمودی است که دراختیار ما قرار می‌گیرد. اگرهرنوکلئونی همهٔ نوکلئونهای دیگرموجود در هسته را جذب می‌کرد، آنگاه انرژی بستگی باید متناسب با $A(A-1)$ یا به‌تقریب متناسب بـا A^2 می‌شد. چـون B به‌طور خطی برحسب A تغییر می‌کند، این بدان معنی است کـه هر نوکلئون در هسته فقط نزدیکترین نوکلئونهای‌اطرافش را جذب می‌کند وهمهٔ نوکلئونهای دیگرراجذب نمی‌کند. با توجه به پراکندگی الکترون می‌دانیم چگالی هسته‌ای تقریبـاً ثابت است، یعنی تعـداد نوکلئونهای موجود در اطراف هـر نوکلئون تقریبـاً ثابت می‌ماند. بدین ترتیب، نتیجه می‌گیریم که سهم هر نوکلئون درانرژی بستگی هسته به‌تقریب مقداری ثابت است.

نوکلئونی که درسطح هسته قرارگرفته است از شمول حکم فوق مستثنی است، زیرا چنین نوکلئونی را همسایه‌های کمتری احاطه‌کرده‌اند و به‌همین دلیـل بستگی آن به هسته از نوکلئونهای مرکزی کمتراست. سهم نوکلئونهای سطحی درانرژی بستگی B بـه‌همان میزان نوکلئونهای مرکزی نیست، وچون در رابطهٔ $B = a_v A$ این نکته درنظر گرفته نشده است، مقدار B درآن بیش ازحد لازم براورد شده است. بنابراین، ازاین مقدار B باید جمله‌ای را کـه متناسب با مساحت سطح هسته است‌کم‌کنیم. چون شعاع هسته $R \propto A^{1/3}$ است، مساحت سطح هسته متناسب بـا R^2 یا $A^{2/3}$ می‌شود. بنابراین، سهم نوکلئونهای سطحی هسته را درانرژی بستگی باید به‌صورت $-a_s A^{2/3}$ درنظر گرفت.

در فرمول انـرژی بستگی، دافعهٔ کـولنی پروتونها را نیز باید درنظر بگیریم که این مؤلفه هم درجهت تضعیف انرژی بستگی هسته عمـل می‌کند. چون هر پروتون همـهٔ پروتونهای موجود در هسته را دفع می‌کند، این جمله متناسب بـا $Z(Z-1)$ می‌شود که بافرض هسته به‌شکل کـرهٔ باردار یکنواخت، مقدار دقیق این جمله را می‌توان به صورت $-(3/5)(e^2/4\pi\varepsilon_0 R_0)Z(Z-1)/A^{1/3}$ محاسبه کرد که درآن علامت‌منفی به‌معنی‌کاهش انرژی بستگی دراثراین جمله است. با درنظر گرفتن $R_0 = 1{,}2\,\mathrm{fm}$، مقـدار ثابت این جمله برابر $0{,}72\,\mathrm{MeV}$ به‌دست می‌آیدکه با جانشین کردن آن با یك ثابت کولنی کلی a_c می‌توان آن را به‌شکل ساده‌تر نوشت.

همچنین، باتوجه به‌چگونگی توزیع ایزوتوپهای پایدار و رادیواکتیو (شکل ۱۰۱)،

می‌دانیم که در هسته‌های پایدار $Z \simeq A/2$ است. (توضیح این خاصیت هسته‌ای را در بحث مدل پوسته‌ای درفصل ۵ خواهیم دید.) اگر بخواهیم فرمول انرژی بستگی توصیف واقع‌بینانه‌ای از هسته‌های پایدار به دست بدهد، خاصیت $Z \simeq A/2$ هم باید درآن درنظر گرفته‌شود. (درغیر این‌صورت، بنا بر پیش‌بینی این‌فرمول، وجود ایزوتوپهای پایدار هیدروژن با صدها نوترون هم امکان‌پذیر می‌شود!) این‌جملهٔ انرژی بستگی، برای هسته‌های سبك که درآنها رابطهٔ $Z \simeq A/2$ بیشتر رعایت می‌شود، اهمیت زیادی دارد. این جمله درهسته‌های سنگین اهمیت کمتری دارد، زیرا افزایش مربع دافعهٔ کولنی مستلزم نوترونهای اضافی است تا به‌این وسیله پایداری هسته تضمین شود. این جمله را که به خاطر تأثیرش درمتقارن نگه‌داشتن هسته ازلحاظ تعداد پروتونها و نوترونها جملهٔ تقارن نامیده می‌شود، می‌توان به‌صورت $-a_{\mathrm{sym}}(A-2Z)^2/A$ نوشت که شکل آن‌هم به‌علت ترجیح هسته‌های متقارن ($Z=A/2$) وهم به‌علت کاهش وزن درموارد A بزرگ، قابل قبول است.

سرانجام، جملهٔ دیگری را هم باید درنظر بگیریم که تمایل نوکلئونهای مشابه را به‌تشکیل زوج و تحکیم پیکربندی پایدار هسته‌ای نشان دهد. هنگامی که با تعداد فرد نوکلئونها (Z فرد و N زوج، یا Z زوج و N فرد) سروکار داشته‌باشیم، این جمله نقشی درانرژی بستگی ندارد. اما اگر ZوN هردو فرد باشند، انرژی بستگی هسته باتبدیل یکی از پروتونهای فرد به‌نوترون (یا برعکس) و قابلیت تزویج نوترون جدید با نوترونی که درهسته به‌صورت منفرد باقی مانده بود افزایش خواهد یافت. صرفاً با توجه به هسته‌های پایداری که درطبیعت یافت می‌شوند، می‌توان شواهدی دال بر وجود نیروی تزویج در هسته‌ها به‌دست‌آورد. تعداد هسته‌های با ZوNفرد درطبیعت فقط چهارتاست (^{2}H، ^{6}Li، ^{10}B، ^{14}N)، ولی تعداد هسته‌های با ZوNزوج ۱۶۷ تاست. انرژی تزویج δ را معمولا برای ZوN زوج به‌صورت $+a_{\mathrm{p}}A^{-3/4}$، برای Z و N فرد به‌صورت $-a_{\mathrm{p}}A^{-3/4}$، و برای A فرد برابرصفردر نظرمی‌گیریم.

از ترکیب تمام این پنج جمله، فرمول کامل انرژی بستگی به‌صورت زیر به دست می‌آید

$$B = a_{\mathrm{v}}A - a_{\mathrm{s}}A^{2/3} - a_{\mathrm{c}}Z(Z-1)A^{-1/3} - a_{\mathrm{sym}}\frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta \qquad (۲۸.۳)$$

و با به‌کاربردن این انرژی بستگی، فرمول نیمه‌تجربی جرم را چنین به‌دست می‌آوریم

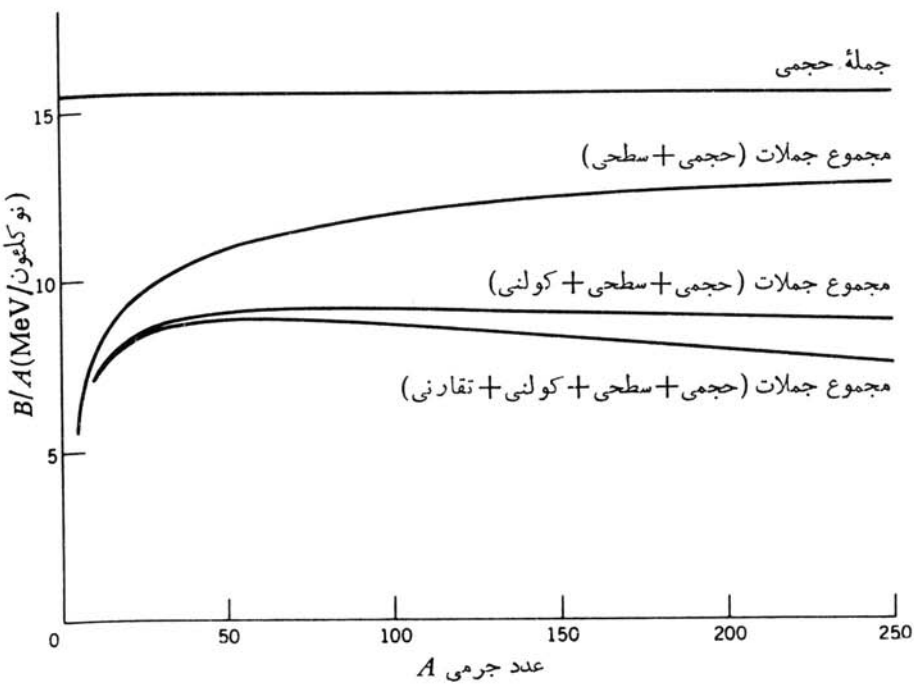
$$M(Z, A) = Zm(^1\mathrm{H}) + Nm_{\mathrm{n}} - \frac{B(Z, A)}{c^2} \qquad (۲۹.۳)$$

ضرایب ثابت را باید چنان انتخاب کرد که حداکثر سازگاری بین این فرمول و منحنی تجربی شکل ۱۶.۳ حاصل شود. گزینش خاصی از این مقادیر ثابت به صورت

$a_v = ۱۵٫۵\ \mathrm{MeV}$، $a_s = ۱۶٫۸\ \mathrm{MeV}$، $a_c = ۰٫۷۲\ \mathrm{MeV}$، $a_{sym} = ۲۳\ \mathrm{MeV}$، و $a_p = ۳۴\ \mathrm{MeV}$ است که منحنی نمایش هر یك از جملات حاصل از این مقادیر و همچنین نتیجهٔ جمعی آنها را که چگونگی تغییرات B را نسبتاً خوب پیش‌بینی می‌کند، در شکل ۱۷.۳ نشان داده‌ایم.

اهمیت فرمول نیمه تجربی جرم در این نیست که با استفاده از آن بتوانیم هر پدیدهٔ جدید یا عجیب و غریبی را در فیزیك هسته‌ای پیش‌بینی کنیم. بلکه این فرمول را باید نخستین تلاش در کاربرد مدلهای هسته‌ای برای درك رفتار قانونمند یکی از خواص هسته که در این مورد همان انرژی بستگی است، تلقی کرد. این فرمول متضمن چند نوع مدل هسته‌ای مختلف است: مدل قطره مایع که در آن برخی از ویژگیهای جمعی و بزرگ ـ مقیاس هسته‌ها به‌شیوه‌ای مشابه با محاسبات قطره مایع در نظر گرفته می‌شود (در واقع، سه جملهٔ اول معادلهٔ (۲۸.۳) در محاسبهٔ انرژی یك قطره مایع باردار هم ظاهر می‌شود)؛ و مدل پوسته‌ای که بیشتر با تك‌تك نوکلئونها سروکاردارد [دوجملهٔ آخر معادلهٔ (۲۸.۳) با استفاده از این مدل قابل محاسبه است].

در معادلهٔ (۲۹.۳) به‌ازای یك مقدار ثابت A، نمودار تغییرات M برحسب Z به‌صورت سهمی است. مرکز این سهمی در همان نقطه‌ای است که مقدار معادلهٔ (۲۹.۳)



شکل ۱۷.۳ سهم هریك ازجملات موجود درفرمول نیمه‌تجربی جرم دربازسازی انرژی بستگی متوسط نوکلئونها.

به‌کمینه می‌رسد. برای مقایسهٔ این نتیجه با طرز رفتار هسته‌های واقعی باید محل کمینه را با قراردادن $\partial M/\partial Z = 0$ به‌دست آورد

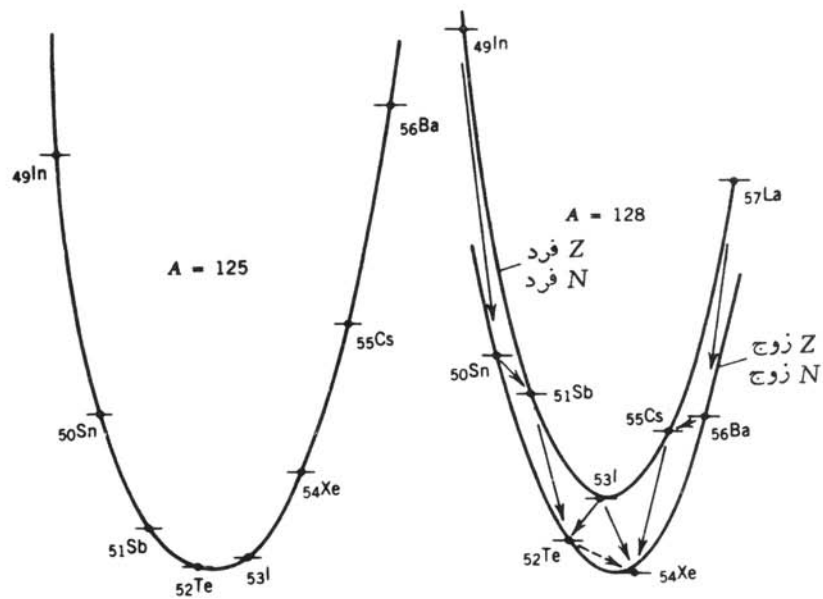
$$Z_{\min} = \frac{[m_n - m(^1\mathrm{H})] + a_c A^{-1/3} + 4a_{\mathrm{sym}}}{2a_c A^{-1/3} + 8a_{\mathrm{sym}} A^{-1}} \qquad (۳۰.۳)$$

با قراردادن $a_c = 0.72\ \mathrm{MeV}$ و $a_{\mathrm{sym}} = 23\ \mathrm{MeV}$، دو جملهٔ اول صورت کسر فوق قابل صرفنظرمی‌شوند، و بنابراین داریم

$$Z_{\min} \simeq \frac{A}{2}\,\frac{1}{1+(1/4)A^{2/3}a_c/a_{\mathrm{sym}}} \qquad (۳۱.۳)$$

برای مقادیر کوچك A چنانکه انتظار می‌رود $Z_{\min} \simeq A/2$ می‌شود، اما برای مقادیر بزرگ A داریم $Z_{\min} < A/2$. برای هسته‌های سنگین، با توجه به معادلهٔ (۳۱.۳) خواهیم‌داشت $Z/A \simeq 0.41$ که با مقادیرمتناظر به‌هسته‌های پایدارسنگین سازگاراست.

نمونه‌ای از زنجیرهٔ واپاشی A فرد را برای $A = 125$ در شکل ۱۸.۳ نشان



شکل ۱۸.۳ زنجیره‌های جرمی برای دو دسته از ایزومرهای $A = 125$ و $A = 128$. در مورد $A = 125$ اختلاف انرژی بین ایزوتوپهای مجاور و افزایش آن، دراثردورشدن از عضو پایدار زنجیره، درخور توجه است. در مورد $A = 128$ به تأثیر جملهٔ تزویجی توجه کنید. ایزوتوپ $^{128}\mathrm{I}$ می‌تواند به‌دو طریق واپاشیده شود. ازنقطه‌نظرانرژی این امکان وجود داردکه $^{128}\mathrm{Te}$ دراثرفرایندی به‌نام واپاشی دوبتایی مستقیماً به $^{128}\mathrm{Xe}$ تبدیل شود.

داده‌ایم که عنصر پایدار پایانی آن هسته‌ای با $Z=۵۲$ است. هسته‌های ناپایدار این زنجیره، از طریق تبدیل یك نوترون به‌یك پروتون یا تبدیل یك پروتون بـه یك نوترون و درطـی واپاشی رادیواکتیو بتازا، به طرف هستهٔ پایدار نزدیك می‌شوند. توجه کنید که هرچه از موضع پایداری دورتر می‌رویم، مقدار انرژی واپاشی (که ازاختلاف جرم بین ایزوبارهای مجاور حاصل می‌شود) افزایش می‌یابد. برای هسته‌های A زوج، به خاطر وجـود جملهٔ تزویج، دو منحنی سهمی شکل به دست می‌آیند که به فاصلهٔ ۲δ از یکدیگرقرار دارند. وجود این دو سهمی منجر به‌پیش‌بینی دو خاصیت غیرعادی می‌شودکـه در واپاشیهای A فرد دیده نمی‌شوند: (۱) هسته‌های Zفرد و Nفرد می‌توانند به‌هردو روش تبدیل نوترون به پروتون یا تبدیل پروتون به‌نوترون واپاشیده شوند؛ (۲) بعضی از واپاشیهای دوبتایی که درآنها در اثر واپاشی ۲ پروتون به ۲ نوترون تبدیل می‌شوند، نیز از نقطه‌نظر انرژی امکان‌پذیرخواهند بود. دربارهٔ این دوخاصیت درفصل ۹ بحث خواهیم کرد.

۴.۳ تکانهٔ زاویه‌ای هسته‌ها و پاریته

در بخش ۵.۲ دربارهٔ جفت‌شدگی تکانهٔ زاویه‌ای مداری $\mathbf{l}$ واسپین $\mathbf{s}$ که حاصل آن تکانهٔ زاویه‌ای کل $\mathbf{j}$ است، بحث کردیم. تاآنجا که بتوانیم پتانسیل هسته‌ای را مرکزی بگیریم، $\mathbf{l}$ و $\mathbf{s}$ (وبنابراین $\mathbf{j}$) ازجمله ثابتهای حرکت خواهندبود. ازاین‌رو، به‌زبان مکانیك کوانتومی می‌توانیم هر نوکلئونی را با اعدادکوانتومی l، s، و j مشخص کنیم. در ایـن صورت، تکانهٔ زاویه‌ای کل هسته‌ای که شامل A نوکلئون باشد از جمع برداری تکانه‌های زاویه‌ای همهٔ نوکلئونهای آن به‌دست می‌آید. این تکانهٔ زاویه‌ای کل را معمولا اسپین هسته می‌نامند و با نماد I نشان می‌دهند. تکانهٔ زاویه‌ای I تمامی خواص بردارهای تکانهٔ زاویه‌ای راکه درمکانیك کوانتومی متداول‌اند، داراست

$$I_z=m\hbar(m=-I,\ \cdots,\ +I) \text{ و } \mathbf{I}^۲=\hbar^۲I(I+۱)$$

دربسیاری از اثرات مربوط به‌تکانهٔ زاویه‌ای، رفتار هسته به‌گونه‌ای است که گویی بایك جسم منفرد با تکانهٔ زاویه‌ای ذاتی I سروکار داریم. برای نمونه، در میدانهای مغناطیسی معمولی با مشاهدهٔ شکافتگی حالت I به‌تعداد $(۲I+۱)$ زیرحالت

$$m=-I,\ -I+۱,\ \cdots,\ I-۱,\ I$$

می‌توانیم اثرهسته‌ای زیمان را تجربه کنیم. این زیرحالتها، همچنانکه دراثرعادی زیمان در اتمها دیدیم، به فاصلهٔ یکسان از یکدیگرتوزیع می‌شوند. اگرمیدان مغناطیسی اعمال شده را فوق‌العاده قوی می گرفتیم به‌حدی که می‌توانست جفت‌شدگی بین نوکلئونها را بشکند، آنگاه هرحالت منفرد j به‌تعداد $(۲j+۱)$ زیرحالت شکافته می‌شد. مـورد مشابه ایـن خاصیت در فیزیك اتمی هم دیده می‌شود: هنگامی کـه میدان مغناطیسی اعمال شده قوی باشد، جفت‌شدگی بین $\mathbf{l}$ و $\mathbf{s}$ الکترونها شکسته می‌شود و در این صورت بـا $(۲l+۱)$

مؤلفهٔ $\mathbf{l}$ و $(2s+1)$ مؤلفهٔ $\mathbf{s}$ مواجه خواهیم شد. درحال حاضر نمی‌توانیم میدانی را که برای شکستن جفت‌شدگی نوکلئونها قدرت کافی داشته باشد، تولید کنیم. بنابراین رفتار هسته برای ما به‌گونه‌ای است که گویی فقط با یك ذرهٔ منفرد «چرخان» سروکار داریم. به‌همین دلیل است که درتوصیف حالتهای هسته‌ای ازاسپین (یا تکانهٔ زاویه‌ای کل) $\mathbf{I}$ وعدد کوانتومی اسپین I استفاده می‌کنیم.

برای جلوگیری ازسردرگمی، درسراسر این کتاب اسپین هسته را با نماد I وتکانهٔ زاویه‌ای کل یك نوکلئون منفرد را با نماد j نشان خواهیم داد. اغلب با مواردی روبه‌رو می‌شویم که تمام خواص هسته را یك تك‌ذرهٔ ظرفیت تعیین می‌کند؛ در این حالت داریم $I=j$. در موارد دیگر، ممکن است لازم باشدکه دو ذرهٔ ظرفیت را در نظر بگیریم. در این‌گونه حالتها داریم $\mathbf{I}=\mathbf{j}_1+\mathbf{j}_2$ که درآن برایند I می‌تواند چند مقدار مختلف داشته باشد. در پاره‌ای از موارد، ذرهٔ منفرد وقلب حاصل از نوکلئونهای باقیمانده هردو با هم در تکانهٔ زاویه‌ای کل هسته سهم دارند، یعنی $\mathbf{I}=\mathbf{j}_p+\mathbf{j}_c$ می‌شود که درآن $\mathbf{j}_p$ تکانهٔ ذرهٔ منفرد و $\mathbf{j}_c$ تکانهٔ قلب نوکلئونهای باقیمانده است.

یکی از شرایط مهم مقادیرمجاز I، با توجه به مؤلفه‌های تکانهٔ زاویه‌ای کل هر یك از نوکلئونها در راستای z به‌دست می‌آید. چون تمام مقادیر j باید اعدادی نیم درست $(1/2, 3/2, 5/2, \ldots)$ باشند، مؤلفه‌های آنها در راستای z هم فقط اعداد نیم‌درست $(\pm 1/2\,\hbar, \pm 3/2\,\hbar, \pm 5/2\,\hbar, \ldots)$ خواهند بود. اگرتعداد نوکلئونهای موجود در هسته زوج باشد، تعداد زوجی از مؤلفه‌های نیم‌درست در هسته خواهیم داشت و درنتیجه مؤلفهٔ z تکانهٔ کل I فقط مقادیر درست خواهد داشت. این امرمستلزم آن است که مقدار I هم باعدد درستی بیان شود. اگرتعداد نوکلئونها فرد باشد، مؤلفهٔ z تکانهٔ کل وبنابراین مقدار I هردو باید نیم‌درست‌باشند. بدین‌ترتیب، قاعده‌ای به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم

در هسته‌های A فرد: $I=$ نیم‌درست

در هسته‌های A زوج: $I=$ درست

اندازه‌گیری مقادیراسپین هسته‌ها، اطلاعات زیادی دربارهٔ ساختار هسته به دست می‌دهد. برای نمونه، صدها هسته (پایدار و رادیواکتیو) با Z زوج و N زوج می‌شناسیم که اسپین حالت پایهٔ همگی آنها برابر صفر است. این نکته دال بر وجود نیروی تزویج است که در بخش قبلی ازآن سخن گفته‌ایم: نوکلئونها به صورت زوجهایی با اسپین صفر باهم جفت می‌شوند و درنتیجه I کل برابرصفرمی‌شود. به‌همین ترتیب، اسپین حالت پایه درهسته‌های A فرد باید با مقدار j آخرین پروتون یانوترون منفرد برابرشود. هنگامی‌که مدل پوسته‌ای‌هسته را درفصل۵ بررسی‌می‌کنیم، بازهم دراین‌باره به‌بحث خواهیم‌پرداخت.

برای مشخص کردن حالتهای هسته، علاوه‌براسپین هسته‌از پاریته نیزاستفاده می‌شود. پاریته می‌تواند دارای مقادیر مثبت (زوج) یا منفی (فرد) باشد. اگر تابع‌موج تك‌تك نوکلئونهای موجود در هسته را می‌شناختیم، از حاصلضرب پاریته‌های تمامی A نوکلئون

می‌توانستیم پاریتهٔ هسته را به‌صورت π مثبت یامنفی ($\pi = \pi_1 \pi_2 \ldots \pi_A$) به‌دست آوریم. اما درعمل استفاده از چنین روشی امکان‌پذیر نیست، زیرا عموماً نمی‌توانیم به هر نوکلئون هسته تابع‌موجی با پاریتهٔ معلوم نسبت دهیم. پس پاریتهٔ π را هم، مانند اسپین I، به‌صورت یك خاصیت «جمعی» کل هسته درنظرمی‌گیریم. پاریتهٔ کل هسته را با استفاده از روشهای گوناگون واپاشی و واکنش هسته‌ای می‌توانیم مستقیماً اندازه‌گیری کنیم. پاریتهٔ هسته را به‌صورت شاخص بالای اسپین هسته وباعلامت + یا — نشان می‌دهیم، ومی‌نویسیم I^{π}. برای نمونه می‌نویسیم 0^+، 2^-، $(1/2)^-$، $(5/2)^+$. هیچگونه رابطهٔ نظری مستقیمی بین I و π وجود ندارد، ودرنتیجه برای هرمقداری از I علامت π می‌تواند مثبت یامنفی باشد.

۵.۳ گشتاور الکترومغناطیسی هسته

بیشتر اطلاعاتی که‌ازساختار هسته دراختیار داریم، نه از برهم‌کنش قوی هسته‌ای بین‌هسته‌ها ومحیط اطرافشان، بلکه‌از برهم‌کنش خیلی ضعیفتر الکترومغناطیسی حاصل‌شده‌اند. به‌عبارت دیگر، نظم موجود درحرکت وتوزیع نوکلئونهای درون هسته از برهم‌کنش قوی هسته‌ای حاصل می‌شود، اما وسیلهٔ کاوش دراین توزیع، برهم‌کنش الکترومغناطیسی است. در این کار، ما می‌توانیم ازمیدانهای الکترومغناطیسی که درمقایسه با نیروی قوی درون هسته اثر ضعیفتری روی حرکت نوکلئونها دارد استفاده‌کنیم. بدین‌ترتیب، عمل اندازه‌گیری تأثیر شدیدی روی موضوع تحت بررسی نخواهد گذاشت.

هرگونه توزیع بار الکتریکی و جریان، تولید میدانهایی الکتریکی و مغناطیسی می‌کندکه به‌شکل خاصی به فاصله بستگی دارند. معمولا به هریك از وابستگیهای فضایی مربوط به توزیع بار وجریان الکتریکی، یك گشتاورچندقطبی الکترومغناطیسی نسبت می‌دهند: به میدان الکتریکی $1/r^2$ که از بار الکتریکی خالص حاصل می‌شود، گشتاور مرتبهٔ صفر یا تك‌قطبی نسبت می‌دهیم. میدان الکتریکی $1/r^3$ را ناشی از گشتاور مرتبهٔ اول یا دوقطبی ومیدان الکتریکی $1/r^4$ را ناشی ازگشتاور مرتبهٔ دوم یا چارقطبی می‌دانیم، و همین‌طور ... .گشتاورهای چندقطبی مغناطیسی هم، به‌استثنای تك‌قطبی، وضعی مشابه دارند. تا آنجا که می‌دانیم، تك‌قطبی مغناطیسی یا وجود ندارد یا اینکه خیلی نادر است. به‌همین دلیل، میدان تك‌قطبی مغناطیسی را (که متناسب با $1/r^2$ می‌شود) به‌حساب نمی‌آوریم. نظریهٔ الکترومغناطیس برای محاسبهٔ گشتاورهای چندقطبی الکتریکی و مغناطیسی، دستورالعمل مشخصی داردکه با استفاده ازاین روش و با در نظرگرفتن شکل عملگر گشتاورها و محاسبهٔ مقادیرانتظاری آنها در حالتهای مختلف هسته‌ای، می‌توان گشتاورهای کوانتوم‌مکانیکی سیستمهای هسته‌ای را هم تعیین کرد. سپس این مقادیرانتظاری را می‌توانیم مستقیماً با مقادیر تجربی که در آزمایشگاه به دست می‌آوریم مقایسه‌کنیم. روشهای اندازه‌گیری گشتاورهای هسته‌ای را درفصل ۱۶ (جلددوم، ترجمهٔ فارسی) بررسی خواهیم کرد.

ساده‌ترین نوع توزیع بار وجریان، فقط می‌تواند میدانهای چندقطبی مرتبهٔ پایین

تولید کند. توزیع کروی بار الکتریکی فقط منجر به تولید میدان تک‌قطبی (کولنی) می‌شود، وهیچ گشتاوری ازمراتب بالاتردراین مورد به‌وجود نمی‌آید. یك حلقه ازجریان دایره‌ای، فقط یك میدان دوقطبی مغناطیسی تولید خواهد کرد. طبیعت درتولید هسته‌ها بی‌قاعده عمل نمی‌کند بلکه هر وقت که تولید ساختاری ساده و متقارن (و سازگار با برهم‌کنش هسته‌ای) امکان‌پذیر باشد، گرایش طبیعی چنان است که هسته‌ها باهمان ساختار تولید شوند. ازاین‌رو برای مشخص کردن خواص الکترومغناطیسی هسته، معمولا به‌اندازه‌گیری یامحاسبهٔ پایینترین مرتبهٔ گشتاورهای چندقطبی اکتفا می‌شود.

یکی دیگرازشرایط محدودکنندهٔ گشتاورهای چندقطبی، ازتقارن هسته‌ناشی می‌شود که مستقیماً به پاریتهٔ حالتهای هسته‌ای بستگی دارد. هر گشتاور چندقطبی الکترومغناطیسی، پاریتهٔ خاصی دارد که با توجه به رفتار عملگر چندقطبی در طی تبدیل $\mathbf{r} \to -\mathbf{r}$ تعیین می‌شود. پاریتهٔ گشتاورهای الکتریکی ازعدد نمایی $(-1)^L$ حاصل می‌شود که درآن L مرتبهٔ گشتاور است (برای تک‌قطبی $L=0$، برای دوقطبی $L=1$، برای چارقطبی $L=2$ است وهمین‌طور تا آخر). پاریتهٔ گشتاورهای مغناطیسی ازعدد نمایی $(-1)^{L+1}$ به‌دست می‌آید. هنگامی که می‌خواهیم مقدار انتظاری یك گشتاور را محاسبه کنیم، بایدمقدار انتگرال $\int \psi^* \mathcal{O} \psi \, dv$ را تعیین کنیم که درآن $\mathcal{O}$ عملگر الکترومغناطیسی موردنظر است. ازآنجا که تابع‌موج ψ دو بار درانتگرال ظاهرمی‌شود، پاریتهٔ خود ψ اهمیتی ندارد، زیرا تبدیل $\psi \to +\psi$ یا $\psi \to -\psi$ تابع زیرانتگرال را تغییر نمی‌دهد. اما اگر $\mathcal{O}$ دارای پاریتهٔ فرد باشد، آنگاه تابع زیرانتگرال برحسب مختصات تابعی فرد است که باید به مقدار انتظاری گشتاور صفرمنتهی شود. پس تمامی گشتاورهای چندقطبی استاتیکی که پاریتهٔ فرد دارند باید برابر صفر باشند که ازآن جمله‌است دوقطبی الکتریکی، چارقطبی مغناطیسی، هشت‌قطبی الکتریکی $(L=3)$، وغیره.

گشتاورالکتریکی تک‌قطبی،درست با بارهسته Ze مساوی می‌شود. گشتاورغیرصفر بعدی هسته، گشتاور دوقطبی مغناطیسی μ است. مقدار گشتاور مغناطیسی یك حلقهٔ دایره‌ای به مساحت A که حامل جریان i باشد، عبارت است از $|\mu| = iA$. اگر جریان i دراثر گردش بار e که با سرعت v در دایره‌ای به‌شعاع r (و با دورهٔ تناوب $2\pi r/v$) در حرکت است به‌وجود آید، داریم

$$|\mu| = \frac{e}{(2\pi r/v)} \pi r^2 = \frac{evr}{2} = \frac{e}{2m} |\mathbf{l}| \qquad (۳۲.۳)$$

که درآن $|\mathbf{l}|$ تکانهٔ زاویه‌ای کلاسیك بارمتحرك یا mvr است. درمکانیك کوانتومی، گشتاور مغناطیسی قابل مشاهده را به طور عملیاتی در راستای بزرگترین مؤلفهٔ $\mathbf{l}$ تعریف می‌کنیم. بنابراین، چنانچه به‌جای $\mathbf{l}$ مقدار انتظاری آن را نسبت به محوری که تصویر بردار تکانه روی آن بزرگترین مقدار یعنی $m_l\hbar$ است $(m_l = +l)$ قرار دهیم، معادلهٔ (۳۲.۳) را می‌توانیم مستقیماً وارد محاسبات کوانتومی کنیم. دراین صورت، خواهیم داشت

$$\mu = \frac{e\hbar}{2m} l \qquad (۳۳.۳)$$

که درآن l اکنون عدد کوانتومی تکانهٔ زاویه‌ای مداری است.

کمیت $e\hbar/2m$ را یك مگنتون می‌نامند. درحرکتهای اتمی، به‌جای m جرم الکترون را قرار می‌دهیم و مگنتون بور را به صورت $\mu_B = 5.7884 \times 10^{-5}\,\mathrm{eV/T}$ به‌دست می‌آوریم. اگر به جای m جرم پروتون قرار گیرد، مگنتون هسته‌ای به صورت $\mu_N = 3.1525 \times 10^{-8}\,\mathrm{eV/T}$ به‌دست می‌آید. توجه کنید که به خاطر اختلاف جرم داریم $\mu_N \ll \mu_B$، یعنی در بسیاری از شرایط مغناطیس اتمی خیلی قویتر از مغناطیس هسته‌ای است. برهم کنشهای مغناطیسی عادی درماده (مثل خاصیت فرومغناطیسی) از طریق مغناطیس اتمی ماده تعیین می‌شود. اثرات مغناطیس هسته‌ای مواد را فقط در شرایط خیلی خاص می‌توان مشاهده کرد (فصل ۱۶، جلد دوم ترجمهٔ فارسی را ببینید).

معادلهٔ (۳۳.۳) را به‌شکل مفیدتر زیر می‌توانیم بنویسیم

$$\mu = g_l l \mu_N \qquad (۳۴.۳)$$

که در آن g_l را ضریب g می‌گویند که به تکانهٔ زاویه‌ای مداری l وابسته است. برای پروتونها $g_l = 1$ است. چون نوترونها بارالکتریکی ندارند، در صورتی می‌توانیم از معادلهٔ (۳۴.۳) برای توصیف حرکت مداری نوترونها استفاده کنیم که در مورد آنها $g_l = 0$ باشد.

تاکنون فقط حرکت مداری نوکلئونها را درنظر گرفته‌ایم. پروتونها و نوترونها هم مانند الکترونها، علاوه‌برگشتاور مداری، دارای گشتاور مغناطیسی ذاتی یا اسپینی هستند که هیچ‌گونه مشابه کلاسیك ندارد. دراینجا این گشتاور را به همان صورت معادلهٔ (۳۴.۳) درنظر می‌گیریم

$$\mu = g_s s \mu_N \qquad (۳۵.۳)$$

که در آن برای هر سه ذرهٔ پروتون، نوترون، و الکترون داریم $s = 1/2$. کمیت g_s را ضریب اسپینی g می‌گویند که ازحل معادلهٔ نسبیتی مکانیك کوانتومی حاصل می‌شود. برای ذره‌ای مانند الکترون که ذره‌ای نقطه‌ای با اسپین ۱/۲ است، بنابرمعادلهٔ دیراك داریم $g_s = 2$ که بامقدارحاصل از اندازه‌گیری $g_s = 2.0023$ سازگاری کامل دارد. دراینجا اختلاف بین g_s وعدد۲ خیلی کم وبا درنظرگرفتن مراتب بالاتر تصحیحات الکترودینامیك کوانتومی به دقت قابل محاسبه است. اما تفاوت بین مقادیر تجربی g_s برای نوکلئونهای آزاد، ومقدار انتظاری ذرات نقطه‌ای خیلی چشمگیراست

برای پروتون: $g_s = 5.5856912 \pm 0.0000022$

برای نوترون: $g_s = -3.8260837 \pm 0.0000018$

(گشتاور مغناطیسی اندازه‌گیری شده، برحسب مگنتون هسته‌ای، درست برابر نصف ضریب g_s به‌دست می‌آید.) نه‌تنها اختلاف بین گشتاورمغناطیسی تجربی پروتون ومقدارانتظاری۲ برای یك ذرهٔ نقطه‌ای بسیار زیاد است، بلکه برای نوترون بدون بارهم گشتاور مغناطیسی غیرصفر به دست می‌آوریم! شاید ایـن اختلافات اولین قرائنی هستند کـه نشان می‌دهند نوکلئونها ذرات بنیادی نقطه‌ای شکلی مانند الکترون نیستند، بلکه ساختاری داخلی‌دارند. در ساختار داخلی نوکلئونها باید ذرات باردار در حـال حرکت دخالت داشته باشند، و حرکت این ذرات باید به تولید جریانهایی منجرشودکه با گشتاورهای مغناطیسی مشاهده شده سازگار باشند. یکی ازنکات جالب توجه این است‌که g_s پروتون درحدود ۳٫۶ از مقدار انتظاری‌اش بزرگتراست، درحالی‌که g_s نوترون درهمین حدود از مقدار انتظاری آن (صفر) کوچکتر است. قبلا اختلاف بین مقادیر انتظاری و اندازه‌گیـری شدهٔ g_s را به‌ابرهای مزونی (مزون π) حول نوکلئونها نسبت می‌دادند. به‌این ترتیب‌که ابرپروتونها را متشکل ازمزونهای مثبت وخنثای π، و ابرنوترونها را متشکل ازمزونهای منفی وخنثایπ می‌دانستند. در ایـن صورت، سهم مساوی و مختلف‌العلامت گشتاور مغناطیسی نـاشی از ابرمزونی قابل توجیه به‌نظر می‌رسید. درنظریه‌های امروزی، نوکلئونها را متشکل از سه کوارك درنظر می‌گیرند وگشتاور مغناطیسی هـرنوکلئون را مستقیماً از جمع گشتاورهای مغناطیسی کوارکها به‌دست می‌آورند (فصل ۱۸ جلددوم،ترجمهٔ فارسی را ببینید).

نیروی‌تزویج درهسته‌ها، جفت‌شدگی میان نوکلئونها راچنان تنظیم‌می‌کندکه برایند تکانه‌های زاویه‌ای مداری و اسپینی هرزوج برابر صفرمی‌شود. بدین ترتیب، نوکلئونهای تزویج شده هیچ‌گونه سهمی درگشتاور مغناطیسی ندارند، و در تعیین آن فقط کافی است که نوکلئونهای ظرفیت را درنظر بگیریم. اگر چنین نبود، براساس ملاحظات آماری در بعضی از هسته‌های سنگین احتمالا با گشتاورهای مغناطیسی خیلی بزرگ که شاید به دهها مگنتون هسته‌ای بالغ می‌شد، روبه‌رو می‌شدیم. اما تاکنون هیچ هسته‌ای‌با گشتاورمغناطیسی دوقطبی بزرگتر از حدود $6\mu_N$ مشاهده نشده است.

جدول ۲.۳ نمونه‌هایی از مقادیرگشتاورمغناطیسی دوقطبی هسته‌ها را نشان می‌دهد. بـا توجه به‌نیروی تزویج، می‌توانیم این مقادیرگشتاورمغناطیسی را مورد تجزیه و تحلیل قراردهیم واطلاعاتی ازساختارهسته‌ای به‌دست‌آوریم. درفصل۴ گشتاورمغناطیسی دوترون را بررسی می‌کنیم، و درفصل ۵ پیش‌بینی مدلهای هسته‌ای را درمـورد گشتاورمغناطیسی هسته‌های سنگین خواهیم دید.

گشتاورغیرصفربعدی درهسته‌ها، گشتاور چارقطبی الکتریکی است. گشتاورچارقطبی eQ یك ذرهٔ باردارکلاسیك e به صورت $e(3z^2-r^2)$ است. اگـر حرکت ذره تقارن کـروی داشته باشد، آنگاه (به‌طور متوسط) داریم $z^2=x^2=y^2=r^2/3$ و در نتیجه گشتاور چارقطبی آن برابر صفرخواهد شد. اگر ذره در یك مدار تخت‌کلاسیك (مثلا در صفحهٔ xy) حرکت کند، آنگاه $z=0$ و $Q=-r^2$ خواهد شد. در مکانیك‌کوانتومی، گشتاور چارقطبی یك پروتون منفرد عبارت است از

جدول ۳.۲ چند نمونه از مقادیر گشتاور دوقطبی مغناطیسی.

نوکلید	$\mu(\mu_N)$
n	−۱٫۹۱۳۰۴۱۸
p	+۲٫۷۹۲۸۴۵۶
$^{2}H(D)$	+۰٫۸۵۷۴۳۷۶
^{17}O	−۱٫۸۹۳۷۹
^{57}Fe	+۰٫۰۹۰۶۲۲۹۳
^{57}Co	+۴٫۷۳۳
^{93}Nb	+۶٫۱۷۰۵

تمام مقادیر به‌حالتهای پایه درهسته‌ها مربوط می‌شوند. عدم‌قطعیت این مقادیر نوعاً به چند قسمت از آخرین ارقام محدود می‌شود.

$$eQ = e\int \psi^*(3z^2 - r^2)\psi\, dv \qquad (۳۶.۳)$$

اما برای نوترونی که دریك مدار درحرکت است، داریم $Q = 0$. اگر $|\psi|^2$ تقارن کروی داشته باشد، $Q = 0$ می‌شود. اگر $|\psi|^2$ درصفحهٔ xy قرار گیرد (یعنی $z \cong 0$ باشد)، خواهیم داشت $Q \sim -\langle r^2\rangle$؛ و چنانچه $|\psi|^2$ حول محور z (یعنی $z \cong r$) تمرکز داشته باشد، داریم $Q \sim +2\langle r^2\rangle$. در اینجا $\langle r^2\rangle$ شعاع میانگین مربعی مدار است. سودمندی نیروی تزویج دراین‌مورد هم به‌روشنی مشاهده می‌شود. اگر نوکلئونهای تزویج شده در مدارهایی با تقارن کروی در حرکت باشند، در مقدار گشتاور Q نقشی نخواهند داشت. بدین ترتیب می‌توانیم انتظار داشته باشیم که گشتاور چارقطبی بسیاری از هسته‌ها را به‌کمك نوکلئونهای ظرفیت براوردکنیم. مدار نوکلئونهای ظرفیت را می‌توانیم در نزدیکی سطح هسته در نظر بگیریم، که در این صورت $r = R_0 A^{1/3}$ می‌شود. بنابر این براورد، گشتاور چارقطبی به صورت $|eQ| \leqslant eR_0^2 A^{2/3}$ به‌دست می‌آید که مقدار آن از حدود $6 \times 10^{-30}\,\mathrm{em}^2$ برای هسته‌های سبك تا $50 \times 10^{-30}\,\mathrm{em}^2$ برای هسته‌های سنگین درتغییراست. یکای $10^{-28}\,\mathrm{m}^2$ را که برای سطح‌مقطع‌واکنشهای‌هسته‌ای به‌فراوانی مورد استفاده است یك بارن می‌گویند و با b نمایش می‌دهند. این یکا برای تعیین مقدار گشتاورهای چارقطبی هسته‌ها هم مناسب است، و بیشینه‌های انتظاری هسته‌های مختلف برحسب این یکا بین ۰٫۰۶ تا ۰٫۵eb به‌دست می‌آید. چنانکه در جدول ۳.۳ دیده

جدول ۳.۳ چند نمونه از مقادیر گشتاور چارقطبی الکتریکی.

نوکلید	Q(b)
$^{۲}H(D)$	+۰٫۰۰۲۸۸
^{۱۷}O	−۰٫۰۲۵۷۸
^{۵۹}Co	+۰٫۴۰
^{۶۳}Cu	−۰٫۲۰۹
^{۱۳۳}Cs	−۰٫۰۰۳
^{۱۶۱}Dy	+۲٫۴
^{۱۷۶}Lu	+۸٫۰
^{۲۰۹}Bi	−۰٫۳۷

تمام مقادیر به‌حالتهای پایهٔ هسته‌ها مربوط می‌شوند. عدم قطعیتها در این مقادیر نوعاً به‌چند قسمت از آخرین ارقام محدود است.

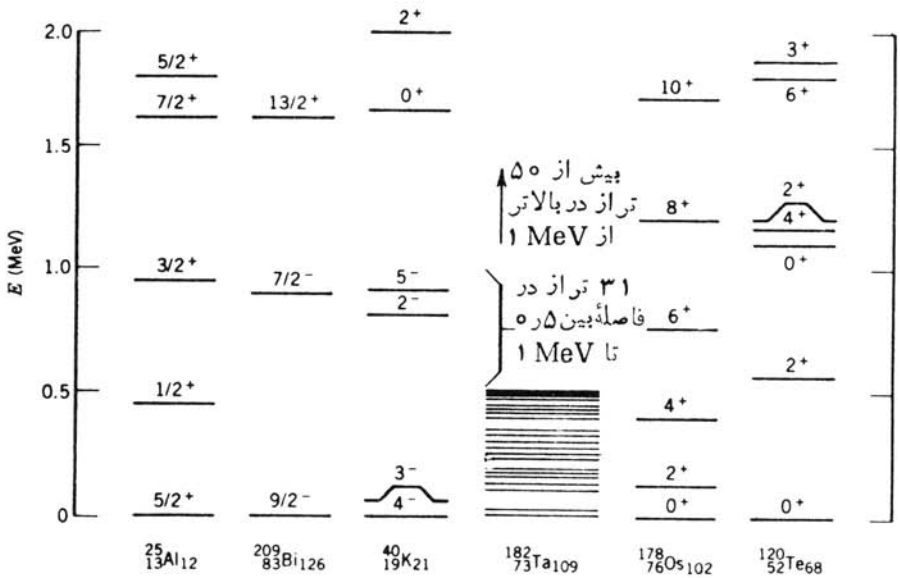
می‌شود، گشتاور چارقطبی بسیاری ازهسته‌ها در همین گستره قراردارد. اما گشتاور تعدادی از هسته‌ها، بویژه عناصرقلیایی خاکی، خیلی از این مقادیرفاصله دارد. در این موارد، گشتاور چارقطبی متضمن اطلاعات مهمی است، و معلوم می‌شود که مدل تك ذره قادر به‌توجیه مقادیر بزرگ گشتاور چارقطبی نیست. همهٔ پروتونهای موجود در هسته یا بیشتر آنها باید به‌نوعی در تولید این مقادیر بزرگ Q شرکت داشته باشند. فرض وجود قلب کروی متقارنی از نوکلئونهای تزویج شده برای این هسته‌ها معتبر نیست. در بعضی از هسته‌ها ممکن است این قلب یك شکل غیرکروی ایستا داشته باشد که به تولید گشتاور چارقطبی بزرگ منجرشود. خواص این‌گونه هسته‌های شدیداً تغییر شکل‌یافته را درفصل ۵ بررسی خواهیم کرد.

۶.۳ حالتهای برانگیختهٔ هسته

همچنانکه ازمطالعهٔ حالتهای برانگیختهٔ اتمی اطلاعاتی از ساختاراتمها به‌دست می‌آوریم، با توجه به‌حالتهای برانگیختهٔ هسته‌ای نیز می‌توانیم تاحدودی ساختارهسته‌ها را بشناسیم. حالتهای برانگیختهٔ هسته هم، مانند حالتهای برانگیختهٔ اتمی، ناپایدارند وسریعاً به‌حالت پایه برمی‌گردند. برانگیختگی اتمها در اثر جابه‌جا کردن الکترونها و رساندن آنها

به مدارهای انرژی بالاترصورت می‌گیرد. همین‌کار را برای نوکلئونهای موجود درهسته نیـز می‌توان انجام داد. بدین ترتیب، به‌کمك حالتهـای برانگیخته می‌تـوان بعضی از خصوصیات مدارهای نوکلئونی را درهسته‌ها نشان داد. ما قبلا درهمین فصل درچندمورد، به‌خواص مکمل ساختارتك‌ذره‌ای وساختارجمعی هسته‌ها اشاره‌کردیم. بعلاوه، می‌دانیم که حالتهای برانگیختهٔ هسته‌ای را نیز می‌توانیم با افزودن انرژی به قلب نوکلئونهای تزویج شده در هسته‌ها تولیدکنیم. این انرژی، ممکن است به‌صورت انرژی نوسانات یا دوران جمعی درکل قلب هسته ظاهرشود، و یا اینکه صرف شکستن یکـی از زوجهای نوکلئونی شود وازاین طریق دو نوکلئون برنوکلئونهای ظرفیتی هسته بیفزاید.

بخشی ازهدف طیف‌نمایی هسته‌ای، مشاهدهٔ حالتهای قابل برانگیزش واندازه‌گیری خواص آنهاست. روشهای تجربی متداول درطیف‌نمایی هسته‌ای، انواع روشهای موجود در مطالعات واپاشی رادیواکتیو و واکنشهای هسته‌ای را دربرمی‌گیرد. بررسی تفصیلی واپاشیها و واکنشهای هسته‌ای را در بخشهای آینده خواهیم دید. از جمله نکاتی کـه در اندازه‌گیری خواص هرحالت برانگیخته باید درنظرگرفت، انرژی برانگیزش، طول‌عمر و مد (یا مدهای) واپاشی، اسپین و پاریته، گشتاور دوقطبی مغناطیسی، وگشتاور چارقطبی



شکل ۱۹.۳ چنـد نمونه از نمودارهای حالتهای برانگیختهٔ پـایینتراز ۲ MeV. حالتهای برانگیخته دربعضی هسته‌ها مانند ^{209}Bi خیلی ساده است، درحالی‌که دربرخی دیگراز هسته‌ها مانند ^{182}Ta خیلی پیچیده است. نظمی‌که در ترازهای ^{178}Os دیده می‌شود، در تمام هسته‌های زوج ـ زوج (N و Z هردو زوج) موجود درگسترهٔ $150 \leqslant A \leqslant 190$ تکرارمی‌شود. ساختار مشابه ^{120}Te هم دربسیاری از هسته‌های موجود درگسترهٔ $50 \leqslant A \leqslant 150$ تکرار می‌شود.

الکتریکی است. با توجه به وجود تعداد بیش از ۱۰۰۰ نوکلید که هر یك از آنها ممکن است صدها حالت برانگیخته داشته باشد، کار اندازه‌گیری، تنظیم جدول، وتحلیل وتفسیر اطلاعات مربوط به‌حالتهای برانگیخته، برنامه‌ای بسیار بسیار سنگین است.

نمونه‌هایی ازنمودار تراز هسته‌ای را درشکل۱۹.۳ نشان داده‌ایم. منشأ تعداد کمی از حالتهای برانگیخته را می‌توان مشخص کرد و فهمید که از برانگیختگی نوکلئونهای ظرفیت تولید شده‌اند یا ازبرانگیختگی قلب هسته. این‌تشخیص هم فقط‌بعد از اندازه‌گیری تمامی خواص فوق‌الذکرو مقایسهٔ آنها باپیش‌بینی مبتنی برمحاسبات برانگیزش تك‌ذره‌ای و برانگیزش جمعی قلب هسته، و همچنین مشاهدهٔ سازگاری بین آزمایش و محاسبه، امکان‌پذیر می‌شود. در فصلهای آینده، روشهای تجربی رایج برای جمع‌آوری این‌گونه اطلاعات و مدلهای هسته‌ای مورد نیاز برای تفسیر آنها را بررسی خواهیم کرد. این نوع تحلیل و تعبیر جامع از ساختار هسته‌ای را صرفاً از طریق آزمایشهای بسیار دقیق و دشوار، و با استفاده از محاسبات مفصل کامپیوترهای قدرتمند امروزی، می‌توانیم به‌دست آوریم.

مراجع مطالعات تکمیلی

درمورد توزیع جرم و بارهسته‌ای از دومرجع اصلی زیرمی‌توان استفاده‌کرد:

Roger C. Barrett and Daphne F. Jackson, *Nuclear Sizes and Structure* (Oxford: Clarendon, 1977),

مرجع زیرهم حاوی مجموعه مقالاتی دربارهٔ توزیع بار وگشتاور هسته‌ای است

Atomic Data and Nuclear Data Tables, **14**, 479–653, (1974).

مجموعه‌ای از مقالات تجدید چاپ‌شدهٔ مربوط به‌پراکندگی الکترون را می‌توان درکتاب زیر یافت:

R. Hofstadter, *Nuclear and Nucleon Structure* (New York: Benjamin, 1963),

استفاده از اتمهای موئونی برای تعیین توزیع بار هسته‌ای در مرجع زیرمرور شده است:

C. S. Wu and L. Wilets, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **19**, 527(1969),

روشهای عام کاربرد لیزر در طیف‌نمایی اپتیکی و بررسی خواص هسته‌ها را می‌توان در مرجع زیر یافت:

D. E. Murnick and M. S. Feld, *Ann. Rev, Nucl. Sci.* **29**, 411(1979),

برای بحث تفصیلی دربارهٔ فرمول نیمه‌تجربی جرم به‌کتاب زیررجوع کنید:

R. D. Evans, *The Atomic Nucleus* (New York: McGraw-Hill, 1955).

مسائل

۱. نشان دهید که میانگین مربعی شعاع بار یک کرهٔ باردار یکنواخت عبارت است از $\langle r^2 \rangle = 3R^2/5$.

۲. (الف) معادلهٔ (۹.۳) را به‌دست آورید. (ب) با شروع ازمعادلهٔ (۹.۳) وتکمیل تمام مراحل محاسبه، فرمول (۱۳.۳) را به‌دست آورید.

۳. عامل شکل $F(q)$ را در هریك از توزیع بارهای زیرمحاسبه کنید:

(الف) $\rho(r) = \rho_0, \ r < R$
$= 0, \ r > R$

(ب) $\rho(r) = \rho_0 e^{-(\ln 2) r^2/R^2}$

۴. یکی از توزیع بارهای هسته‌ای که‌واقع‌بینانه‌تر از توزیع بار یکنواخت‌است، توزیع فرمی $\rho(r) = \rho_0 \{1 + \exp[(r-R)/a]\}^{-1}$ است. (الف) این‌توزیع را رسم کنید وآن را با شکل ۴.۳ مقایسه کنید. (ب) به‌فرض آنکه $t = 2.3 \text{ fm}$ باشد، مقدار a را به‌دست آورید. (ج) مفهوم پارامتر R چیست؟ (د) مقدار $\langle r^2 \rangle$ را در این توزیع به‌دست آورید.

۵. تصحیح استتار الکترونی که در تحلیل پرتوایکس الکترونی مشکل بزرگی به‌وجود می‌آورد، چرا درمورد پرتوایکس موئونی ایجاد اشکال نمی‌کند؟

۶. (الف) با استفاده از مدل تك‌الکترونی و با فرض یك هستهٔ نقطه‌ای، انرژی پرتوهای ایکس موئونی پوستهٔ K را در Fe تعیین کنید، وآنها رابا انرژیهای شکل۸.۳ مقایسه کنید. (ب) تصحیح ΔE مربوط به‌اندازهٔ محدود هسته را به دست آورید، و مقدار تصحیح شده را با انرژی اندازه‌گیری شده مقایسه کنید.

۷. (الف) با استفاده از جرمهای معلوم ^{15}O و ^{15}N، اختلاف انرژی بستگی آنها را محاسبه کنید. (ب) به فرض آنکه این اختلاف ناشی از اختلاف انرژی کولنی باشد، شعاع هسته‌های ^{15}O و ^{15}N را محاسبه کنید.

۸. با دردست داشتن مقادیردوتایهٔ جرمی زیر (برحسب $10^{-6}u$)، مقدارجرم اتمی ^{37}Cl را در هرمورد محاسبه کنید:

$$m(C_3H) - m(^{37}Cl) = 41922.2 \pm 0.3$$

$$m(C_2D_8) - m(^{37}ClH_3) = 12346.5 \pm 0.1$$

$$m(C_3H_6O_2) - m(^{37}Cl_2) = 10497.24 \pm 0.08$$

دراینجا $D \equiv {}^2H$، $C \equiv {}^{12}C$، و $O \equiv {}^{16}O$ است. دراین محاسبات، عدم قطعیت در جرمهای H، D، O، و C را درنظر بگیرید.

۹. انرژی بستگی کل و انرژی بستگی هرنوکلئون را در هر یك ازموارد زیرحساب کنید: (الف) ^7Li، (ب) ^{20}Ne، (ج) ^{56}Fe، (د) ^{235}U.

۱۰. با استفاده از فرمول نیمه‌تجربی جرم، برای هریك ازهسته‌های زیرانرژی بستگی کل و انرژی کولنی رامحاسبه کنید: (الف) ^{21}Ne، (ب) ^{57}Fe، (ج) ^{209}Bi، (د) ^{256}Fm.

۱۱. کاستی جرم هسته‌های زیررا حساب کنید: (الف) ^{32}S، (ب) ^{20}F، (ج) ^{238}U.

۱۲. با در دست داشتن کاستی جرم هسته‌های زیر، جرم اتمی آنهـا را به دست آورید: (الف) ^{24}Na: -8.418 MeV ، (ب) ^{144}Sm: -81.964 MeV، (ج) ^{240}Pu: $+50.123$ MeV.

۱۳. (الف) انرژی جداسازی نوترون را در هر یك از هسته‌های ^{7}Li، ^{91}Zr، و ^{236}U به‌دست آورید. (ب) انرژی جداسازی پروتون را در هـر یك از هسته‌های ^{20}Ne، ^{55}Mn، و ^{197}Au تعیین کنید.

۱۴. با بررسی دقیق مقادیر S_n و S_p در جدول ۱.۳، در مورد میزان استحکام و بستگی آخرین پروتون یا آخرین نوترون در زوجهای آینه‌ای (^{17}O, ^{17}F) و (^{41}Ca, ^{41}Sc) اظهارنظر کنید. سعی کنید که رفتار کلی یـا سیستماتیك این گونه هسته‌ها را توضیح دهید. انرژیهای جداسازی نوکلئون را در هسته‌هایی که تعداد پروتون یـا نوترون یکسان دارند، با هم مقایسه کنید (برای نمونه، مقدار S_n را در ^{16}O و ^{17}F یا S_p را در ^{16}O و ^{17}O). این بررسی سیستماتیك را با تعیین وتنظیم مقادیر S_n و S_p برای هسته‌های ^{4}He، ^{5}He، ^{5}Li و برای ^{56}Ni، ^{57}Ni، و ^{57}Cu ادامه دهید. (توجه: هسته‌هایی کـه Z یا N آنها برابر ۲، ۸، ۲۰، یـا ۲۸ باشد، از پایداری خـاصی برخوردارند. علت این امررا درفصل ۵ خواهیم دید.)

۱۵. با استفاده ازفرمول نیمه‌تجربی جرم، برای انرژی جداسازی دونوترون ازهسته‌های $A \gg 1$ عبارتی به‌دست آورید. (راهنمایی: دراین مسئله استفاده از روش تفاضلی یا دیفرانسیلی خیلی آسانتر از روش جبری‌است.) بزرگی جملات مختلف را براورد کنید، و بستگی آنها را با A مورد بحث قرار دهید. نتیجه را با اطلاعات مربوط به Al و Te مقایسه کنید:

^{25}Al	۳۱٫۸۲ MeV	^{117}Te	۱۸٫۸۹ MeV	^{124}Te	۱۶٫۳۶ MeV
^{26}Al	۳۸٫۳۰ MeV	^{118}Te	۱۸٫۴۵ MeV	^{125}Te	۱۶٫۰۰ MeV
^{27}Al	۲۴٫۴۲ MeV	^{119}Te	۱۸٫۱۷ MeV	^{126}Te	۱۵٫۶۹ MeV
^{28}Al	۲۰٫۷۸ MeV	^{120}Te	۱۷٫۸۸ MeV	^{127}Te	۱۵٫۴۱ MeV
^{29}Al	۱۷٫۱۶ MeV	^{121}Te	۱۷٫۴۶ MeV	^{128}Te	۱۵٫۰۷ MeV
^{30}Al	۱۵٫۱۹ MeV	^{122}Te	۱۷٫۰۴ MeV	^{129}Te	۱۴٫۸۶ MeV
^{31}Al	۱۳٫۰۳ MeV	^{123}Te	۱۶٫۸۰ MeV	^{130}Te	۱۴٫۵۰ MeV

چرا دراین مقایسه، انرژی جداسازی دونوترون را انتخاب کردیم نه یك نوترون را؟

۱۶. همانند مسئلهٔ قبلی، بااستفاده ازفرمول نیمه‌تجربی جرم، عبارت تقریبی تغییرات انرژی S_p را برحسب A، درحالی که Z ثابت مانده باشد، به‌دست آورید. اطلاعات عددی

چنددسته از ایزوتوپها را جمع‌آوری کنید و پس‌از رسم منحنی تغییرات آنها، نتایج را با پیش‌بینی فرمول نیمه‌تجربی جرم مقایسه کنید.

۱۷. اسپین - پاریتهٔ هردوهستهٔ ^{9}Be و ^{9}B به‌صورت $(3/2)^-$ است. به‌فرض آنکه اسپین و پاریته در هردو حالت فقط خصوصیت نوکلئون منفرد را نشان دهد، طرز تعیین اسپین - پاریتهٔ قابل مشاهدهٔ $^{10}B(3^+)$ را مشخص کنید. چه ترکیب دیگری از اسپین - پاریته ممکن است دراین مورد ظاهرشود؟ (این ترکیبات به صورت حالتهای برانگیختهٔ ^{10}B مشاهده می‌شوند.)

۱۸. فرض کنیدکه با افزودن یك پروتون یا یك نوترون به ^{2}H که اسپین آن برابر ۱ و پاریتهٔ آن زوج است، آن را به ^{3}He یا ^{3}H تبدیل کنیم. تکانهٔ زاویه‌ای مداری نوکلئون اضافی را نسبت به مرکز جرم ^{2}H با l نشان می‌دهیم. مقادیر ممکن برای تکانهٔ زاویه‌ای کل ^{3}H یا ^{3}He چقدراست؟ با توجه به زوج بودن پاریتهٔ حالت پایهٔ ^{3}H و ^{3}He، کدام‌یك ازاین مقادیرقابل حذف است؟ محتملترین مقدارتکانهٔ زاویه‌ای حالت پایهٔ ^{3}H یا ^{3}He کدام است؟ آیا درجداسازی یك پروتون یایك نوترون از ^{4}He هم می‌توان چنین استدلالی را مطرح کرد؟ (اسپین - پاریتهٔ حالت پایهٔ ^{4}He چقدراست؟) اسپین - پاریتهٔ ^{5}Li و $^{5}He(3/2)^-$ را چگونه می‌توان تعیین کرد؟

۱۹. (الف) نوترون را به صورت ترکیبی از یك پروتون و یك مزون منفی π در حالت مداری $l=1$ در نظر بگیرید. گشتاور دوقطبی مغناطیسی مداری چنین مجموعه‌ای چقدر خواهد شد؟ نتیجه را به‌صورت مضربی از گشتاورمغناطیسی پروتون بیان کنید. (ب) آیا با استفاده ازاین مدل، گشتاورمغناطیسی قابل مشاهدهٔ نوترون را می‌توان تعیین کرد؟ فرض کنیدکه تابع‌موج نوترون متشکل از دو قسمت باشد: یك قسمت مربوط به‌نوترون «دیراك» با $g=0$، وقسمت دیگرمربوط به‌مجموعهٔ پروتون ومزون π. بزرگی نسبی این دوقسمت ازتابع‌موج چقدراست؟ (فرض کنیدکه پروتون هم مانند یك ذرهٔ ایده‌آل دیراك عمل کند.) (ج) تحلیل قبلی را برای گشتاورمغناطیسی پروتون تکرارکنید. یعنی پروتون را متشکل از دو قسمت در نظر بگیرید: یك قسمت پروتون خالص دیراك و قسمت دیگر نوترون دیراك همراه با مزون مثبت π در حالت مداری $l=1$.

۲۰. فرض کنیدکه گشتاور مغناطیسی پروتون را ناشی از حرکت دورانی یك توزیع بار مثبت یکنواخت و کروی به شعاع R، که با سرعت زاویه‌ای ω حول محورش می‌چرخد، درنظر بگیریم. (الف) از طریق انتگرال‌گیری توزیع بار نشان دهیدکه $\mu=e\omega R^2/5$ است. (ب) با استفاده از رابطهٔ کلاسیك بین تکانهٔ زاویه‌ای وسرعت دورانی نشان‌دهیدکه $\omega R^2=s/0.4m$ است. (ج)سرانجام،رابطهٔ $\mu=(e/2m)s$ را که مشابه معادلهٔ (۳۲.۳) است، به‌دست آورید.

۲۱. گشتاور چارقطبی الکتریکی یك بیضیوار دوار را با توزیع بار یکنواخت و نیم‌محورهای بزرگ و کوچك b و a محاسبه کنید.

۴

نیروی بین نوکلئونها

حتی پیش از پرداختن به هرگونه آزمایشی برای بررسی نیروی بین دونوکلئون می‌توان بعضی ازخواص نیروی نوکلئون ـ نوکلئون را حدس زد:

۱. این نیرو درفواصل کوتاه قویتر ازنیروی کولنی است؛ زیرا نیروی هسته‌ای می‌تواند بر دافعهٔ کولنی پروتونها درهسته غلبه کند.
۲. نیروی هسته‌ای درفواصل بلندی که درحدود ابعاد اتمی باشند، به حدی ضعیف می‌شود که می‌توان ازآن صرفنظر کرد. برهم‌کنش هسته‌های موجود دریك مولکول با یکدیگر فقط براساس نیروی کولنی قابل درك است.
۳. بعضی از ذرات تحت تأثیر نیروی هسته‌ای قرار نمی‌گیرند. برای نمونه، هیچ دلیلی از ساختار اتمی دردست نیست که نیروی هسته‌ای تأثیری روی الکترونها داشته باشد.

وقتی که به‌منظور کشف خواص نیروی هسته‌ای به‌انجام آزمایشهایی خاص مبادرت می‌ورزیم، به‌چند خاصیت قابل توجه دیگرهم برخورد می‌کنیم:

۴. به‌نظر می‌رسد که نیروی نوکلئون ـ نوکلئون تقریباً مستقل از نوع نوکلئونهاست، یعنی پروتون و نوترون هیچ فرقی با هم ندارند. این خاصیت را استقلال از بار می‌گویند.
۵. نیروی نوکلئون ـ نوکلئون به‌موازی یا پادموازی بودن اسپین نوکلئونها بستگی دارد.
۶. نیروی نوکلئون ـ نوکلئون شامل یك جملهٔ دافعه نیز هست که نوکلئونها را در فاصلهٔ متوسط معینی از یکدیگر نگه می‌دارد.

۷. نیروی نوکلئون ـ نوکلئون دارای مؤلفهٔ تانسوری یا غیرمرکزی است. این بخش از نیرو باعث ناپایستگی تکانهٔ زاویه‌ای مداری می‌شود. تکانهٔ زاویه‌ای یکی از ثابتهای حرکت درمیدان نیروی مرکزی است.

دراین فصل خواص نیروی هسته‌ای را به‌تفصیل مورد بحث قرارمی‌دهیم، چگونگی آزمایش و طرز اندازه‌گیری آنها را بررسی می‌کنیم، و چند شکل اساسی برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون را مطرح خواهیم‌کرد.

۱.۴ دوترون

دوترون (هستهٔ ^{۲}H)، ازگردهمایی یك نوترون و یك پروتون تشکیل می‌شود. (اتم خنثای ^{۲}H را دوتریم می‌نامند.) این هسته ساده‌ترین حالت مقید نوکلئونهاست، و به همین دلیل سیستمی ایده‌آل برای مطالعهٔ برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون به‌شمارمی‌رود. دوترون برای متخصصان فیزیك هسته‌ای همان نقشی را دارد که اتم هیدروژن برای متخصصان فیزیك اتمی داشته است. همچنانکه گذار الکترومغناطیسی بین حالتهای برانگیختهٔ اتم هیدروژن در سری تجربی بالمر به درك ساختار هیدروژن کمك کرده است، گذار الکترومغناطیسی بین حالتهای برانگیختهٔ دوترون نیز باید به درکی از ساختار هستهٔ ^{۲}H بینجامد. متأسفانه در این هسته، هیچ نوع حالت برانگیخته‌ای سراغ نداریم. بستگی این سیستم آن چنان ضعیف است که «حالتهای برانگیختهٔ» آن فقط به‌صورت پروتون و نوترون آزاد درسیستم نامقید ظاهرمی‌شود.

انرژی بستگی

انرژی بستگی دوترون، کمیتی است که با دقت بسیار زیاد اندازه‌گیری می‌شود و به سه روش مختلف قابل تعیین است. جرم دوترون را ازطریق طیف‌نمایی می‌توان مستقیماً تعیین کرد، وسپس انرژی بستگی را به‌کمك معادلهٔ (۲۵.۳) به‌دست آورد. با استفاده از روش دوتایهٔ جرمی که دربخش ۲.۳ توصیف شد، نتایج زیر به دست آمده است (نماد D را برای ^{۲}H به‌کار می‌بریم)

$$m(C_۶H_{۱۲})-m(C_۶D_۶)=(۹٫۲۸۹۷۱۰ \pm ۰٫۰۰۰۰۲۴)\times ۱۰^{-۳}\,u$$

و

$$m(C_۵D_{۱۲})-m(C_۶D_۶)=۸۴٫۶۱۰۶۲۶ \pm ۰٫۰۰۰۰۹۰)\times ۱۰^{-۳}\,u$$

با قراردادن $m(^{۱}H)=۱٫۰۰۷۸۲۵۰۳۷\,u$ از رابطهٔ اول به‌دست می‌آید

$$m(^{۲}H)=۲٫۰۱۴۱۰۱۷۸۹ \pm ۰٫۰۰۰۰۰۰۰۲۱\,u$$

واز رابطهٔ دوم حاصل می‌شود

$$m(^{2}\mathrm{H}) = ۲٫۰۱۴۱۰۱۷۷۱ \pm ۰٫۰۰۰۰۰۰۰۰۱۵\ \mathrm{u}$$

مقادیر حاصل بسیار دقیق وسازگاری‌شان باهم خیلی خوب است. با استفاده ازاین مقادیر وجرمهای اندازه‌گیری شدهٔ $^{1}\mathrm{H}$ و نوترون، انرژی بستگی را می‌توان به‌دست آورد

$$B = [m(^{1}\mathrm{H}) + m(\mathrm{n}) - m(^{2}\mathrm{H})]c^{2} = ۲٫۲۲۴۶۳ \pm ۰٫۰۰۰۰۴\ \mathrm{MeV}$$

با نزدیک‌سازی یك پروتون به یك نوترون و تشکیل $^{2}\mathrm{H}$، و اندازه‌گیری انرژی فوتون پرتوگامای گسیل‌شده دراین فرایند نیزمی‌توانیم انرژی بستگی دوترون را مستقیماً تعیین کنیم

$$^{1}\mathrm{H} + \mathrm{n} \rightarrow {}^{2}\mathrm{H} + \gamma$$

انرژی بستگی حاصل از این روش که از انرژی فوتون تولید شده و پس از مختصری تصحیح، به‌خاطر پس‌زنی $^{2}\mathrm{H}$، به‌دست می‌آید برابر $۲٫۲۲۴۵۸۹ \pm ۰٫۰۰۰۰۰۰۲\mathrm{MeV}$ است که بخوبی با مقدار حاصل از روش طیف‌نمایی جرمی سازگاری دارد. در روش سوم، از واکنش معکوس موسوم به‌تجزیهٔ فوتونی استفاده می‌شود

$$\gamma + {}^{2}\mathrm{H} \rightarrow {}^{1}\mathrm{H} + \mathrm{n}$$

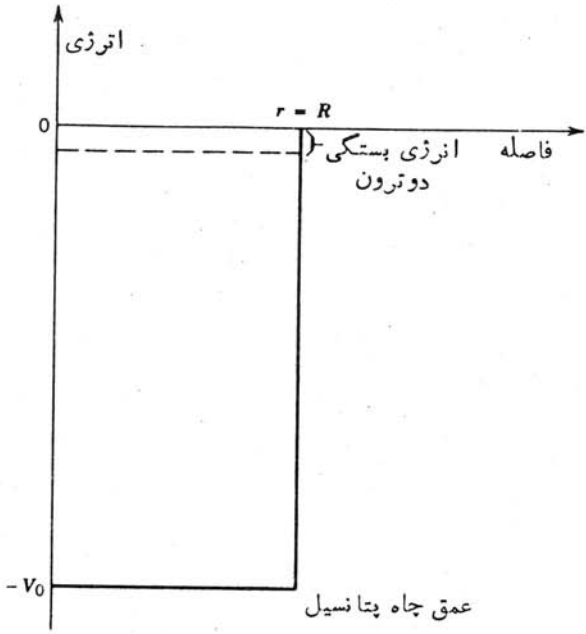
که درآن فوتون پرتوگاما، دوترون را به دو پاره تقسیم می‌کند. کمینهٔ انرژی پرتوگامایی که بتواند چنین فرایندی را انجام دهد، برابر انرژی بستگی است (در اینجا هم باید تصحیح مربوط به‌پس‌زنی محصولات نهایی درنظرگرفته شود). مقدار مشاهده شده برابر $۲٫۲۲۴ \pm ۰٫۰۰۲\ \mathrm{MeV}$ است که بامقدارحاصل از روش طیف‌نمایی‌جرمی سازگاری خوبی دارد.

چنانکه دربحث بخش ۳.۳ گفتیم، انرژی بستگی متوسط هر نوکلئون در حدود $۸\mathrm{MeV}$ است. بنابراین، بستگی دوترون در مقایسه با هسته‌های دیگرخیلی ضعیف است. اکنون ببینیم درمطالعهٔ خواص دوترون، این نتیجه را چگونه می‌توان تحلیل کرد.

برای سهولت‌این بررسی، پتانسیل نوکلئون ـ نوکلئون رامطابق شکل۱.۴ به‌صورت یك چاه مربعی سه‌بعدی نشان می‌دهیم

$$\begin{aligned} V(r) &= -V_{۰}, \quad r < R \\ &= ۰, \quad r > R \end{aligned} \tag{۱.۴}$$

البته این فرض مسئله را بیش از حد ساده می‌کند، ولی دستکم برای بعضی نتیجه‌گیریهای کیفی کفایت خواهدکرد. دراینجا r فاصلهٔ جدایی بین نوترون و پروتون را نشان می‌دهد، و از این‌رو R حدود بزرگی قطر دوترون را مشخص می‌کند. فرض کنیدکه در پایینترین



شکل ۱.۴ این چاه پتانسیل سه‌بعدی تقریبی ازپتانسیل هسته‌ای است. عمق چاه $-V_0$ است که مقدار آن در حدود ۳۵ MeV براورد می‌شود. انرژی حالت مقید دوترون در حدود ۲ MeV− وخیلی نزدیك به‌لبهٔ چاه است.

حالت انرژی دوترون، درست مانند پایینترین حالت انرژی اتم هیدروژن، داریم $l=0$. (درستی این فرض را بعداً درهمین بخش، هنگام بحث از اسپین دوترون، توجیه خواهیم کرد.) اگر بخش شعاعی تابع‌موج $\psi(\mathbf{r})$ رابه‌صورت $u(r)/r$ نشان دهیم، معادلهٔ(۶۰.۲) را می‌توانیم چنین بازنویسی کنیم

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2u}{dr^2}+V(r)u(r)=Eu(r) \qquad (۲.۴)$$

این‌معادله دقیقاً مانند معادلهٔ یك‌بعدی(۴.۲) است که جواب آن را درقیاس بامعادلهٔ(۴۷.۲) می‌توان پیدا کرد. برای ناحیهٔ $r<R$ داریم

$$u(r)=A\sin k_1 r+B\cos k_1 r \qquad (۳.۴)$$

که درآن $k_1=\sqrt{2m(E+V_0)/\hbar^2}$ است، و برای ناحیهٔ $r>R$ خواهیم داشت

$$u(r)=Ce^{-k_2 r}+De^{+k_2 r} \qquad (۴.۴)$$

که در آن $k_2=\sqrt{-2mE/\hbar^2}$ است. (یادآور می‌شود که برای حالتهای مقید، $E<0$ است.) برای آنکه تابع به‌ازای $r\to\infty$ متناهی بماند لازم است که $D=0$ باشد، و برای آنکه تابع به‌ازای $r\to 0$ متناهی بماند باید $B=0$ شود. [تابع ψ به $u(r)/r$ بستگی دارد، وقتی‌که $r\to 0$ تابع $u(r)$ هم باید به‌سمت صفرمیل کند.] با اعمال شرایط پیوستگی u و du/dr در $r=R$، به‌دست می‌آوریم

$$k_1 \cot k_1 R = -k_2 \qquad (۵.۴)$$

این معادلهٔ غیرجبری، ارتباط میان V_0 و R را نشان می‌دهد. در آزمایشهای پراکندگی الکترون، ریشهٔ میانگین مربعی شعاع دوترون درحدود ۲٫۱ fm به‌دست می‌آید که نخستین براورد معقول از R است. با قراردادن این مقدار درمعادلهٔ(۵.۴) وحل عددی آن (مسئلهٔ ۶ را درپایان همین‌فصل ببینید)، خواهیم‌داشت $V_0=35\ \mathrm{MeV}$. این براورد عمق پتانسیل نوکلئون ـ نوکلئون، درعمل حتی برای هسته‌های پیچیده‌تر هم کاملا پذیرفتنی است. (اما توجه داشته باشید که فاصله‌های بزرگتر از R هم برای پروتون و نوترون کاملا محتمل است، مسئلهٔ ۴.)

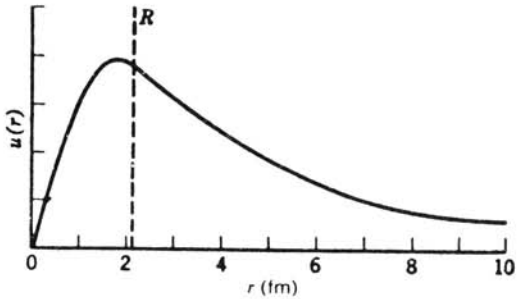
چنانکه در شکل ۱.۴ دیده می‌شود، حالت انرژی دوترون خیلی به‌لبهٔ چاه نزدیک است. اگر نیروی نوکلئون ـ نوکلئون فقط اندکی ضعیفتر بود، حالت مقید دوترون نمی‌توانست وجود داشته باشد (مسئلهٔ ۳). اما جای خوشبختی است که چنین حالت مقیدی وجود دارد. زیرا تشکیل دوتریم ازهیدروژن، نه‌تنها نخستین‌مرحلهٔ چرخهٔ همجوشی پروتون ـ پروتون به‌عنوان منشأ انرژی خورشیدی است، بلکه نخستین مرحلهٔ تشکیل مواد پایدار هم به‌شمارمی‌رود. دراین صورت عناصر پایدار، با استفاده ازسنگ بنای هیدروژن آغازین که در بدو امر سراسرعالم را فراگرفته بود، ساخته شده‌اند. اگرحالت مقید دونوکلئونی پایدار وجود نمی‌داشت، ماهم نبودیم تادربارهٔ آن بحث کنیم! [برای توضیح بیشتردربارهٔ پیامدهای کیهانشناختی تشکیل دوتریم در مراحل اولیهٔ عالم به‌فصل ۱۹ (جلد دوم، ترجمهٔ فارسی) رجوع کنید.]

تابع‌موج دوترون را درشکل۲.۴ نشان داده‌ایم. انرژی بستگی کم دراینجا بدان‌معنی است که تابع $\psi(r)$ درست در داخل چاه و درنزدیکی مرز $r=R$ از قله سرازیرمی‌شود تا در $r=R$ با شیب منفی به‌تابع‌نمایی نزولی بپیوندد.

اسپین و پاریته

تکانهٔ زاویه‌ای کل $\mathbf{I}$ در دوترون باید دارای سه‌مؤلفه باشد که عبارت‌اند از: اسپین هریک از ذرات پروتون و نوترون، $\mathbf{s}_p$ و $\mathbf{s}_n$ (که هر کدام برابر ۱/۲ است)، و تکانهٔ زاویه‌ای مداری $\mathbf{l}$ نوکلئونها در حرکت حول مرکز جرم مشترک

$$\mathbf{I}=\mathbf{s}_n+\mathbf{s}_p+\mathbf{l} \qquad (۶.۴)$$



شکل ۲.۴ تابع‌موج دوترون برای $R=2.1$ fm. توجه کنید که پیوندتابعهای نمایی‌وسینوسی در $r=R$ چنان ملایم است که $u(r)$ و du/dr هردو پیوسته‌اند. اگر قلهٔ تابع‌موج در داخل $r=R$ قرار نمی‌گرفت، پیوند ملایم آن با تابع نمایی درحال نزول (با شیب منفی) امکان‌پذیر نمی‌شد وحالت مقید هم تحقق پیدا نمی‌کرد.

هنگامی که معادلهٔ شرودینگر را برای دوترون حل کردیم، همانند مورد پایینترین حالت مقید (یا نخستین حالت) اتم هیدروژن فرض کردیم $l=0$ است. اسپین اندازه‌گیری شدهٔ دوترون برابر $I=1$ است [چگونگی این اندازه‌گیری را درفصل۱۶ (جلد دوم، ترجمهٔ فارسی) بررسی می‌کنیم]. چون اسپین پروتون ونوترون یا با هم موازی (با اسپین کل ۱) و یا پاد موازی (با اسپین کل صفر) هستند، بردارهای $\mathbf{s}_n$، $\mathbf{s}_p$، و $\mathbf{l}$ به چهار صورت می‌توانند با هم جمع شوند به‌طوری‌که منتجهٔ I برابر ۱ شود:

(الف) $\mathbf{s}_n$ و $\mathbf{s}_p$ موازی و $l=0$.

(ب) $\mathbf{s}_n$ و $\mathbf{s}_p$ پادموازی و $l=1$.

(ج) $\mathbf{s}_n$ و $\mathbf{s}_p$ موازی و $l=1$.

(د) $\mathbf{s}_n$ و $\mathbf{s}_p$ موازی و $l=2$.

یکی دیگراز خواص قابل تعیین دوترون، پاریتهٔ آن (به‌صورت زوج یا فرد) است که رفتار تابع موج را هنگام $\mathbf{r}\to-\mathbf{r}$ نشان می‌دهد (بخش ۶.۲). از بررسی واکنشهایی که دوترون در آنها شرکت دارد و بررسی خواص فوتون گسیل شده در طی تشکیل دوترون، پاریتهٔ دوترون را زوج به‌دست می‌آوریم. در بخش ۶.۲ گفتیم که پاریتهٔ منتسب به‌حرکت مداری به‌صورت $(-1)^l$ قابل‌تعیین‌است. یعنی برای $l=0$ (حالتهای s) و $l=2$ (حالتهای d) پاریتهٔ زوج است، و برای $l=1$ (حالتهای p) پاریته فرد است. با توجه به نتیجهٔ تجربی زوج بودن پاریتهٔ دوترون، ترکیبهای (ب) و (ج) در بالا که در آنها $l=1$ است قابل حذف‌اند، و ترکیبهای (الف) و (د) به صورت مقادیر قابل قبول $l=0$ و $l=2$ باقی می‌مانند. بنابراین اسپین و پاریتهٔ دوترون با فرض $l=0$ سازگار است، ولی هنوز نمی‌توانیم احتمال $l=2$ را منتفی بدانیم.

گشتاور دوقطبی مغناطیسی

در بخش ۵.۳ دربارهٔ سهم حرکت‌مداری و اسپین در تولید گشتاور دوقطبی مغناطیسی بحث کردیم. اگر فرض $l = ۰$ درست باشد، حرکت مداری هیچ‌گونه سهمی در گشتاورمغناطیسی نباید داشته باشد و می‌توانیم گشتاورمغناطیسی کل را حاصل ترکیب گشتاورهای مغناطیسی نوترون و پروتون تلقی کنیم

$$\mu = \mu_n + \mu_p$$

$$= \frac{g_{sn}\mu_N}{\hbar}\mathbf{s}_n + \frac{g_{sp}\mu_N}{\hbar}\mathbf{s}_p \qquad (۷.۴)$$

که در آن $g_{sn} = -۳٫۸۲۶۰۸۴$ و $g_{sp} = ۵٫۵۸۵۶۹۱$ است. چنانکه در بخش ۵.۳ دیدیم، گشتاور مغناطیسی مشاهده شده را با مؤلفهٔ μ در راستای z در شرایطی که اسپینها بزرگترین‌مقدارشان $(+۱/۲\,\hbar)$ را دارند برابر می‌گیریم

$$\mu = \frac{۱}{۲}\mu_N(g_{sn} + g_{sp}) \qquad (۸.۴)$$

$$= ۰٫۸۷۹۸۰۴\mu_N$$

مقدارمشاهده شده برابر $۰٫۸۵۷۴۳۷۶ \pm ۰٫۰۰۰۰۰۰۴\mu_N$ است که سازگاری خوبی با مقدار محاسبه شده دارد، ولی این سازگاری کامل نیست. اختلاف کوچکی راکه بین این دومقدار وجود دارد می‌توان به عواملی از قبیل مزونهای مبادله شده بین نوترون و پروتون نسبت داد. در بحث فعلی، می‌توانیم این اختلاف را ناشی از اختلاط تابع‌موج و وجود سهم کوچکی از حالت d$(l = ۲)$ در تابع موج دوترون بگیریم

$$\psi = a_s\psi(l = ۰) + a_d\psi(l = ۲) \qquad (۹.۴)$$

گشتاورمغناطیسی دوترون به‌کمك این تابع‌موج، چنین به‌دست می‌آید

$$\mu = a_s^۲\mu(l = ۰) + a_d^۲\mu(l = ۲) \qquad (۱۰.۴)$$

که در آن $\mu(l = ۰)$ همان مقداری است که در معادلهٔ (۸.۴) محاسبه شده است، و $\mu(l = ۲) = (۱/۴)(۳ - g_{sp} - g_{sn})\mu_N$ مقدارمحاسبه‌شده برای حالت d است. مقدار مشاهده شدهٔ گشتاورمغناطیسی با $a_s^۲ = ۰٫۹۶$ و $a_d^۲ = ۰٫۰۴$ سازگاراست، یعنی دوترون از ترکیب ۹۶٪ حالت $l = ۰$ وفقط ۴٪ حالت $l = ۲$ حاصل می‌شود. بدین‌ترتیب معلوم می‌شودکه فرض حالت خالص $l = ۰$، که درمحاسبهٔ عمق چاه درنظر گرفتیم، فرضی نسبتاً خوب است ولی خیلی کامل نیست.

گشتاور چارقطبی الکتریکی

نوترون و پروتون به‌طور جداگانه هیچ‌گونه گشتاور چارقطبی الکتریکی ندارند. پس هر مقدار غیرصفری که از اندازه‌گیری گشتاور چارقطبی به‌دست آید، باید ناشی از حرکت مداری تلقی شود. دراین صورت، گشتاور چارقطبی حاصل از تابع‌موج $l=0$ خالص برابر صفرخواهد شد. گشتاور چارقطبی مشاهده شده عبارت است از

$$Q = 0{,}00288 \pm 0{,}00002\,\mathrm{b}$$

که در عین کوچك بودن در مقایسه با گشتاور بسیاری از هسته‌های دیگر، مسلماً برابرصفر نیست.

تابع‌موج مخلوط معادلهٔ (۹.۴) هنگامی که برای محاسبهٔ Q در معادلهٔ (۳۶.۳) به‌کار برده می‌شود، مقدار Q را در دو قسمت به دست می‌دهد: یك قسمت متناسب با a_d^2 و قسمت دیگرمتناسب با حاصلضرب $a_s a_d$. با انجام این محاسبه خواهیم داشت

$$Q = \frac{\sqrt{2}}{10} a_s a_d \langle r^2 \rangle_{sd} - \frac{1}{20} a_d^2 \langle r^2 \rangle_{dd} \qquad (۱۱.۴)$$

که در آن $\langle r^2 \rangle_{sd} = \int r^2 R_s(r) R_d(r) r^2\, dr$ انتگرال r^2 روی تابع‌موجهای شعاعی است، $\langle r^2 \rangle_{dd}$ نیز به‌همین ترتیب تعریف می‌شود. برای محاسبهٔ Q لازم است که تابع‌موج حالت d دوترون راکه مستقیماً قابل اندازه‌گیری نیست بدانیم. با استفاده از پتانسیلهای پدیده‌شناختی واقع‌بینانه‌ای که بعداً درهمین فصل مورد بحث قرار می‌گیرد، با چند درصد اختلاط حالت d مقادیرقابل قبولی برای Q به‌دست می‌آوریم که با ۴٪ اختلاط استنباط شده از گشتاورمغناطیسی بخوبی سازگاری دارد.

این سازگاری بین اختلاطهای حالت d که با استفاده از کمیتهای μ و Q حاصل می‌شود را نباید زیاد جدی گرفت بلکه باید آن را ناشی ازحسن تصادف تلقی کرد. در مورد گشتاور دوقطبی مغناطیسی، هیچ دلیلی نداریم که انتظارداشته‌باشیم استفاده از گشتاور مغناطیسی نوکلئون آزاد در هسته‌ها کار درستی باشد. (در واقع، درفصل بعد خواهیم دید که شواهد محکمی دردست است که خلاف آن را نشان می‌دهد.) متأسفانه نوکلئون درون دوترون حالتی بینابینی دارد، یعنی نه‌آزاد است و نه قیدی قوی دارد، و هیچ نشانه‌ای هم در دست نیست که گشتاور مغناطیسی آن را چقدر باید درنظر گرفت. برهم‌کنش اسپین‌مدار، اثرات نسبیتی، و تبادل مزون ممکن است تأثیری بزرگتر از اختلاط حالت d بر مقدار μ داشته باشند (ولی این احتمال هم وجود دارد که این‌گونه اثرات درجهت حذف یکدیگر عمل کنند). درمورد گشتاورچارقطبی، اطلاع اندك ازتابع‌موج حالت d باعث عدم‌اطمینان از درصد اختلاط براورد شده برای حالت d می‌شود. (شاید بهتر باشد که محاسبهٔ Q را براساس درصد اختلاط معلوم حالت d، به عنوان آزمونی برای تابع‌موج حالت d تلقی کنیم.) آزمایشهای دیگر هم، بویژه آزمایشهای پراکندگی هدفهای دوترون، اختلاط حالت d را درحدود ۴٪ به‌دست می‌دهد. بدین ترتیب معلوم می‌شود که نتیجهٔ حاصل از

گشتاورهای دوقطبی مغناطیسی وچارقطبی الکتریکی، درنهایت ممکن است معتبر باشد.

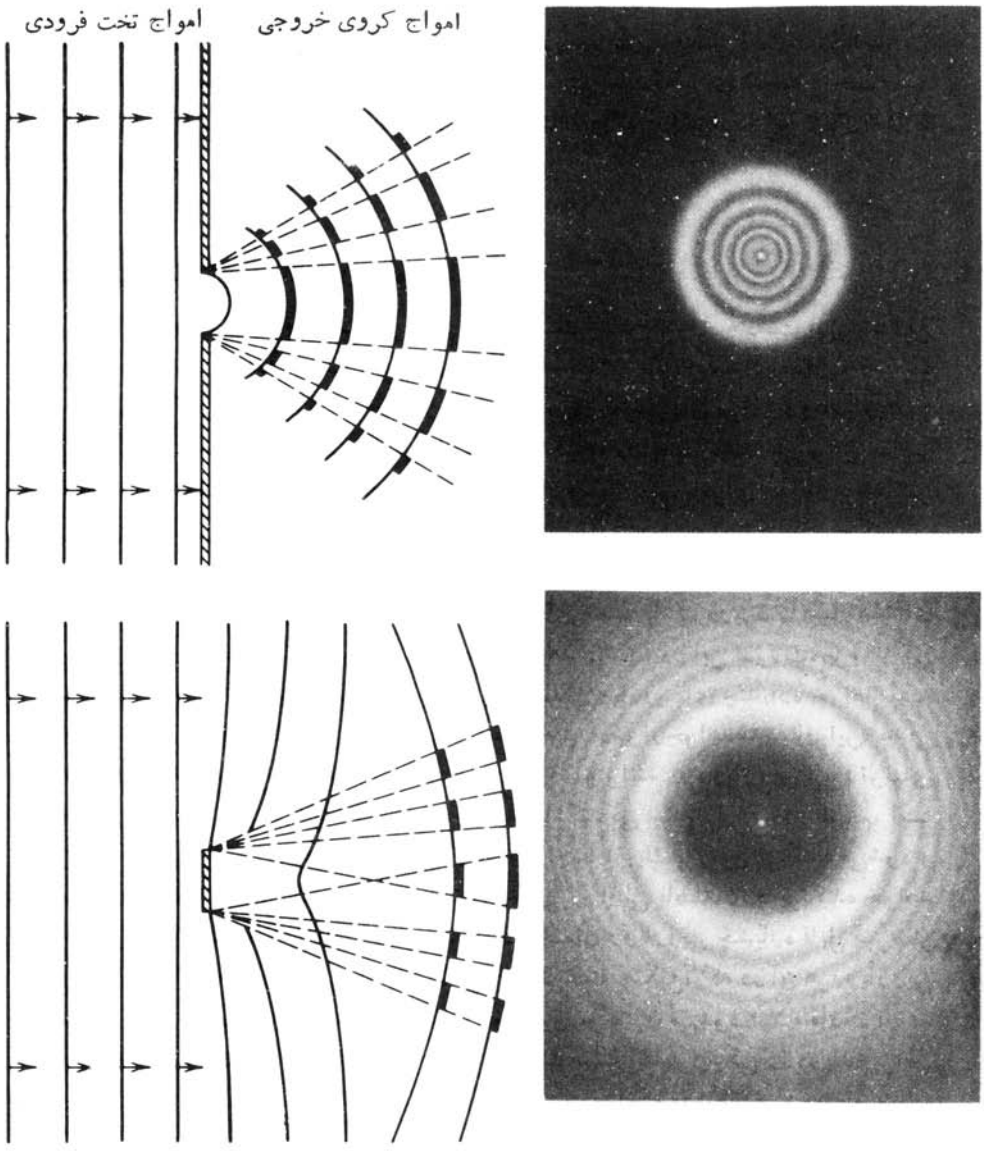
آگاهی‌دقیق‌ازتابع‌موج‌حالت d ازاین جهت مهم است که برای تشخیص خصوصیت غیرمرکزی (یا تانسوری) نیروی هسته‌ای بهترین نشانه‌ای که دراختیارداریم همان‌اختلاط مقادیر l در دوترون است.

۲.۴ پراکندگی نوکلئون ـ نوکلئون

بررسی دوترون اگرچه قرائنی از برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون به دست می‌دهد، ولی مقدار اطلاعات آن محدود است. چون دوترون هیچ حالت برانگیخته‌ای ندارد، دینامیك برهم‌کنش‌نوکلئون‌ـنوکلئون را فقط درپیکربندی $l = 0$، اسپینهای موازی، وفاصلهٔ ۲fm می‌توانیم مورد مطالعه قراردهیم. (اگرحالتهای برانگیخته دراختیارباشد، می‌توانیم مقادیر مختلف l یا سمتگیریهای متفاوت اسپین را هم بررسی کنیم.) برای مطالعهٔ برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون در پیکربندیهای مختلف، می‌توانیم آزمایشهای پراکندگی نوکلئون ـ نوکلئون را که درآنها باریکه‌ای از نوکلئونهای فرودی توسط هدف نوکلئونی پراکنده می‌شود بررسی کنیم. اگرهدف یك‌هسته بانوکلئونهای متعدد باشد، دربرد پتانسیل هسته‌ای نوکلئون فرودی چندین نوکلئون هدف وجود خواهد داشت. در این صورت، پراکندگی ایجادشده برای‌هرنوکلئون منفرد شامل اثرات پیچیدهٔ رویاروییهای چندباره خواهد بود، وتعیین خواص برهم‌کنش بین نوکلئونهای منفرد خیلی دشوارخواهدشد. بنابراین، هدفی ازهیدروژن انتخاب می‌کنیم به‌طوری‌که ذرات فرودی بتوانند در رویارویی باپروتونهای منفرد پراکنده شوند. در اینجا هم ممکن است با پراکندگی چندباره روبه‌رو شویم، اما این پراکندگیها به‌این صورت خواهد بودکه ذره ابتدا از یك پروتون پراکنده می‌شود و سپس از پروتون دیگری‌که در مقیاس هسته‌ای خیلی از اولی فاصله دارد پراکنده خواهد شد. اگراحتمال رویارویی منفردکوچك باشد، احتمال رویارویی چندباره قابل صرفنظر خواهد بود. این مورد با پراکندگی ناشی از یك هستهٔ سنگین، که درآن هررویارویی منفرد با هستهٔ هدف شامل چندین برهم‌کنش نوکلئون‌ـنوکلئون می‌شودکاملا متفاوت است.

قبل از بحث دربارهٔ پراکندگی هسته‌ای، یك مسئلهٔ مشابه اپتیکی را دربارهٔ پراش امواج از یك شکاف یا مانع کوچك یادآوری می‌کنیم. چنانکه درشکل ۳.۴ دیده می‌شود، نقش پراش حاصل از یك مانع خیلی شبیه به نقش حاصل از یك شکاف با همان اندازه است. پراکندگی هسته‌ای شباهت زیادی به‌پراش ازیك مانع دارد، وبه‌همین دلیل بحثمان را روی آن متمرکز می‌کنیم. پراش اپتیکی دارای سه ویژگی مشابه با پراکندگی نوکلئونهاست:

۱. موج فرودی به‌صورت موج تخت نموده می‌شود، در حالی‌که در نقاط دور از مانع جبههٔ‌موج پراکنده به‌صورت موج کروی است. کل‌انرژی موجود درهرجبههٔ موج کروی در حال گسترش، قابل تغییرنیست. یعنی، شدت موج باید برحسب r^{-2} و دامنهٔ آن



شکل ۳.۴ نمایش پراکندگی حاصل از یك روزنهٔ کوچك (بالا) و یك مانع کوچك (پایین). نواحی شدت زیاد و کم، روی جبهه‌های موج با خطوط کلفت و نازك نموده شده‌است. درعکسهای سمت راست، نقش پـراش حاصل از یك روزنهٔ دایره‌ای و یك قرص دایره‌ای کدر نشان داده شده است.

باید برحسب r^{-1} کاهش یابد.

۲. پدیدهٔ پراش باعث می‌شود که شدت تابش پراکنده در نقاط مختلف سطح جبههٔ موج کروی تغییر کند. بدین جهت، شدت امواج پراکنده به‌مختصات زاویه‌ای θ و ϕ بستگی پیدا می‌کند.

۳. آشکارسازی که در نقطه‌ای دور از مانع قرار می‌گیرد، هر دو موج فرودی و پراکنده را ثبت خواهد کرد.

برای حل کوانتوم مکانیکی مسئلهٔ پراکندگی نوکلئون ـ نوکلئون، همانند بخش قبلی، باز هم فرض می‌کنیم که بتوانیم برهم‌کنش را به‌کمك چاه پتانسیل مربعی نمایش دهیم. در واقع، تنها فرقی که این محاسبه با مورد دوترون دارد، این است که در اینجا با ذرات فرودی آزاد با انرژی $E>0$ سروکار داریم. باردیگر معادلهٔ شرودینگر را با فرض $l=0$ ساده می‌کنیم. توجیه این‌فرض هیچ ربطی به‌توجیه فرض مشابه درمحاسبهٔ دوترون ندارد. یك نوکلئون فرودی را چنان در نظرمی‌گیریم که درست درسطح خارجی نوکلئون هدف با آن برخورد کند، یعنی پارامتر برخورد (فاصلهٔ عمودی مرکز نوکلئون هدف از خط سیر نوکلئون فرودی) از مرتبهٔ $R \simeq 1\,\mathrm{fm}$ باشد. اگر سرعت ذرهٔ فرودی v باشد، تکانهٔ زاویه‌ای آن نسبت به‌هدف برابر mvR می‌شود. تکانهٔ زاویه‌ای نسبی بین نوکلئونها باید برحسب یکای $\hbar$ کوانتیده باشد، یا به زبان نیمه‌کلاسیك $mvR=l\hbar$ شود. اگر $mvR \ll \hbar$ باشد، آنگاه فقط برهم‌کنشهای $l=0$ قابل تحقق‌اند. دراین صورت، داریم $v \ll \hbar/mR$ وانرژی جنبشی متناظرچنین براورد می‌شود

$$T=\frac{1}{2}mv^2 \ll \frac{\hbar^2}{2mR^2}=\frac{\hbar^2c^2}{2mc^2R^2}=\frac{(200\,\mathrm{MeV}\cdot\mathrm{fm})^2}{2(1000\,\mathrm{MeV})(1\,\mathrm{fm})^2}=20\,\mathrm{MeV}$$

هرگاه انرژی فرودی خیلی کمتر از $20\,\mathrm{MeV}$ باشد، فرض $l=0$ قابل توجیه است. پس در اینجا فقط پراکندگی کم ـ انرژی را در نظر می‌گیریم که برای آن فرض $l=0$ معتبر است.

مسئلهٔ پراکندگی نوکلئون ـ نوکلئون را در دستگاه مختصات مرکز جرم (پیوست ب) حل می‌کنیم. جرمی که در معادلهٔ شرودینگرظاهر می‌شود، جرم کاهیده‌است که دراین حالت تقریباً برابرنصف جرم نوکلئون می‌شود.

در اینجا هم برای آنکه $u(r)/r$ به‌ازای $r \to 0$ متناهی بماند، داریم $B=0$ و جواب مسئلهٔ چاه مربعی برای $r<R$ به صورت معادلهٔ (۳.۴) خواهد بود. در ناحیهٔ $r>R$، تابع‌موج چنین می‌شود

$$u(r)=C'\sin k_2 r+D'\cos k_2 r \qquad (12.4)$$

که درآن $k_2=\sqrt{2mE/\hbar^2}$ است، آسانتراست که معادلهٔ(۱۲.۴) را به‌صورت زیر بنویسیم

$$u(r)=C\sin(k_2 r+\delta) \qquad (13.4)$$

که در آن داریم

$$C' = C\cos\delta \quad \text{و} \quad D' = C\sin\delta \tag{۱۴.۴}$$

با استفاده از شرایط مرزی u و du/dr در $r=R$ حاصل می‌شود

$$C\sin(k_2R+\delta) = A\sin k_1R \tag{۱۵.۴}$$

و

$$k_2C\cos(k_2R+\delta) = k_1A\cos k_1R \tag{۱۶.۴}$$

که پس از تقسیم آنها خواهیم داشت

$$k_2\cot(k_2R+\delta) = k_1\cot k_1R \tag{۱۷.۴}$$

بازهم به‌یك معادلهٔ غیرجبری می‌رسیم که باید حل شود. درصورت معلوم بودن E (که از طریق انرژی ذرهٔ فرودی قابل تعیین است)، V_0، و R، می‌توان مقدار δ را به‌دست‌آورد.

قبل از بحث دربارهٔ روشهای تعیین پارامتر δ درمعادلهٔ (۱۷.۴)، چگونگی پیدایش δ را در جواب معادلهٔ شرودینگر بررسی می‌کنیم. هنگامی‌که $V_0 \to 0$ (در این حالت هرگز پراکندگی اتفاق نمی‌افتد)، داریم $k_1 \to k_2$ و $\delta \to 0$. این همان جواب ذرهٔ آزاد است. اثر V_0 را برتابع‌موج درشکل ۴.۴ نشان داده‌ایم. تابع‌موج درناحیهٔ $r>R$ همان شکل تابع‌موج ذرهٔ آزاد را دارد، ولی در این حالت یك اختلاف فاز δ درآن پیدا شده است. پتانسیل پراکننده‌ای که از نوع جاذبه است، نقطهٔ صفر یا گرهٔ تابع‌موج را به‌طرف مبدأ «می‌کشد». (اما پتانسیلی‌که از نوع دافعه است، گره‌ها را ازمبدأ دور می‌کند واختلاف فاز منفی می‌شود.) امواج فرودی را برحسب تکانهٔ زاویه‌ای‌شان نسبت به هدف می‌توان به‌صورت مؤلفه‌های $l=0$ (که تاکنون درنظر بوده است)، $l=1$، وغیره درنظر گرفت. به‌ازای هرمؤلفه‌ای از l یك جواب متفاوت برای معادلهٔ شرودینگر ویك اختلاف فاز مشخص δ_l خواهیم داشت.

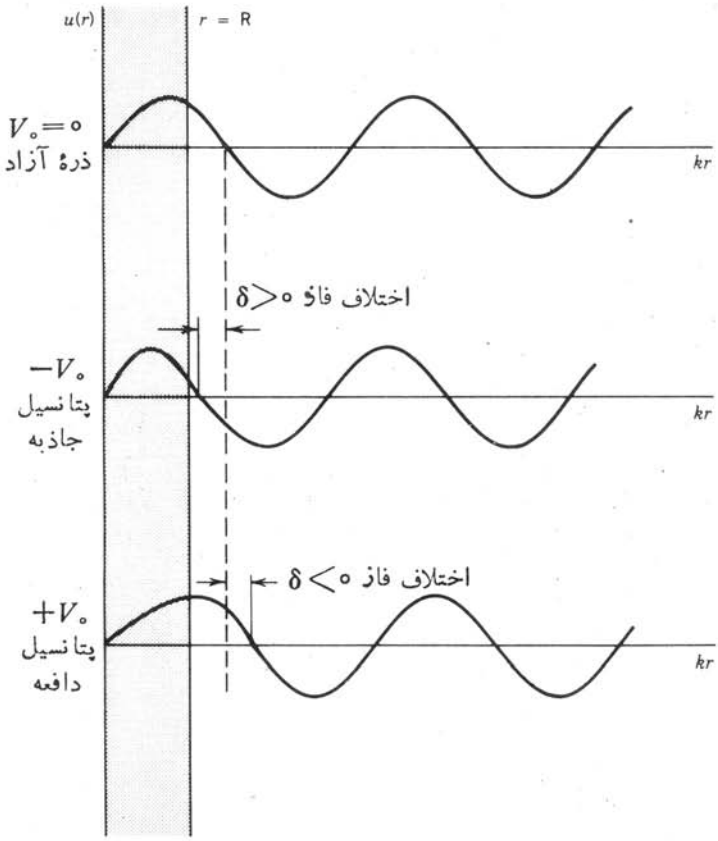
اکنون ببینیم رابطهٔ بین مسئلهٔ چاه مربعی ونظریهٔ کلیتر پراکندگی چیست. تابع‌موج فرودی(چنانکه در نمونهٔ اپتیکی‌دیدیم)، یك موج تخت‌است‌که درراستای z حرکت‌می‌کند

$$\psi_{\text{in}} = Ae^{ikz} \tag{۱۸.۴}$$

هدف را درمبدأ درنظرمی‌گیریم. با توجه به‌عامل وابسته به‌زمان، داریم

$$\psi(z,t) = Ae^{i(kz-\omega t)} \tag{۱۹.۴}$$

که همیشه در جهت $+z$ در حرکت است (موج در نواحی $z<0$ به‌هدف نزدیك، و در نواحی $z>0$ از هدف دور می‌شود). عملیات ریاضی با استفاده از امواج‌کروی e^{ikr}/r و e^{-ikr}/r آسانتر انجام می‌شود و با ضرب آنها در $e^{-i\omega t}$، امواج خروجی به صورت e^{ikr} وامواج ورودی به صورت e^{-ikr} مشخص می‌شوند. [بررسی دقیقترنظریهٔ پراکندگی



شکل ۴.۴ در اثر پتانسیل پراکننده فاز تابع موج پراکنده نسبت به‌تابع‌موج ذرهٔ آزاد تغییر می‌کند و به‌خارج از نواحی پراکندگی کشیده می‌شود.

را همراه با جملات مربوط به $l > 0$، درفصل ۱۱ (جلددوم، ترجمهٔ‌فارسی) خواهیم دید.] برای حالتِ $l = 0$، تابع‌موج فرودی عبارت است از

$$\psi_{\text{in}} = \frac{A}{2ik}\left[\frac{e^{ikr}}{r} - \frac{e^{-ikr}}{r}\right] \qquad (۲۰.۴)$$

علامت منفی بین دوجمله باعث می‌شود که به‌ازای $r \to 0$ تابع ψ متناهی بماند، واستفاده ازضریب A برای هردوجمله نشانگر برابری دامنهٔ‌امواج ورودی‌وخروجی است. دراینجا فرض ما این است که پراکندگی باعث تولید یا نابودی ذرات نمی‌شود، و به همین دلیل دامنه‌های جملات e^{ikr} و e^{-ikr} در اثـر پراکندگی تغییر نمی‌کند (مجذور دامنه، احتمال وجود ذرات ورودی وخروجی رابه‌دست می‌دهد). نتیجهٔ نهایی پراکندگی را فقط به‌صورت یك اختلاف فاز موج خروجی می‌توان نشان داد

$$\psi(r)=\frac{A}{2ik}\left[\frac{e^{i(kr+\beta)}}{r}-\frac{e^{-ikr}}{r}\right] \qquad (۲۱.۴)$$

که در آن β همان اختلاف فاز است.

با استفاده از معادلهٔ (۱۳.۴)، رابطهٔ بین β و δ_0 به‌دست می‌آید

$$\psi(r)=\frac{C}{r}\sin(kr+\delta_0)$$

$$=\frac{C}{r}\,\frac{e^{i(kr+\delta_0)}-e^{-i(kr+\delta_0)}}{2i}$$

$$=\frac{C}{2i}e^{-i\delta_0}\left[\frac{e^{i(kr+2\delta_0)}}{r}-\frac{e^{-ikr}}{r}\right] \qquad (۲۲.۴)$$

که از آن حاصل می‌شود $\beta=2\delta_0$ و $A=kCe^{-i\delta_0}$.

برای تعیین احتمال پراکندگی باید دامنهٔ موج پراکنده را به‌دست آوریم. تابع‌موج ψ تمام امواج موجود در ناحیهٔ $r>R$ را نشان می‌دهد. برای تعیین تابع‌موج پراکنده، ψ_{sc}، به‌طور خالص، لازم است که دامنهٔ موج فرودی را از آن کم کنیم

$$\psi_{sc}=\psi-\psi_{in}$$

$$=\frac{A}{2ik}(e^{2i\delta_0}-1)\frac{e^{ikr}}{r} \qquad (۲۳.۴)$$

جریان ذرات پراکنده از واحد سطح را می‌توان به‌کمك معادلهٔ (۱۲.۲) وتعمیم آن درسه بعد به‌دست آورد

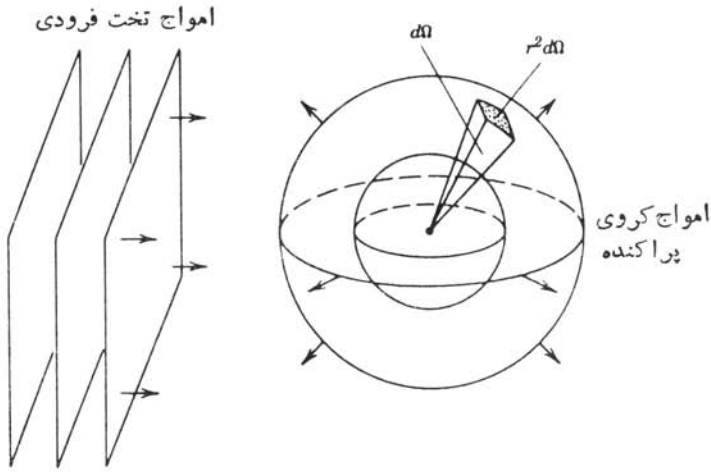
$$j_{sc}=\frac{\hbar}{2mi}\left(\psi^*\frac{\partial\psi}{\partial r}-\frac{\partial\psi^*}{\partial r}\psi\right) \qquad (۲۴.۴)$$

$$=\frac{\hbar|A|^2}{mkr^2}\sin^2\delta_0 \qquad (۲۵.۴)$$

وجریان ذرات فرودی را، با توجه به‌شباهت با معادلهٔ (۲۲.۲)، چنین به‌دست می‌آوریم

$$j_{in}=\frac{\hbar k|A|^2}{m} \qquad (۲۶.۴)$$

جریان پراکنده به‌طور یکنواخت در کره‌ای به شعاع r پخش می‌شود. همچنانکه در شکل ۵.۴ دیده می‌شود، هرجزء سطح $r^2\,d\Omega$ از این کره در برابر یك زاویهٔ حجمی $d\Omega=\sin\theta\,d\theta\,d\varphi$ که رأس آن در مرکز پراکندگی است قرار دارد. سطح مقطع



شکل ۵.۴ نمایش هندسهٔ پراکندگی.

دیفرانسیلی (یا سطح مقطع جزئی) $d\sigma/d\Omega$ را بـه صورت احتمال پراکندگی یك ذرهٔ فرودی در زاویهٔ $d\Omega$ به‌ازای واحد زاویهٔ حجمی تعریف می‌کنیم. احتمال $d\sigma$ مربوط‌به پراکندگی یك ذرهٔ فرودی در زاویهٔ $d\Omega$، از نسبت جریـان پراکنده تحت زاویـهٔ $d\Omega$ به‌جریان فرودی به‌دست می‌آید

$$d\sigma = \frac{(j_{sc})(r^2 d\Omega)}{j_{in}} \qquad (۲۷.۴)$$

با استفاده ازمعادلات (۲۵.۴ و ۲۶) برای جریانهای پراکنده وفرودی، خواهیم داشت

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\sin^2 \delta_0}{k^2} \qquad (۲۸.۴)$$

سطح مقطع کلی σ احتمال کل پراکندگی درتمام راستاهاست

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \qquad (۲۹.۴)$$

در حالت کلی، مقدار $d\sigma/d\Omega$ درسطح کره به‌راستای پراکندگی بستگی دارد. در حالت خاص پراکندگی $l = 0$، مقدار $d\sigma/d\Omega$ ثابت است و از زیر انتگرال خارج می‌شود

$$\sigma = 4\pi \frac{d\sigma}{d\Omega}$$

$$= \frac{4\pi \sin^2 \delta_0}{k^2} \qquad (۳۰.۴)$$

پس، اختلاف فاز $l=0$ مستقیماً با احتمال پراکندگی متناسب است. بدین گونه، با استفاده از مدل سادهٔ چاه مربعی (معادلهٔ ۱۷.۴) می‌توانیم مقدار δ_0 را به دست آوریم و آنگاه، پس از تعیین سطح مقطع کل از معادلهٔ (۳۰.۴)، آن‌را با مقادیر تجربی سطح‌مقطع مقایسه کنیم.

اکنون به تحلیل معادلهٔ (۱۷.۴) بازمی‌گردیم. فرض می‌کنیم که انرژی ذرهٔ فرودی خیلی کم، مثلا $E \lesssim 10\ \mathrm{keV}$، است. در این صورت، با قراردادن $V_0 = 35\ \mathrm{MeV}$ که از تحلیل حالت مقید دوترون به‌دست آمده است و $k_2 = \sqrt{2mE/\hbar^2} \leqslant 0.016\ \mathrm{fm}^{-1}$، خواهیم داشت $k_1 = \sqrt{2m(V_0+E)/\hbar^2} \simeq 0.92\ \mathrm{fm}^{-1}$. اگر طرف راست معادلهٔ (۱۷.۴) را برابر $-\alpha$ بگیریم

$$\alpha = -k_1 \cot k_1 R \qquad (31.4)$$

آنگاه با استفاده از قواعد مثلثاتی داریم

$$\sin^2\delta_0 = \frac{\cos k_2 R + (\alpha/k_2)\sin k_2 R}{1+\alpha^2/k_2^2} \qquad (32.4)$$

و بنابراین

$$\sigma = \frac{4\pi}{k_2^2+\alpha^2}\left(\cos k_2 R + \frac{\alpha}{k_2}\sin k_2 R\right) \qquad (33.4)$$

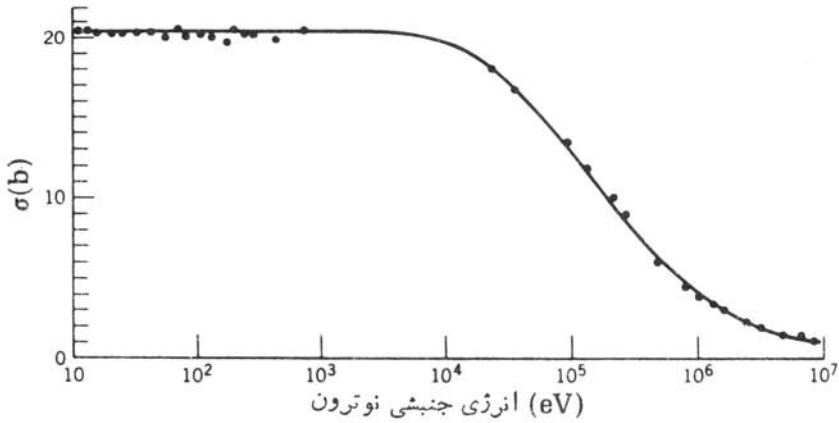
پس از قراردادن $R \simeq 2\ \mathrm{fm}$ که از بررسی حالت مقید $^2\mathrm{H}$ حاصل می‌شود، داریم $\alpha \approx 0.2\ \mathrm{fm}^{-1}$. بدین ترتیب $k_2^2 \ll \alpha^2$ و $k_2 R \ll 1$ است که درنتیجه خواهیم داشت

$$\sigma \simeq \frac{4\pi}{\alpha^2}(1+\alpha R) = 4.6\ \mathrm{b} \qquad (34.4)$$

که در آن یکای بارن معادل $1\ \mathrm{b} = 10^{-28}\ \mathrm{m}^2$ است. این نتیجه نشان می‌دهد که سطح مقطع در انرژیهای کم ثابت است و مقدار آن نزدیک به ۴ تا ۵ b است.

سطح مقطع تجربی پراکندگی نوترونها توسط پروتونها در شکل ۶.۴ نشان داده شده‌است. سطح‌مقطع در انرژیهای پایین واقعاً ثابت است، و طبق پیش‌بینی معادلهٔ (۳۳.۴) در انرژیهای زیاد کاهش می‌یابد، ولی مقدار ثابت سطح مقطع در انرژیهای کم (یعنی مقدار ۲۰.۴ b) با مقدار ۴ تا ۵ b حاصل از محاسبه سازگاری ندارد.

برای پی بردن به منشأ این اختلاف، باید اسپینهای نسبی نوکلئونهای فرودی و پراکنده را مورد بررسی قرار دهیم. از ترکیب اسپینهای نوترون و پروتون (که هر یک برابر ۱/۲ است) اسپین کل $\mathbf{S} = \mathbf{s}_p + \mathbf{s}_n$ به‌دست می‌آید که مقدار آن می‌تواند برابر ۰ یا ۱ باشد. برایند $S=1$ سه سمتگیری متفاوت می‌تواند داشته باشد (که مؤلفه‌های z آن برابر ۱+، ۰، و ۱− می‌شود)، و برایند $S=0$ فقط یک سمتگیری منفرد خواهد



شکل ۴.۶ سطح مقطع پراکندگی نوترون-پروتون درانرژیهای پایین.

داشت. به‌همین دلیل، برایند $S=1$ راحالت سه‌تایه و برایند $S=0$ را حالت تك‌تایه می‌نامند. در این چهار سمتگیری نسبی اسپین، سه سمتگیری مربوط به حالت سه‌تایه و یك سمتگیری مربوط به‌حالت تك‌تایه است. هنگامی که نوکلئون فرودی به‌هدف نزدیك می‌شود، احتمال تحقق حالت سه‌تایه برابر ۳/۴ و حالت تك‌تایه برابر ۱/۴ است. اگرسطح مقطع پراکندگی برای حالتهای سه‌تایه وتك‌تایه باهم فرق داشته باشد، آنگاه داریم

$$\sigma=\frac{3}{4}\sigma_t+\frac{1}{4}\sigma_s \qquad (۳۵.۴)$$

که در آن σ_t و σ_s به‌ترتیب سطح مقطع پراکندگی حالتهای سه‌تایه و تك‌تایه هستند. در برآورد سطح مقطع معادلهٔ (۳۴.۴)، پارامترهای دوترون را به‌کار برده‌ایم که به حالت $S=1$ مربوط می‌شود. بنابراین می‌دانیم $\sigma_t=4.6\ b$ است و با استفاده از مقدار اندازه‌گیری شدهٔ $\sigma=20.4\ b$ درانرژیهای پایین، خواهیم داشت

$$\sigma_s=67.8\ b$$

این‌نتیجه نشان می‌دهد که اختلاف بین سطح مقطعهای حالتهای تك‌تایه وسه‌تایه خیلی زیاد است، و بدین‌سان نیروی هسته‌ای باید وابسته به‌اسپین باشد.

حتی در بررسی دوترون هم باید به این نتیجه می‌رسیدیم که نیروی هسته‌ای وابسته به اسپین است. اگرنیروی نوترون ـ پروتون به جهت نسبی اسپینها بستگی نمی‌داشت، در دوترونها باید با هر دو حالت مقید $S=0$ و $S=1$ با انرژی تقریباً یکسان روبه‌رو می‌شدیم. چون هیچ‌گاه با حالت مقید $S=0$ روبه‌رو نمی‌شویم، پس نیروی هسته‌ای الزاماً وابسته به‌اسپین است.

نتایجی راکه درمورد سطح مقطعهای تك‌تایه و سه‌تایه به‌دست آورده‌ایم، ازراههای

مختلف می‌توانیم به تأیید برسانیم. یکی ازاین روشها، استفاده از پراکندگی نوترونهای کم‌انرژی در رویارویی با مولکولهای هیدروژن است. هیدروژن مولکولی به دو صورت موجود است: اورتوهیدروژن و پارا هیدروژن. در اورتوهیدروژن اسپین هردو پروتون باهم موازی است، در حالی که در پاراهیدروژن اسپینها پاد موازی‌اند. اختلاف بین سطح مقطعهای پراکندگی نوترون با این دو نوع هیدروژن حاکی از وابستگی اسپینی نیروی نوکلئون ـ نوکلئون است.

بحثی که در اینجا دربارهٔ سطح مقطع پراکندگی نوترون ـ پروتون مطرح شد، برای تحلیل پراکندگی نوترونها از مولکولهای H_2 ناکافی است. طول موج دوبروی برای نوترونهای خیلی کم‌انرژی ($E<0.01\,eV$)، بزرگتراز $0.05\,nm$ ودرنتیجه بزرگتر ازفاصلهٔ بین پروتونها درمولکول H_2 است. بنابراصل عدم قطعیت، اندازهٔ بسته‌موجی که یك ذره را توصیف می‌کند نباید از طول موج دوبروی مربوط به‌آن کوچکتر شود. بدین‌گونه، با وجودآنکه برد نیروی هسته‌ای در هر برهم‌کنش نوترون ـ پروتون از مرتبهٔ $1\,fm$ است، بسته‌موج نوترون فرودی به‌طور همزمان با هردو پروتون موجود درمولکول H_2 همپوشی خواهد داشت. پس امواج نوترونی ψ_1 و ψ_2 که ازاین دو پروتون پراکنده می‌شوند به‌طور همدوس با هم ترکیب خواهند شد، یعنی این امواج پراکنده باهم تداخل خواهندداشت وسطح مقطع به $|\psi_1|^2+|\psi_2|^2$ بستگی‌ندارد بلکه به $|\psi_1+\psi_2|^2$ بستگی دارد. بنابراین ما نمی‌توانیم به‌سادگی‌سطح مقطعهای دو پراکندگی جداگانه راباهم جمع کنیم. در انرژیهای بالاترکه طول موج دوبروی درمقایسه با فاصلهٔ بین پروتونها کوچك است، امواج پراکنده با هم تداخل نخواهند داشت و ما می‌توانیم سطح‌مقطعها را مستقیماً با هم جمع کنیم. یکی از دلایل انتخاب انرژی پایین این است که اثرات تداخلی را بررسی کنیم، و دلیل دیگراین است که از انتقال انرژی زیاد به‌مولکول H_2 و به چرخش درآوردن آن ممانعت به‌عمل آوریم. زیرا دراین صورت، تحلیل مسئله پیچیدگی بیشتری پیدا می‌کند. کمینهٔ انرژی دورانی مولکول در حدود $0.015\,eV$ است، و بنابراین نوترونهای با انرژی حدود $0.01\,eV$ نمی‌توانند باعث تحریك دورانی مولکول شوند.

برای تحلیل اثرات تداخلی دراین نوع مسائل، طول پراکندگی a را چنان تعریف می‌کنیم که سطح مقطع درانرژی پایین برابر $4\pi a^2$ شود

$$\lim_{k\to 0}\sigma=4\pi a^2 \qquad (۳۶.۴)$$

ازمقایسهٔ این معادله با معادلهٔ (۳۰.۴) حاصل می‌شود

$$a=\pm\lim_{k\to 0}\frac{\sin\delta_0}{k} \qquad (۳۷.۴)$$

انتخاب علامت دلخواه است، اما معمول این است که علامت منفی را انتخاب می‌کنند.

اگرچه طول پراکندگی ازلحاظ ابعادی ازجنس طول است، ولی پارامتری است که

قدرت پراکندگی را نشان می‌دهد و نه برد آن را. برای درك این مطلب، به‌معادلهٔ (۳۷.۴) توجه می‌کنیم که در آن مقدار δ_0 در انرژیهای کم باید به سمت صفر میل کند تا a متناهی بماند. به‌ازای δ_0 کوچك، تابع‌موج پراکندهٔ (۲۳.۴) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت

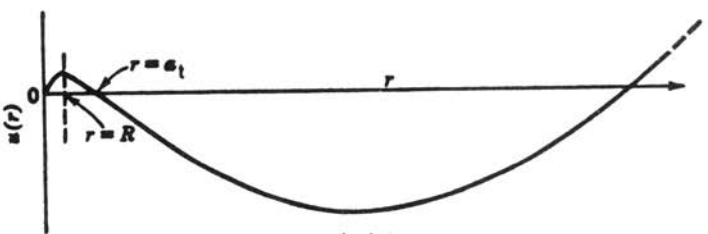
$$\psi_{sc} \simeq A\frac{\delta_0}{k}\frac{e^{ikr}}{r} = -Aa\frac{e^{ikr}}{r} \qquad (۳۸.۴)$$

پس درعمل a دامنهٔ موج پراکنده را تعیین می‌کند.

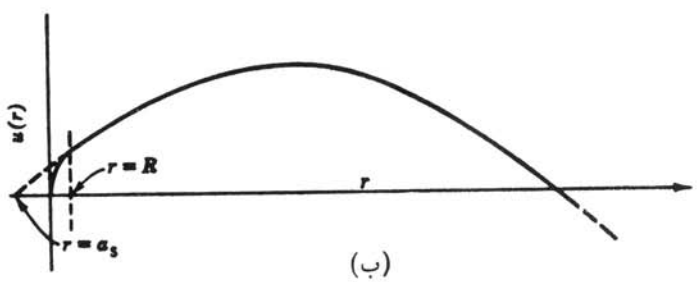
علامت طـول پراکندگی متضمن اطلاعات فیزیکی نیـز هست. تابع‌موج پراکندهٔ $u(r)$ را برای حالتهای سه‌تایه و تك‌تایه درشکل ۷.۴ نشان داده‌ایم. درانرژی کم می‌توان نوشت $a \simeq -\delta_0/k$ و تابع‌موج پراکنده، معادلهٔ (۱۳.۴)، چنین می‌شود

$$u(r) = C\sin k_2(r-a) \qquad (۳۹.۴)$$

مقدار a با توجه به‌نقطه‌ای که در آن $u(r)$ برابر صفرمی‌شود، قابل تعیین است. تابع‌موج حالت سه‌تایه درناحیهٔ $r<R$ درست مانند تابع‌موج حالت مقید دوترون است: تابع $u(r)$ برای تشکیل حالت مقید در ناحیهٔ $r<R$ «برمی‌گردد». در این صورت، مقدار a_t مثبت است. چون حالت تك‌تایه شکل مقید ندارد، تابع $u(r)$ در ناحیهٔ $r<R$ «برنمی‌گردد»



(الف)



(ب)

شکل ۷.۴ (الف) تابع‌موج پراکندگی سه‌تایهٔ np برای نوترونهای آزمایشگاهی با انرژی حدود ۲۰۰ keV و بـه شعاع چاه ۲٫۱ fm. در ایـن مورد، طول پراکندگـی مثبت است. (ب) تابع‌موج با طول پراکندگی منفی. این تابع‌موج بـا مورد مربوط به پراکندگی تك‌تایهٔ np انطباق دارد.

بلکه بـا شیب مثبت به مرز $r=R$ می‌رسد. هنگامی کـه تابع‌موج را در $r=R$ به‌طور هموار برون‌یابی می‌کنیم و به $u(r)=0$ امتداد می‌دهیم، طول پراکندگی تک‌تایهٔ a_s را منفی به‌دست می‌آوریم.

براورد $\sigma_t=4.6\ b$ باتوجه به‌خواص دوترون به‌مقدار $a_t=+6.1\ fm$ منتهی می‌شود، و براورد $\sigma_s=67.8\ b$ که باتوجه به‌سطح مقطع کل تجربی به‌دست آمده است طول پراکندگی تک‌تایه را برابر $a_s=-23.2\ fm$ به‌دست می‌دهد.

بنابرنظریهٔ پراکندگی نوترون از پاراهیدروژن و اورتوهیدروژن، داریم

$$\sigma_{pa}=5.7(3a_t+a_s)^2 \qquad (40.4)$$

$$\sigma_{or}=\sigma_{pa}+12.9(a_t-a_s)^2 \qquad (41.4)$$

که ضرایب عددی درآنها به‌سرعت نوترون فرودی بستگی دارد. معادلات (۴۰.۴ و ۴۱) برای نوترونهای باسرعت $770\ m/s$، که حتی ازنوترونهای «گرمایی» ($2200\ m/s$) هم کندترند، نوشته شده‌اند. سطح مقطعهای اندازه‌گیری شده برای چنین نوترونهایی، پس ازتصحیح فرایند جذب، عبارت‌اند از

$$\sigma_{pa}=(3.2\pm0.2)\ b \quad و \quad \sigma_{or}=(108\pm1)\ b$$

اگرنیروی هسته‌ای مستقل ازاسپین بود، $\sigma_t=\sigma_s$ و $a_t=a_s$ می‌شد و درنتیجه σ_{pa} و σ_{or} باید یکسان به‌دست می‌آمد. اختلاف بزرگ بین مقادیراندازه‌گیری شده نشان می‌دهدکه $a_t\neq a_s$ است، و اینکه علامتهای a_t و a_s هم باید مخالف باشند تـا با توجه بـه رابطهٔ $-3a_t\simeq a_s$ مقدار σ_{pa} کوچك شود. ازحل معادلات (۴۰.۴ و ۴۱) خواهیم داشت

$$a_s=(-23.55\pm0.12)\ fm$$

$$a_t=(+5.35\pm0.06)\ fm$$

که با مقادیرحاصل از σ_t و σ_s که قبلا به‌دست آوردیم سازگار است.[1]

آزمایشهای دیگری هم هستندکه تمایزبین طول پراکندگی تک‌تایه وسه‌تایه رانشان می‌دهند. از جملهٔ این آزمایشها، می‌توان پراش نوترونها در بلورهای محتوی هیدروژن (مانند هیدریدها)، و همچنین **بازتاب کلی باریکه‌های نوترونی راکه** بـا زوایای کوچك به‌مواد آکنده از هیدروژن (مانند هیدروکربنها) تابیده می‌شوند نام برد. نتایج حاصل از این روشها بخوبی با مقادیر a_s و a_t مذکور دربالا سازگار است.

نظریه‌ای کـه در اینجـا بیان کرده‌ایم، فقط برای پراکندگی $l=0$ ذرات فرودی

---

۱. برای مطالعهٔ شرح این آزمایشها می‌توانید رجوع کنید به
G. L. Squires and A. T. Stewart, *Proc. Roy. Soc.* (London) A230, 19 (1955).

کم‌انرژی اعتبار دارد. شرط $l=0$ مستلزم ذرات فرودی با انرژی کمتر از ۲۰ MeV است، درحالی‌که منظور از انرژی کم در تقریبهای دیگر انرژیهایی درحدود eV یا keV است. با افزایش انرژی ذرهٔ فرودی، خیلی پیشتر از آنکه به‌انرژی ۲۰ MeV برسیم، معادلهٔ (۳۶.۴) را نقض خواهیم کرد. دراین‌صورت همچنان با پراکندگی $l=0$ سروکار داریم، اما در این انرژیها (که از مرتبهٔ ۱ MeV است) معادلاتی مانند (۳۸.۴) دیگر معتبر نیستند. چنین مواردی را عموماً در تقریب برد مؤثر بررسی می‌کنیم که در آن داریم

$$k\cot\delta_0=\frac{1}{a}+\frac{1}{2}r_0k^2+\cdots \qquad (۴۲.۴)$$

دراینجا از توانهای بالاتر k صرفنظر می‌شود. کمیت a همان‌طول پراکندگی انرژی صفر است که قبلا از آن سخن گفتیم [در واقع، درحد $k\to 0$ این معادله به صورت معادلهٔ (۳۷.۴) درمی‌آید]، وکمیت r_0 پارامتر جدیدی است که برد مؤثر نامیده می‌شود. یکی از مزایای این طرز نمایش آن است که پارامترهای a و r_0 پتانسیل هسته‌ای را مستقل از شکل آن به‌دست می‌آوریم. یعنی، تمام محاسبات انجام‌شده در این بخش را می‌توانیم برای پتانسیلی غیراز چاه مربعی نیز تکرار کنیم، که در این صورت با توجه به سطح مقطعهای تجربی برای a و r_0 مقادیری مشابه به‌دست خواهیم آورد. البته وجه ناخوشایند این‌روش آن است که از تحلیلی که محاسبات با پتانسیلهای مختلف در آن به‌نتایج یکسانی منجر شود، هیچ اطلاعی ازشکل پتانسیل هسته‌ای به‌دست نمی‌آید!

دراینجا هم مثل مورد طول پراکندگی، برد مؤثر درحالتهای تک‌تایه وسه‌تایه با هم تفاوت دارد. با توجه به‌انواع آزمایشهای پراکندگی، بهترین مجموعهٔ پارامترهای $l=0$ را در برهم‌کنش نوترون ـ پروتون به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم

$$a_s=-۲۳٫۷۱۵\pm ۰٫۰۱۵\ \mathrm{fm} \qquad a_t=۵٫۴۲۳\pm ۰٫۰۰۵\ \mathrm{fm}$$

$$r_{0s}=۲٫۷۳\pm ۰٫۰۳\ \mathrm{fm} \qquad r_{0t}=۱٫۷۴۸\pm ۰٫۰۰۶\ \mathrm{fm}$$

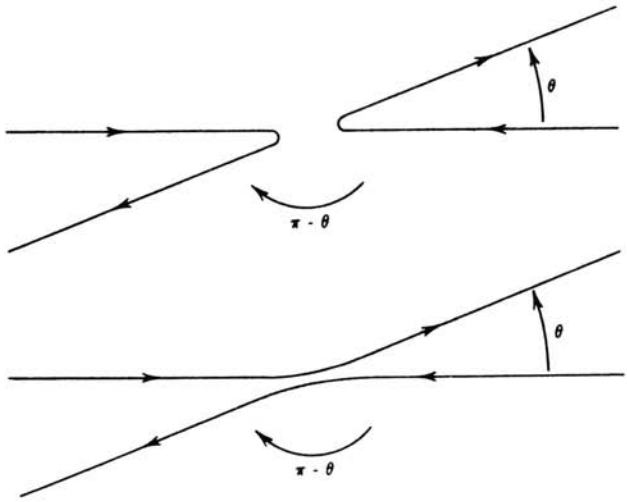
به‌عنوان آخرین نکته در برهم‌کنش نوترون ـ پروتون درحالتهای تک‌تایه و سه‌تایه، سعی می‌کنیم که انرژی حالت تک‌تایهٔ n-p را براورد وآن را باانرژی حالت مقید سه‌تایه (۲٫۲۲ MeV ـ) مقایسه کنیم. با استفاده از معادلات (۳۴.۴)، (۳۱.۴)، و (۵.۴)، انرژی حالت تک‌تایه را درحدود ۷۷ keV + به‌دست می‌آوریم. بدین‌گونه‌می‌توان گفت که حالت تک‌تایه فقط تاحدودی نامقید است.

۳.۴ برهم‌کنشهای پروتون ـ پروتون و نوترون ـ نوترون

بین پراکندگی نوکلئونهای یکسان (پراکندگی پروتون ـ پروتون و نوترون ـ نوترون) و پراکندگی نوکلئونهای نایکسان (پراکندگی نوترون ـ پروتون) یك اختلاف بسیار مهم

وجود دارد. این اختلاف از آنجا ناشی می‌شود که، چنانکه در بخش ۷.۲ دیدیم، نوکلئونهای یکسان هدف و پرتابه را باید بایك تابع‌موج مشترك توصیف کرد. چون نوکلئونها اسپین ۱/۲ دارند، تابع‌موج آنها باید نسبت به‌تعویض نوکلئونها پادمتقارن باشد. اگر دراینجا هم فقط پراکندگی نوکلئونها در انرژیهای پایین را درنظر بگیریم، $l = 0$ می‌شود و درنتیجه تعویض مختصات فضایی دو ذره به‌تغییر علامت منتهی نمی‌شود. (این وضعیت تاحدودی به عملیات پاریته که در بخش ۶.۲ شرح داده شد شباهت دارد.) پس تابع‌موج که نسبت به‌تعویض مختصات فضایی متقارن است، باید نسبت به تعویض مختصات اسپینی پادمتقارن باشد تا تابع‌موج کل (حاصلضرب فضایی و اسپینی) پادمتقارن بماند. تابع‌موج اسپینی پادمتقارن به‌صورت معادلهٔ (۷۶.۲) است و باید با اسپین کل صفر متناظر شود، یعنی سمتگیری اسپینها باید متفاوت باشد. بنابراین فقط حالتهای اسپینی تك‌تایه می‌توانند در پراکندگی شرکت کنند. (درانرژیهای بالاتر، حالتهای فضایی پادمتقارن $l = 1$ که فقط درحالتهای اسپینی سه‌گانهٔ متقارن دیده می‌شوند نیز قابل قبول‌اند.)

سطح مقطع دیفرانسیلی برپایهٔ ویژگی دیگری از فیزیك کوانتومی تعیین می‌شود. شکل ۸.۴ راکه نمایشگر پراکندگی دو ذرهٔ یکسان در چارچوب مرجع مرکز جرم است درنظر می‌گیریم. چون ذره‌ها یکسان هستند، هیچ راه تجربی برای تشخیص تمایز بین دو حالتی که درشکل نشان داده‌ایم وجودندارد. بنابراین تابع‌موج پراکنده باید پراکندگیهای تحت هردو زاویهٔ θ و $\pi - \theta$ را شامل‌شود. هنگامی که برای تعیین سطح مقطع، تابع‌موج



شکل ۸.۴ پراکندگی ذرات یکسان در دستگاه مرکز جرم. یك ذره تحت زاویهٔ θ و دیگری تحت زاویهٔ $\pi - \theta$ خارج می‌شود. چون ذرات یکسان هستند، هیچ راه تجربی برای تشخیص اینکه کدام ذره از کدام زاویه خارج می‌شود وجود ندارد، و بنابراین تمایز بین دو حالتی که نموده شده است امکان‌پذیر نیست.

پراکنده را مجذور می‌کنیم، با یك جملهٔ متناسب با تداخل روبه‌رو می‌شویم که از اجزای تابع‌موج پراکنده‌شده در زوایای θ و $\pi-\theta$ حاصل می‌شود. این تداخل صرفاً یك اثر کوانتومی است وهیچ مشابه کلاسیکی ندارد.

نخست پراکندگی بین دو پروتون را درنظر می‌گیریم: چون تابع‌موج باید هردو نوع پراکندگی هسته‌ای وکولنی را توصیف کند، یك جملهٔ تداخلی هسته‌ای ـ کولنی اضافی هم درسطح مقطع وجود خواهدداشت. تابع‌موج پراکنده باید شامل‌جمله‌ای ازپراکندگی کولنی وجملهٔ دیگری از پراکندگی هسته‌ای باشد. جملهٔ کولنی باید درحد $e \to 0$ ناپدید شود، وجملهٔ هسته‌ای هم باید وقتی پتانسیل هسته‌ای به‌سوی صفرمیل می‌کند ناپدید شود که دراین صورت داریم $\delta_0 \to 0$. هنگامی که برای تعیین سطح مقطع تابع‌موج را مجذور می‌کنیم، جمله‌ای به‌دست می‌آید که هر دو پراکندگی هسته‌ای وکولنی را شامل می‌شود.[1] سطح مقطع دیفرانسیلی عبارت است از

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}=\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2\frac{1}{4T^2}\left\{\frac{1}{\sin^4(\theta/2)}+\frac{1}{\cos^4(\theta/2)}-\frac{\cos[\eta\ln\tan^2(\theta/2)]}{\sin^2(\theta/2)\cos^2(\theta/2)}\right.$$
$$-\frac{2}{\eta}(\sin\delta_0)\left(\frac{\cos[\delta_0+\eta\ln\sin^2(\theta/2)]}{\sin^2(\theta/2)}+\frac{\cos[\delta_0+\eta\ln\cos^2(\theta/2)]}{\cos^2(\theta/2)}\right)$$
$$\left.+\frac{4}{\eta^2}\sin^2\delta_0\right\} \qquad (۴۳.۴)$$

دراینجا T انرژی‌جنبشی ذرهٔ فرودی درآزمایشگاه (که درآن پروتون هدف درحال سکون درنظر گرفته می‌شود)، θ زاویهٔ پراکندگی در دستگاه مرکزجرم، δ_0 اختلاف فاز $l=0$ برای پراکندگی هسته‌ای خالص‌است، و به‌علاوه داریم $\eta=(e^2/4\pi\varepsilon_0\hbar c)\beta^{-1}=\alpha/\beta$ که درآن α ثابت ساختار ریز (با مقداری نزدیك به ۱/۱۳۷) و $\beta=v/c$ سرعت نسبی (بدون‌بعد) پروتونهاست. جملات‌شش‌گانهٔ‌درون‌آکولاد دراین‌معادله به‌آسانی‌قابل‌شناسایی هستند: (۱) جملهٔ $\sin^{-4}(\theta/2)$ مشخصهٔ‌پراکندگی کولنی‌است‌که پراکندگی رادرفورد هم نامیده می‌شود. ما درفصل ۱۱ (جلددوم، ترجمهٔ فارسی) دربارهٔ این نوع پراکندگی بحث بیشتری خواهیم داشت. (۲) چون دوپروتون مشابه یکدیگرند، تشخیص اینکه (در دستگاه مرکز جرم) پروتون‌فرودی با زاویهٔ θ وپروتون هدف با زاویهٔ $\pi-\theta$ پراکنده می‌شود یا برعکس، امکان‌پذیر نیست. بنابراین سطح مقطع پراکندگی باید شامل یك جملهٔ مشخصهٔ کولنی (یا رادرفوردی) $\sin^{-4}(\pi-\theta)/2=\cos^{-4}(\theta/2)$ هم باشد. (۳) این جمله نشانگر تداخل بین پراکندگیهای کولنی تحت زوایای θ و $\pi-\theta$ است. (۴ و ۵) این

---

۱. برای محاسبهٔ سطح مقطع باید پا را ازحد این‌کتاب فراترگذاشت. برای بحث دراین باره وکارهای اولیهٔ پراکندگی پروتون ـ پروتون رجوع کنید به

J. D. Jackson and J. M. Blatt, *Rev. Mod. Phys.*, 22, 77(1950).

دوجمله از تداخل بین پراکندگیهای کولنی و هسته‌ای حاصل می‌شوند. (۶) آخرین جمله به پراکندگی هسته‌ای خالص مربوط است. در حد $e \to 0$ (پراکندگی هسته‌ای خالص)، فقط همین جمله است که برجای می‌ماند و معادلهٔ (۴۳.۴) چنانکه باید به صورت معادلهٔ (۲۸.۴) درمی‌آید.

برهم‌کنش پروتون - پروتون اگرچه در عمل ممکن است پیچیده باشد، ولی درك مفهوم و روش بررسی آن ساده است: چون δ_0 تنها مجهول معادلهٔ (۴۳.۴) است، سطح مقطع دیفرانسیلی پراکندگی را می‌توانیم به صورت تابعی از زاویه (برای هر مورد از انرژی جنبشی ذرات فرودی) اندازه‌گیری کنیم، وآنگاه بااستفاده از بهترین برازش نتایج با معادلهٔ (۴۳.۴) مقدار δ_0 را به‌دست آوریم. نمونه‌ای از نتایج این نوع اندازه‌گیری را در شکل ۹.۴ نشان داده‌ایم که با توجه به آن درانرژی $T = ۳٫۰۳۷\ \mathrm{MeV}$ اختلاف فاز برابر $\delta_0 = ۵۰٫۹۶۶^\circ$ می‌شود. با استفاده از تعداد زیادی آزمایش به همین صورت می‌توان بستگی δ_0 را به‌انرژی، مطابق شکل ۱۰.۴، به‌دست آورد.

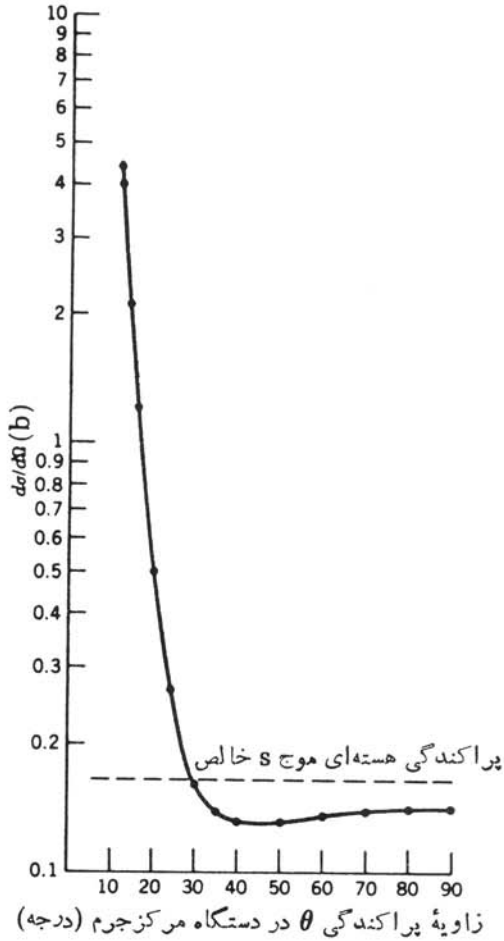
گام بعدی در تعبیر این اطلاعات این است که همچنانکه درمورد معادلهٔ (۴۲.۴) دیدیم، پراکندگی را با استفاده از کمیتهایی مستقل از انرژی نظیرطول پراکندگی و برد مؤثر نشان دهیم. متأسفانه این کار را به‌آسانی نمی‌توان انجام داد، زیرا برد برهم‌کنش کولنی بینهایت است وحتی درحد $k \to 0$ نمی‌توانیم از جملات مرتبهٔ بالاتر درمعادلهٔ (۴۲.۴) صرفنظر کنیم. اما با قبول بعضی اصلاحات، می‌توانیم به صورتی مشابه معادلهٔ (۴۲.۴) عبارتی حاوی اثرات پراکندگی کولنی و هسته‌ای به‌دست آوریم، ومقادیرطول پراکندگی پروتون - پروتون و برد مؤثررا تعیین کنیم

$$a = -۷٫۸۲ \pm ۰٫۰۱\ \mathrm{fm}$$

$$r_0 = ۲٫۷۹ \pm ۰٫۰۲\ \mathrm{fm}$$

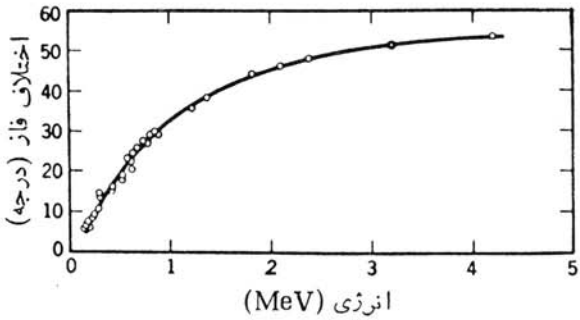
این مقدار برد مؤثرکاملا با مقادیر مربوط به تك‌تایهٔ np که در بخش قبلی به‌دست آمد، سازگار است. طول پراکندگی که قدرت برهم‌کنش را نشان می‌دهد، هردو اثر کولنی و هسته‌ای را شامل می‌شود و بنابراین مستقیماً با مقدار مربوط به برهم‌کنش np قابل مقایسه نیست. (اما، به‌این نکتهٔ مهم باید توجه داشت که a منفی است، و این بدان معنی است که مجموعهٔ pp هیچ حالت مقیدی ندارد، و درنتیجه هستهٔ $^2\mathrm{He}$ در طبیعت موجود نیست.) مقایسهٔ بین طولهای پراکندگی pp و np را دربخش بعدی دنبال خواهیم‌کرد.

پراکندگی نوترون - نوترون را باید فارغ از اثرات برهم‌کنش کولنی، که باعث پیچیدگی تحلیل پراکندگی پروتون - پروتون می‌شود، مطالعه‌کرد. مشکلی که دراین مورد وجود دارد، مشکل آزمایش است. هرچندکه باریکهٔ نوترون را به‌آسانی می‌توان تهیه‌کرد، ولی هدفهایی که نوترون آزاد داشته باشند در اختیار نداریم. بنابراین، اندازه‌گیری پارامترهای پراکندگی نوترون - نوترون نیازمند استفاده از نوعی واکنش هسته‌ای است که درطی آن دونوترون تولید شوند واین دو در محدودهٔ نیروی هسته‌ای نسبت به‌یکدیگر در



شکل ۹.۴ سطح مقطع پراکندگی پروتون- پروتون درانرژی‌کم و درحالتی‌که انرژی پروتون فرودی برابر ۳٫۰۳۷ MeV است. از برازش این اطلاعات با معادلهٔ (۴۳.۴)، اختلاف فاز موج s برابر $\delta_0 = 50.966°$ به‌دست می‌آید. سطح مقطع پراکندگی هسته‌ای خالص برابر ۰٫۱۶۵ b است. وجود سطح مقطعهایی که از مقادیرمربوط به پراکندگی هسته‌ای خالص کوچکترند، حاکی از تداخل قسمتهای کولنی وهسته‌ای تابع‌موج است.

حرکت باشند. وقتی این دونوترون ازیکدیگرفاصله می‌گیرند، مثل این است‌که باآزمایش پراکندگی سروکار داریم. متأسفانه، در این‌گونه واکنشها یك ذرهٔ سوم هم حتماً تولید می‌شودکه با هردو نوترون (هم به‌طور جداگانه و هم به‌طور جمعی) برهم‌کنش خواهد داشت. امابرای به‌دست‌آوردن مقادیرمربوط به‌برد مؤثروطول پراکندگی نوترون-نوترون، تصحیحات لازم را با دقت کافی می‌توان محاسبه‌کرد. در آزمایشهایی‌که تاکنون در این مورد گزارش شده‌اند، از واکنشهای تجزیهٔ دوترون، در پی گیراندازی مزون منفی π



شکل ۱۰.۴ اختلاف فازموج s درپراکندگی pp. این منحنی بااستفاده ازنتایج تعداد زیادی آزمایش رسم شده است.

($\pi^- + {}^2H \to 2n + \gamma$) و در پی پراکندگی نوترون ($n + {}^2H \to 2n + p$)، استفاده شده است. ایـن امکان هم وجود داردکه پارامترهای nn را از مقایسهٔ واکنشهای آینه‌ای ${}^3He + {}^2H \to {}^3H + 2p$ و ${}^3H + {}^2H \to {}^3He + 2n$ و بـا استفاده از پارامترهای معلوم pp، به‌عنوان وسیله‌ای برای محاسبهٔ اثرات حالت نهایی ذرات سه‌گانه، تعیین کنیم. از تحلیل این آزمایشها (وآزمایشهای دیگر)، پارامترهای نوترون ـ نوترون به صورت زیر به‌دست می‌آید

$$a = -16.6 \pm 0.5 \text{ fm}$$

$$r_0 = 2.66 \pm 0.15 \text{ fm}$$

همچنانکه در برهم‌کنش پروتون ـ پروتون دیدیم، طول پراکندگی منفی نشان می‌دهد که ازاجتماع دونوترون یك حالت مقید پایدار حاصل نمی‌شود. دلیل دافعهٔ کولنی برای توضیح عدم وجود دی ـ پروتون، اگرچه وسوسه‌انگیز است، دلیل درستی نمی‌تواند باشد. درمورد دی ـ نوترون چنین وسوسه‌ای نداریم، و عدم وجود آن را باید ناشی از وابستگی اسپینی واکنش هسته‌ای تلقی کنیم. خلاصهٔ قرائن به این صورت است که گفتیم: حالت پایهٔ دوترون یك سه‌تایهٔ اسپینی است، وهیچ حالت مقیدی با اسپین تك‌تایه وجود ندارد. سپس استدلال کردیم که چـون فرمیونهای یکسان باید تابع موجهای کلی پادمتقارن داشته باشند و چـون انتظار براین است کـه پایینترین حالت یك حـالت متقارن فضایی $l = 0$ باشد، سیستمهای دی ـ پروتون و دی ـ نوترون باید حالتهای اسپینی پادمتقارن (یا تك‌تایه) داشته باشندکه حالتهایی نامقیدند.

۴.۴ خواص نیروی هسته‌ای

بر پایهٔ خواص هسته‌ها در انرژیهای پایین کـه در بخشهای پیشین مورد بحث قرارگرفت،

بسیاری از خصوصیات نیروی هسته‌ای قابل بررسی است. هنگامی‌که نتایج آزمایشهای انجام‌شده درانرژیهای بالاتر را هم‌بدانها بیفزاییم، جزئیات بیشتری از نیروی‌هسته‌ای برای ما روشن می‌شود. در این بخش، ویژگیهای اصلی نیروی بین نوکلئونها را به‌طور خلاصه شرح می‌دهیم، و در بخش بعدی نمایش خاصی ازاین نیرو را که متضمن بسیاری ازاین خصوصیات است مورد بحث قرار می‌دهیم.

برهم‌کنش بین دو نوکلئون از پایینترین مرتبهٔ پتانسیل مرکزی جاذبه‌ای حاصل می‌شود

در این فصل این پتانسیل را به‌صورت چاه مربعی در نظرگرفته‌ایم، که این فرض باعث سادگی محاسبات می‌شود و اطلاعات تجربی را بخوبی بازتولید می‌کند. به همین ترتیب می‌توانستیم دیگرصورتهای واقع‌بینانه‌تر پتانسیل را درنظربگیریم، ولی درنتیجه‌گیریهای اصلی تغییری حاصل نمی‌شد (در حقیقت، تقریب بردمؤثرعملا از شکلی‌که برای پتانسیل درنظرمی‌گیریم مستقل است). ویژگی مشترك همهٔ این پتانسیلها در بستگی انحصاری آنها به فاصلهٔ بین نوکلئونی r است. به همین دلیل این عبارت مرکزی را به صورت $V_c(r)$ نشان داده‌ایم. برنامهٔ آزمایشی بررسی $V_c(r)$ به‌این‌ترتیب خواهد بودکه وابستگی انرژی پارامترهایی نظیر اختلاف فازهای پراکندگی را اندازه‌گیری کنیم، وآنگاه سعی‌کنیم که شکل $V_c(r)$ را چنان انتخاب‌کنیم‌که به‌بهترین وجهی پارامترهای یادشده را بازتولیدکند.

برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون قویاً وابسته به اسپین است

این نتیجه‌گیری از عدم موفقیت در مشاهدهٔ حالت مقید تك‌تایهٔ دوترون و همچنین از اندازه‌گیری اختلاف سطح مقطعهای حالتهای تك و سه‌تایه حاصل شده است. شکل جملهٔ اضافی‌ای‌که با درنظرگرفتن این اثر باید به‌پتانسیل افزود چیست؟ روشن‌است‌که این‌جمله باید به اسپین $\mathbf{s}_1$ و $\mathbf{s}_2$ نوکلئونها بستگی داشته باشد، ولی همهٔ ترکیبهای $\mathbf{s}_1$ و $\mathbf{s}_2$ مجاز نیستند. نیروی هسته‌ای باید متضمن بعضی ازتقارنها باشد، که این امرمنجر به محدودیت شکل پتانسیل می‌شود. انعکاس پاریته ($\mathbf{r} \to -\mathbf{r}$) و برگشت زمان ($t \to -t$) رامی‌توان به‌عنوان نمونه‌هایی ازاین تقارنها نام برد. آزمایش نشان می‌دهدکه پتانسیل بین‌نوکلئونی نسبت به این عملیات تاحد زیادی (برای پاریته بادقت یك در 10^7 و برای برگشت زمان یك در 10^3 قسمت) ناورداست. در اثر عملگر پاریته، که متضمن انعکاس فضایی است، بردار تکانهٔ زاویه‌ای بدون تغییرمی‌ماند. این‌گفته ممکن‌است‌که تاحدی عجیب به‌نظر بیاید، زیرا طبیعی است‌که با معکوس شدن دستگاه مختصات تمام بردارهای تعریف‌شده در آن دستگاه نیز وارونه می‌شوند. اما تکانهٔ زاویه‌ای ازجنس بردارحقیقی یا بردارقطبی نیست، بلکه ازجنس شبه‌بردار یا بردارمحوری است‌که دراثرتبدیل $\mathbf{r} \to -\mathbf{r}$ معکوس نمی‌شود. این نکته را مستقیماً ازتعریف $\mathbf{r} \times \mathbf{p}$ یا از نمودار جسم چرخان می‌توان استنباط‌کرد. در اثرعملگر برگشت زمان، تمام حرکتها (ازجمله تکانهٔ خطی و زاویه‌ای) معکوس می‌شوند.

ازاین‌رو جملاتی مانند $\mathbf{s}_1$ و $\mathbf{s}_2$ یا ترکیبی از آنها $A\mathbf{s}_1+B\mathbf{s}_2$ در تابع پتانسیل، باعث نقض ناوردایی برگشت زمان خواهند شد و آنها را نمی‌توان بخشی از پتانسیل هسته‌ای به‌شمار آورد. جملاتی مانند $\mathbf{s}_1^2\cdot\mathbf{s}_2^2$، یا $\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2$ که نسبت به برگشت زمان ناوردا هستند، مجازخواهند بود. (تمام این جملات نسبت به‌پاریته هم ناوردا هستند.) ساده‌ترین جمله‌ای که اسپین هردو نوکلئون را شامل شود به صورت $\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2$ است. اکنون مقدار $\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2$ را برای حالتهای تک‌تایه و سه‌تایه تعیین می‌کنیم. برای این منظور اسپین کل $\mathbf{S}=\mathbf{s}_1+\mathbf{s}_2$ را به‌دست می‌آوریم

$$\begin{aligned}\mathbf{S}^2&=\mathbf{S}\cdot\mathbf{S}=(\mathbf{s}_1+\mathbf{s}_2)\cdot(\mathbf{s}_1+\mathbf{s}_2)\\&=\mathbf{s}_1^2+\mathbf{s}_2^2+2\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2\end{aligned}$$

پس داریم

$$\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2=\frac{1}{2}(\mathbf{S}^2-\mathbf{s}_1^2-\mathbf{s}_2^2) \qquad (۴۴.۴)$$

برای تعیین مقدار این عبارت، باید یادآور شد که درمکانیک کوانتومی مربع تکانهٔ زاویه‌ای به‌صورت $\mathbf{s}=\hbar^2 s(s+1)$ محاسبه می‌شود [به‌بخش ۵.۲ ومعادلهٔ (۶۹.۲) رجوع شود]. بنابراین خواهیم داشت

$$\langle\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2\rangle=\frac{1}{2}[S(S+1)-s_1(s_1+1)-s_2(s_2+1)]\hbar^2 \qquad (۴۵.۴)$$

باتوجه به‌اینکه $s_1=s_2=1/2$ است، مقدار $\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2$ درحالت سه‌تایه $(S=1)$ عبارت است از

$$\langle\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2\rangle=\frac{1}{2}\left[1(1+1)-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+1\right)-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+1\right)\right]\hbar^2=\frac{1}{4}\hbar^2 \qquad (۴۶.۴)$$

ومقدار آن درحالت تک‌تایه $(S=0)$ عبارت است از

$$\langle\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2\rangle=\frac{1}{2}\left[0(0+1)-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+1\right)-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}+1\right)\right]\hbar^2=-\frac{3}{4}\hbar^2 \qquad (۴۷.۴)$$

بنابراین درتابع پتانسیل عبارتی به‌صورت $\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2V_s(r)$ را می‌توان در نظر گرفت که با وجودآن سطح مقطعهای مختلف حالتهای تک‌تایه وسه‌تایه قابل محاسبه خواهد شد. بزرگی V_s را می‌توان چنان تنظیم کرد که اختلاف سطح مقطعهای تک‌تایه و سه‌تایه را به درستی پیش بینی کند، و وابستگی شعاعی آن همچنان قابل تنظیم است که انرژی حالتها نیز به‌طور مناسبی درنظر گرفته شود.

پتانسیل دربرگیرندهٔ V_c و V_s را به‌صورت زیرنیز می‌توانیم بنویسیم

$$V(r)=-\left(\frac{\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2}{\hbar^2}-\frac{1}{4}\right)V_1(r)+\left(\frac{\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2}{\hbar^2}+\frac{3}{4}\right)V_3(r) \qquad (۴۸.۴)$$

که در آن $V_1(r)$ و $V_3(r)$ پتانسیلهایی هستند که به‌طور جداگانه رفتار تك‌تایه و سه‌تایه را توضیح می‌دهند.

پتانسیل بین نوکلئونی شامل یك جملهٔ غیرمرکزی، به‌نام پتانسیل تانسوری، است

عمده‌ترین دلیل وجود نیروی تانسوری ازمشاهدهٔ گشتاور چارقطبی درحالت پایهٔ دوترون حاصل می‌شود. تابع‌موج حالت s ($l=0$) تقارن کروی دارد، یعنی گشتاور چارقطبی الکتریکی آن صفراست. تابع‌موجهای باحالتهای مختلط l را باید از پتانسیلهای غیرمرکزی به وجود آورد. این نیروی تانسوری باید، به‌جای $V(r)$، به‌صورت $V(\mathbf{r})$ باشد. برای نوکلئون منفرد، بدیهی است کـه انتخاب یك جهت مشخص در فضا اختیاری است یعنی شمال و جنوب یا شرق وغرب برای آن تفاوتی ندارد. تنها جهت مرجع برای نوکلئون جهت اسپین آن است، وازاین‌رو تنها جمله‌ای که می‌توان درنظرگرفت به‌صورت $\mathbf{s}\cdot\mathbf{r}$ یا $\mathbf{s}\times\mathbf{r}$ است که بردار مکان $\mathbf{r}$ را با جهت $\mathbf{s}$ ارتباط می‌دهد. برای آنکه شرط ناوردایی پاریته تأمین شود، باید باتعداد زوجی ازعوامل $\mathbf{r}$ سروکار داشته‌باشیم، وبنابراین پتانسیل بین دو نوکلئون می‌باید به جملاتی مانند $(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{r})(\mathbf{s}_2\cdot\mathbf{r})$ یا $(\mathbf{s}_1\times\mathbf{r})\cdot(\mathbf{s}_2\times\mathbf{r})$ بستگی داشته‌باشد. بااستفاده ازاتحادهای برداری می‌توان نشان دادکه صورت دوم‌همان صورت اول بعلاوهٔ جملهٔ $\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2$ است کـه قبلا در پتانسیل $V(r)$ گنجانده شده است. بنابـراین بدون آنکه‌کلیت مسئله را ازدست بدهیم، می‌توانیم بخش تانسوری پتانسیل بین نوکلئونی را به‌صورت $V_T(r)S_{12}$ درنظر بگیریم که درآن $V_T(r)$ بستگی شعاعی نیرو و بزرگی آن را تأمین می‌کند، و داریم

$$S_{12}=\frac{3(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{r})(\mathbf{s}_2\cdot\mathbf{r})}{r^2}-\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{s}_2 \qquad (۴۹.۴)$$

کـه این عبارت متضمن ویژگی تانسوری نیروست و متوسط آن درتمام زوایا برابر صفر می‌شود.

نیروی نوکلئون ـ نوکلئون نسبت به‌بار نوکلئون تقارن دارد

این بدان معنی است که پس ازتصحیح نیروی‌کولنی درسیستم پروتون ـ پروتون، فرقی بین برهم‌کنش پروتون ـ پروتون و برهم‌کنش نوترون ـ نوترون نیست. دراینجامقصود از «بار» خصوصیت یا جنس نوکلئون (پروتون یا نوترون) است و نه بارالکتریکی آن. دلیل این امرآن است که طولهای پراکندگی و همچنین بردهای مؤثر در برهم‌کنشهای pp و nn با هـم مساوی است. البته، در ابتـدا لازم است که تصحیح برهم‌کنش کولنی را در مـورد

پارامترهای pp درنظر بگیریم. با درنظر گرفتن این تصحیح، پارامترهـای تک‌تایهٔ pp چنین می‌شود

$$a = -۱۷٫۱ \pm ۰٫۲ \text{ fm}$$

$$r_۰ = ۲٫۸۴ \pm ۰٫۰۳ \text{ fm}$$

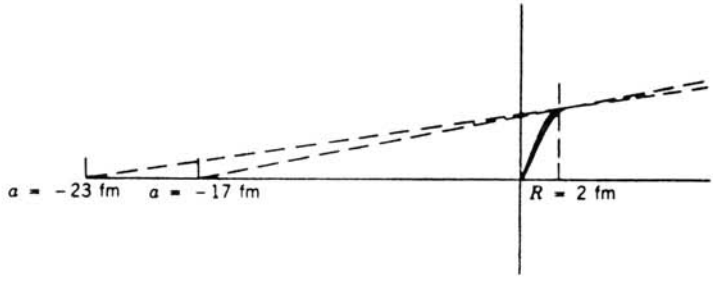
ایـن مقادیر بـا پـارامترهای اندازه‌گیـری شـدهٔ nn ($a = -۱۶٫۶ \pm ۰٫۵$ fm، $r_۰ = ۲٫۶۶ \pm ۰٫۱۵$ fm) سازگاری خوبی دارند، که‌این سازگاری قویاً مؤید مفهوم تقارن بار است.

نیروی نوکلئون ـ نوکلئون تقریباً مستقل از بارالکتریکی است

این بدان معنی است که (همانند حالتهای اسپین) پس از تصحیح نیروی کولنی pp، هرسه نیروی هسته‌ای nn، pp، و pn باهم مساوی‌اند. به‌این ترتیب، استقلال بارشرطی قویتر ازتقارن بار است. دراین مورد، شواهد امرچندان قاطع نیست. درواقع، به‌نظرمی‌رسد که طول پراکندگی حالت تک‌تایهٔ np ($-۲۳٫۷$ fm) تفاوت زیادی باطولهای پراکندگی pp و nn (-۱۷ fm) داشته باشد. امـا با توجه به‌شکل ۱۱.۴ معلوم می‌شود که طول پراکندگی منفی نسبت به‌تابع‌موج هسته درنزدیکی $r = R$ حساسیت قابل‌ملاحظه‌ای دارد، به‌طوری‌که تغییر بسیارکوچك ψ می‌تواند به تغییر بزرگی درطول پراکندگی منجرشود. بنابراین اختلاف زیاد بین طولهای پراکندگی را می‌توان ناشی ازاختلاف بسیارکوچکی (در حدود ۱٪) در پتانسیلها دانست، که (چنانکه دربخش بعدی می‌بینیم) به‌آسانی به‌وسیلهٔ مدل نیروی تبادل قابل توجیه است.

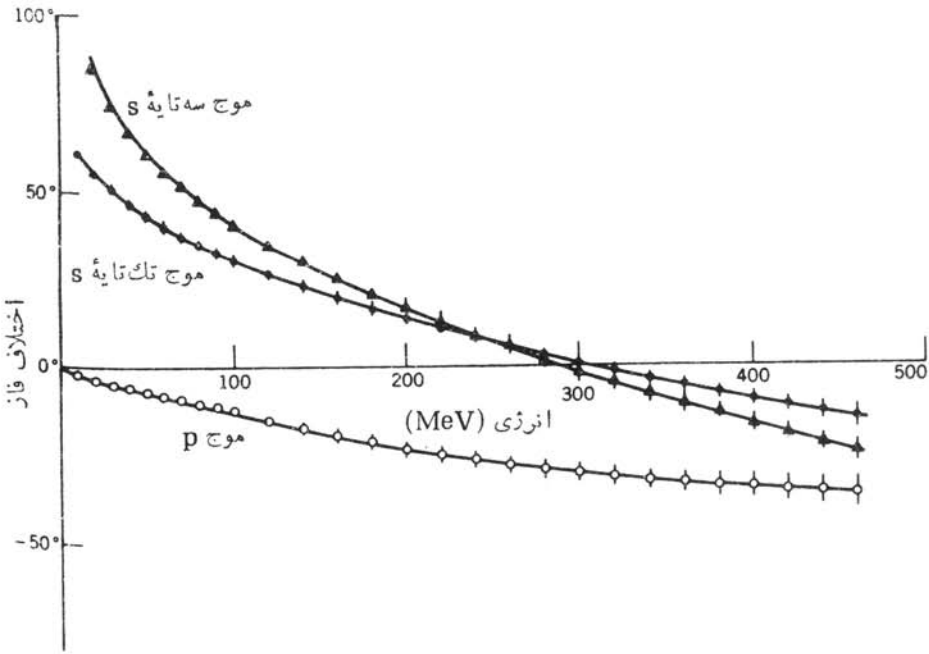
برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون درفواصل خیلی‌کوتاه دافعه می‌شود

ایـن نتیجه از بررسی کیفی چگالی هسته‌ای حـاصل می‌شود. رشد هسته در اثـر افزایش



شکل ۱۱.۴ تغییر بسیارکوچکی در تابع‌موج نوکلئون ـ نوکلئون درنزدیکی $r = R$ می‌تواند در اثر برونیابی به اختلاف قابل‌توجهی در طول پراکندگی منجر شود [این شکل را با شکل ۷.۴ (ب) مقایسه کنید].

نوکلئونها به صورتی است کـه چگالی مرکزی آن تقریباً ثابت می‌ماند، واز این‌رو باید عاملی وجود داشته باشدکه از تجمع و نزدیك شدن بیش از حد نوکلئونها جلوگیری کند. برای آنکه مسئله را کمیتر بررسی کنیم، پراکندگی نوکلئون ـ نوکلئون را در انـرژیهای بالا درنظرمی گیریم. اختلاف فازموج تك‌تایهٔ s برای پراکندگی نوکلئون ـ نوکلئون را تا انرژی ۵۰۰ MeV درشکل ۱۲.۴ نشان داده‌ایم. (در ایـن انرژیها اختلاف فاز امواج جزئی مراتب بالاتر، مثلا موجهای p و d، نیز دراین سطح مقطعها سهیم‌اند. اختلاف‌فاز موج s را به‌آسانی می‌توان از اندازه‌گیریهای پراکندگی دیفرانسیلی $d\sigma/d\Omega$ برحسب θ استخراج کرد، زیرا این اختلاف‌فاز به θ بستگی ندارد.) اختلاف‌فازموج s درانرژی حدود ۳۰۰MeV منفی می‌شود، که این امرحاکی ازتغییر نیروازصورت جاذبه به‌صورت دافعه است. برای آنکه مغزدافعه را به حساب آوریم، بایـد پتانسیلهای مورد استفاده را اصلاح کنیم. برای مثال، اگـر در اینجا هم برای سهولت محاسبات چاه‌مربعی را انتخاب کنیم، ممکن است تابع پتانسیل را به‌صورت زیر درنظر بگیریم



شکل ۱۲.۴ اختلاف فـاز حاصل از پراکندگی نوترون ـ پروتون درانرژیهای متوسط. تغییر اختلاف فازموج s ازمقادیرمثبت به‌منفی، درانرژی حدود ۳۰۰ MeV، نشان می‌دهدکه دراین انرژیها نوکلئون فرودی با مغز دافعه در برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون روبه‌رو شده است.

$$V(r)=+\infty \qquad r<R_c$$
$$=-V_0 \qquad R_c\leqslant r\leqslant R \qquad (۵۰.۴)$$
$$=0 \qquad r>R$$

در اینجا R_c شعاع مغز دافعه است که با تنظیم مقدار آن می‌توان به‌سازگاری رضایتبخشی بااختلاف فاز تجربی موج s دست یافت. با انتخاب $R_c \simeq 0.5$ fm مقدار حاصل از محاسبه با اختلاف فاز تجربی سازگار می‌شود.

برهم‌کنش نوکلئون-نوکلئون می‌تواند به‌تکانه یاسرعت نسبی نوکلئونهاهم بستگی‌داشته باشد

نیروهای وابسته به‌سرعت یا تکانه را نمی‌توان با پتانسیل نرده‌ای نشان داد، اما با استفاده ازجملات درجهٔ اول $\mathbf{p}$، درجهٔدوم $\mathbf{p}$، وغیره، که هرکدام ازآنها بـا یك پتانسیل مشخصهٔ $V(r)$ متناظرند، می‌توان آنها را بـه طرز قابل قبولی در نظر گرفت. تحت تأثیرعملگر پاریته داریم $\mathbf{p}\rightarrow-\mathbf{p}$، و دراثرعملگر برگشت زمان هم داریم $\mathbf{p}\rightarrow-\mathbf{p}$. پس هـر جمله‌ای‌که فقط شامل توانهای درجهٔ اول $\mathbf{p}$ باشد غیرقابل قبول است، زیرا دراین‌صورت ناورداییهای پاریته و برگشت زمان هردو نقض خواهند شد. جملاتی‌که به صورت $\mathbf{r}\cdot\mathbf{p}$ یـا $\mathbf{r}\times\mathbf{p}$ باشند، نسبت به پاریته ناوردا هستند ولی ناوردایی برگشت زمـان را نقض می‌کنند. یکی از صورتهای قابل قبول این جمله‌کـه شامل توانهای درجهٔ اول $\mathbf{p}$ می‌شود و نسبت به پاریته و برگشت زمان هر دو ناورداست، $V(r)(\mathbf{r}\times\mathbf{p})\cdot\mathbf{S}$ است‌کـه درآن $\mathbf{S}=\mathbf{s}_1+\mathbf{s}_2$ اسپین کل دو نوکلئون مورد بررسی است. تکانهٔ زاویه‌ای نسبی نوکلئونها برابر $\mathbf{l}=\mathbf{r}\times\mathbf{p}$ است، و در نتیجه این جمله‌که به خاطر مشابهت بـا فیزیك اتمی جملهٔ اسپین-مدار نامیده می‌شود، به‌صورت $V_{so}(r)\mathbf{l}\cdot\mathbf{s}$ نوشته می‌شود. هرچندکـه از جملات درجهٔ بالاتر هم می‌توان استفاده‌کرد، ولی این عبارت تنها عبارت درجهٔ اول $\mathbf{p}$ است‌که با تقارن پاریته و برگشت زمان هردو سازگاری دارد.

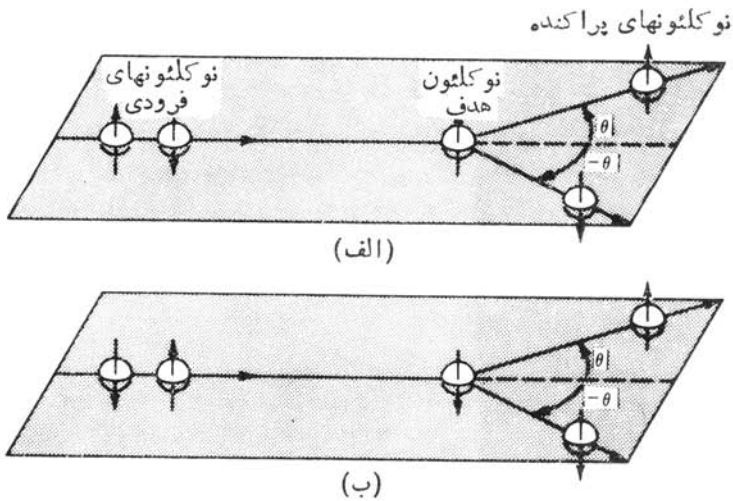
فرض برهم‌کنش اسپین-مدار، بـا این مشاهدهٔ تجربـی تقویت می‌شود کـه اسپین نوکلئونهای پراکنده ممکن است سمتگیری خاصی در فضا داشته باشد کـه دراین حالت اسپین نوکلئونها را قطبیده می‌گویند. قطبیدگی نوکلئونهای موجود در یك باریکه (یا یك هدف) چنین تعریف می‌شود

$$P=\frac{N(\uparrow)-N(\downarrow)}{N(\uparrow)+N(\downarrow)} \qquad (۵۱.۴)$$

که درآن $N(\uparrow)$ و $N(\downarrow)$ به ترتیب تعداد نوکلئونهایی است کـه سمتگیری اسپین آنها به‌طرف بالا و به‌طرف پایین است. مقدار P درگستره‌ای از مقادیر $+1$ برای باریکه‌ای با ۱۰۰٪ اسپین رو به‌بالا، تا -1 برای باریکه‌ای بـا ۱۰۰٪ اسپین رو به‌پایین، قـرار می‌گیرد. برای یك باریکهٔ ناقطبیده $P=0$ می‌شود، وایـن بدان معنی است‌کـه نیمی از

نوکلئونها جهت اسپین‌شان رو به‌بالا و نیمی دیگر رو به‌پایین است.

آزمایش پراکندگی شکل ۱۳.۴(الف) را درنظر می‌گیریم که در آن باریکه‌ای ناقطبیده (که به صورت مخلوطی از نوکلئونهای با اسپین بالا و پایین نموده شده است) بر نوکلئون هدفی که سمتگیری اسپین آن رو به‌بالاست فرود می‌آید. فرض کنید که برهم‌کنش نوکلئون - نوکلئون موجب شود که نوکلئونهای با اسپین رو به‌بالا تحت زاویهٔ θ به طرف چپ، و نوکلئونهای با اسپین رو به‌پایین تحت زاویهٔ $\theta-$ به‌طرف راست پراکنده شوند. شکل(ب)، همان آزمایش را از دیدگاه ناظری که نسبت به‌اولی معکوس ایستاده است یا ناظری که حول باریکهٔ فرودی به اندازهٔ 180° دوران کرده است، نشان می‌دهد. آزمایش شکل ۱۳.۴ (ب) را همچنین می‌توان به صورت پراکندگی یك باریکهٔ ناقطبیده از هدف نوکلئونی با اسپین رو به‌پایین تلقی کرد که در این مورد هم نوکلئونهای فرودی با اسپین رو به‌بالا به‌طرف چپ، و نوکلئونهای اسپین پایین به‌طرف راست پراکنده می‌شوند. نتیجهٔ آزمایش، حتی درمورد هدف ناقطبیده که شامل مخلوطی از نوکلئونهای اسپین بالا و اسپین پایین است نیز همین است: هنگامی که باریکه‌ای ناقطبیده ازهدفی ناقطبیده پراکنده می‌شود، ترجیحاً نوکلئونهای با اسپین رو به‌بالا تحت زاویهٔ θ و نوکلئونهای با اسپین رو به‌پایین

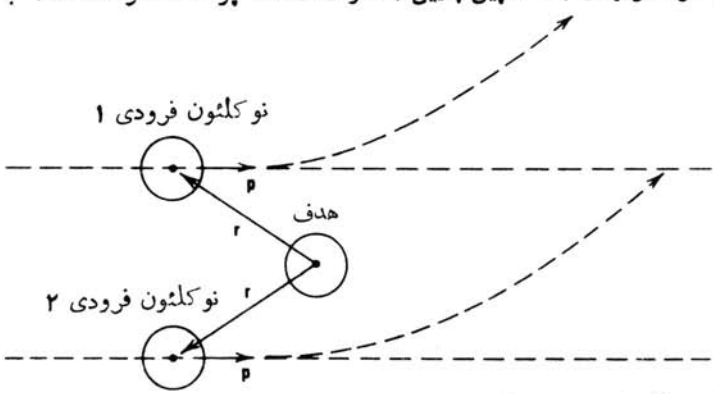


شکل ۱۳.۴ یك باریکهٔ ناقطبیده (که به‌صورت مخلوطی از نوکلئونهای بااسپین بالا وپایین نموده شده‌است) ازهدفی که می‌تواند اسپین رو به‌بالا یا رو به‌پایین داشته‌باشد پراکنده می‌شود. درحالت (الف)، نوکلئونهای با اسپین رو به‌بالا با زاویهٔ θ به طرف چپ پراکنده می‌شوند، درحالی که نوکلئونهای با اسپین رو به‌پایین با زاویهٔ $\theta-$ به‌طرف راست پراکنده می‌شوند. حالت (ب) را می‌توان همان حالت (الف) از دیدگاه ناظری معکوس یا ناظری پس از دوران 180° حول راستای باریکه تلقی کرد. حالت اخیر نشان می‌دهد که پراکندگی ازهدفی که اسپین آن رو به‌پایین باشد نیز به‌همان نتیجه منتهی می‌شود.

تحت زاویهٔ θ — پراکنده خواهند شد.

هرچندکه در اینجا ظاهراً به‌نظرمی‌رسدکـه تقارن انعکاسی (پاریته) نقض می‌شود، ولی با ترسیم آزمایش و تصویرآینه‌ای آن می‌توانیم خودمان را قانع‌کنیم‌کـه در واقع نقضی درکار نیست. اگر قطبیدگی خالص نوکلئونهای پراکنده تحت زاویهٔ θ برابر P و تحت زاویهٔ θ — برابر P — باشد، پاریته پایسته می‌ماند.

اکنون می‌خواهیم ببینیم که برهم‌کنش اسپین ـ مدار چگونه ممکن‌است به‌پراکندگی بـا قطبیدگی مشخص منتهی شود. در شکل ۱۴.۴ دو نوکلئون بـا اسپین روبه بـالا نشان داده شده‌انـدکه بـر یك هدف با اسپین روبه‌بالا فرود می‌آیند، بنابراین $S=1$ است. [پراکندگیی‌که در آن فقط امواج s شرکت داشته باشند باید تقارن کروی داشته باشد، و بنابراین هیچ‌گونه قطبیدگی در آن وجودندارد. پراکندگی‌موج p ($l=1$) درنوکلئونهای یکسان، یك تابع‌موج فضایی پادمتقارن و بنابراین یك تابع‌موج اسپینی متقارن خواهـد داشت.] در اینجا بنابه‌فرض $V_{so}(r)$ را منفی می‌گیریم. برای نوکلئون فرودی ۱، جهت $\mathbf{l}=\mathbf{r}\times\mathbf{p}$ به طرف پایین (به طرف داخـل صفحهٔ کاغذ) است. در ایـن صورت، چون بردارهای $\mathbf{l}$ و $\mathbf{S}$ درخلاف جهت یکدیگرند، بردار $\mathbf{l}\cdot\mathbf{S}$ منفی خواهدشد. بنابراین، ترکیب $V_{so}(r)\mathbf{l}\cdot\mathbf{S}$ مثبت است و در نتیجه بین نوکلئون فرودی ۱ و نوکلئون هدف یك نیروی دافعه به وجود می‌آیدکه نوکلئون فرودی را به طرف چپ می‌راند. امـا برای نوکلئون فرودی ۲، جهت $\mathbf{l}$ به‌طرف بالا، حاصلضرب $\mathbf{l}\cdot\mathbf{S}$ مثبت، وبرهم‌کنش ازنوع جاذبه‌است. درنتیجه، نوکلئون۲ به‌طرف هدف‌کشیده می‌شود ومانند نوکلئون قبلی به‌طرف‌چپ پراکنده خواهد شد. بنابراین نوکلئونهای فرودی با اسپین بالا ترجیحاً به‌طرف چپ و (بـا همین استدلال) نوکلئونهای بـا اسپین پایین به طرف راست پراکنده خواهند شد. بدین‌گونه،



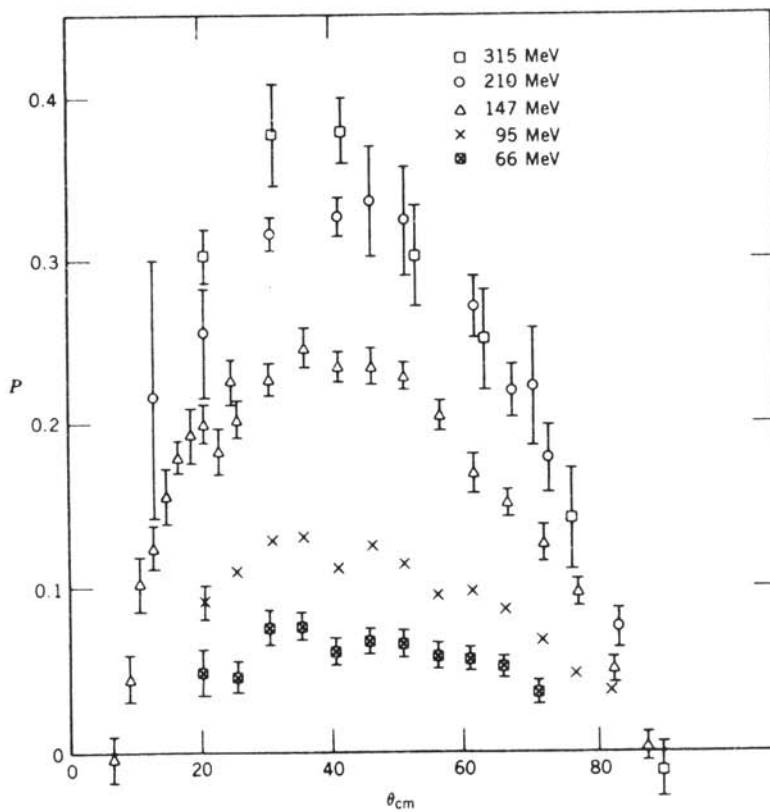
شکل ۱۴.۴ آزمایش پراکندگی نوکلئون ـ نوکلئون از دید قائم. جهت همهٔ اسپینها روبه‌بالا (به‌طرف خارج از صفحهٔ کاغذ) است. جهت $\mathbf{r}\times\mathbf{p}$ برای نوکلئون فرودی ۱ بـه طرف داخل صفحه، و بنابراین $\mathbf{l}\cdot\mathbf{s}$ منفی است‌که به تولید نیروی دافعه و پراکندگی به طرف چپ منتهی می‌شود. جهت $\mathbf{r}\times\mathbf{p}$ برای نوکلئون فرودی ۲ به‌طرف خارج صفحه است‌کـه به تولید نیروی جاذبه و بازهم پراکندگی به‌طرف چپ منجرمی‌شود.

هنگامی که باریکه‌ای از ذرات ناقطبیده برهدفی فرود می‌آید، نیروی اسپین ـ مدار می‌تواند باریکه‌های پراکندهٔ قطبیدهِ تولید کند.

درانرژیهای کم که در آن غلبه با پراکندگی موج s است، نمی‌توان انتظار قطبیدگی را داشت. هنگامی که انرژی ذرات فرودی افزایش می‌یابد، سهم پراکندگی موج p نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه بایـد افزایش مقدار قطبیدگی را انتظار داشت. شکل ۱۵.۴ صحت این انتظار را تأیید می‌کند. با توجه به نحوهٔ تغییرات P برحسب θ وانرژی، می‌توان درمورد شکل $V_{so}(r)$ به‌نتایجی دست یافت.

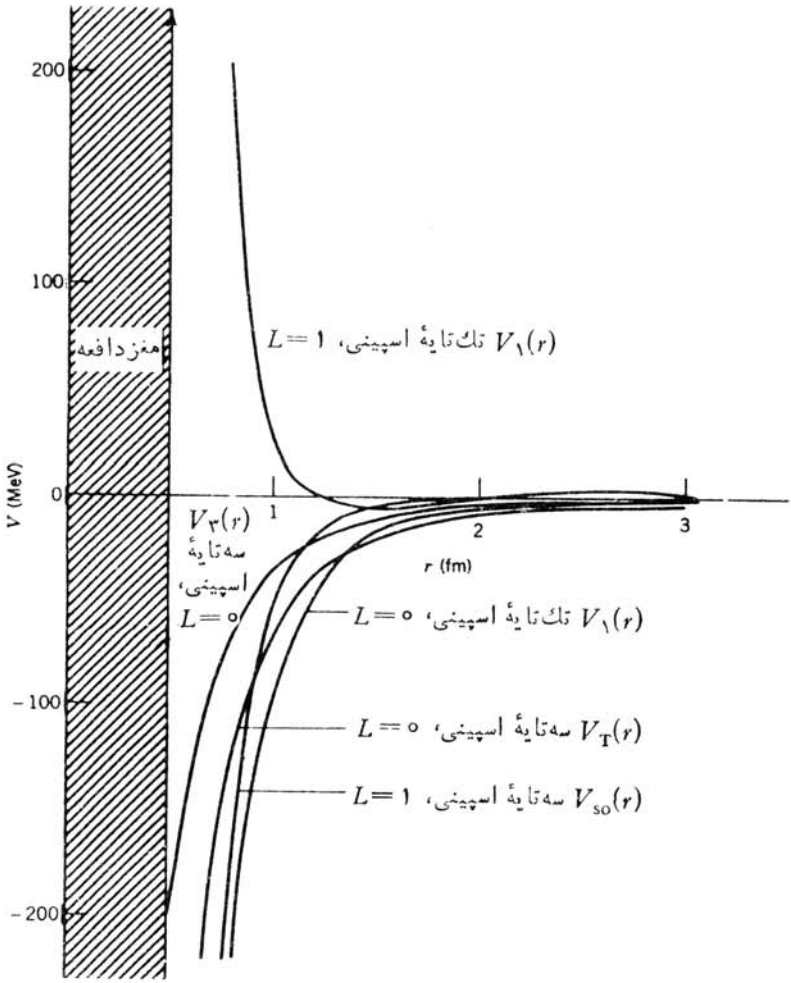
موضوع کلی قطبیدگی در واکنشهای هسته‌ای خیلی پیچیده‌تر از آن چیزی است که دراین بحث کوتاه بدان پرداخته‌ایم. ما می‌بایست میزان تأثیراستفاده از باریکه‌های قطبیده وهدفهای قطبیده را دراندازه‌گیری سطح مقطع واکنشها نیز درنظرمی‌گرفتیم که درفصل ۱۱ (جلد دوم، ترجمهٔ فارسی) بدان خواهیم پرداخت.

بااستفاده ازاین‌همه اطلاعات تجربی (سطح مقطع جزئی وکلی، وابستگی به‌اسپین،



شکل ۱۵.۴ در پراکندگی پروتون ـ پروتون، با افزایش انرژی ذرات فرودی مقدارقطبیدگی بیشینه نیزافزایش می‌یابد.

وقطبیدگی)، می‌توان مجموعه‌ای از پتانسیلهای پدیده‌شناختی $V(r)$ پیشنهاد کرد که سازگاری قابل قبولی بـا اطلاعات موجود نوکلئون ـ نوکلئون داشته باشد. آنگاه این پتانسیلها را می‌توان درمحاسبات مربوط به هسته‌های پیچیده‌ترمورد استفاده قرار داد. برای‌نمونه، یك مجموعه از این‌گونه پتانسیلها را در شکل ۱۶.۴ نشان داده‌ایم. مطابق معمول، پتانسیلهای



شکل ۱۶.۴ چند نمونه از پتانسیلهای نوکلئون ـ نوکلئون. این نمونه‌ها شامل مـوارد زیر می‌شوند: جملات تك‌تایه وسه‌تایهٔ مربوط به‌جاذبه‌که در پراکندگی موج s شرکت دارند، جملهٔ دافعه‌ای‌که یك نوع پراکندگی موج p ($L=1$) ازآن ناشی می‌شود، وجملات مربوط به‌جاذبهٔ تانسوری و برهم‌کنش اسپین ـ مدار. درتمام این پتانسیلها، مغزدافعه‌ای به‌شعاع $r=0.49\,\mathrm{fm}$ وجود دارد.

منفی‌مولد نیروی جاذبه وپتانسیلهای مثبت مولد نیروی دافعه‌هستند. توجه به‌نحوهٔ مشارکت خصوصیاتی ازقبیل برد برهم‌کنشها، مغز دافعه، اختلاف فاز موج s مربوط به‌نیروی جاذبهٔ قوی، اختلاف فاز موج دافعهٔ p، واستقلال از بار (به‌خاطرآنکه نوکلئونها به‌طور متمایز در نظرگرفته نشده‌اند)، آموزنده است.

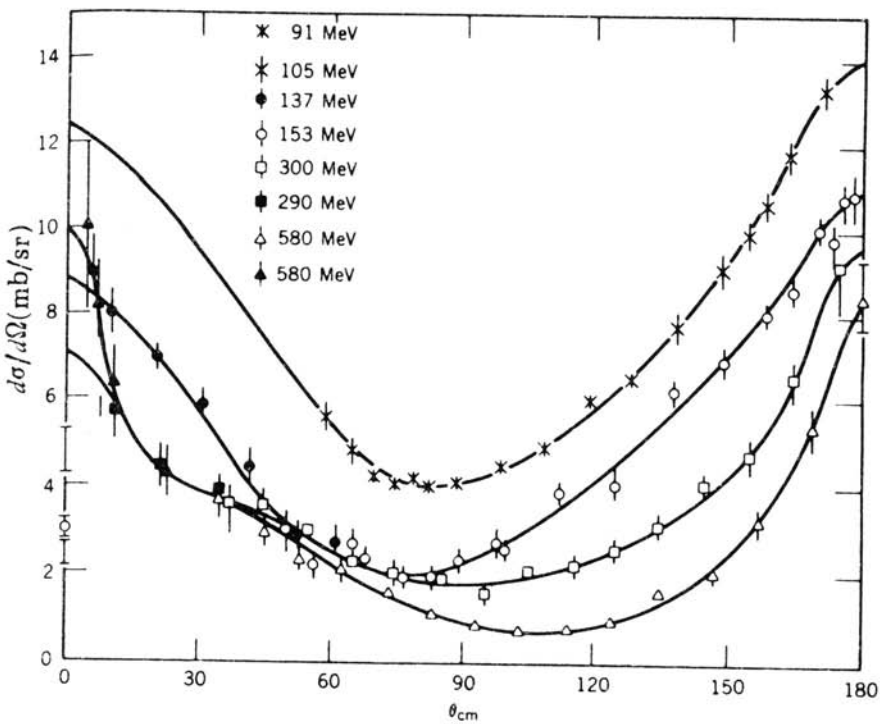
۵.۴ مدل نیروی تبادل

پتانسیلهای پدیده‌شناختی مورد بحث در بخش پیشین، در تعیین بسیاری از خواص اندازه‌گیری‌شدهٔ برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون موفقیت خوبی داشته‌اند. البته با افزایش تعداد جملات دخیل در برهم‌کنش، قدرت و دقت پیش‌بینی این پتانسیلها نیز افزایش خواهد یافت. برای نمونه، می‌توانیم جمله‌ای به‌پتانسیل بیفزاییم که بستگی آن را با توان دوم تکانه ($\mathbf{l}^2$) نشان دهد، می‌توانیم پتانسیلها را به‌صورتی درآوریم که برای هر مقداری از l شکلی متفاوت داشته باشند، و همین طور الی آخر. هر جملهٔ جدیدی که در پتانسیل وارد می‌شود ممکن است نتیجهٔ محاسبات را بهبود ببخشد، ولی با این کار شکل پتانسیل سادگی‌اش را از دست می‌دهد. بعلاوه، با این کار ممکن است ما هدف اصلی خود را که همان درك برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون است، گم کنیم. صرف اینکه پتانسیلها آن‌قدر گسترش یابند که محاسبات دقیقی از آنها حاصل شود، بدان معنی نیست که درك ما از ویژگی بنیادی برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون افزایش یافته است. بنابراین، با روش اصل موضوعی می‌کوشیم که سازوکاری فیزیکی برای نیروی نوکلئون ـ نوکلئون در نظر گیریم که بتواند پتانسیلهایی را که در محاسبات موفق بوده‌اند به‌دست دهد.

یکی از سازوکارهای موفق، سازوکار نیروی تبادل است. برای تأیید حضور نیروی تبادل درهسته‌ها، دو دلیل اصلی دردست است. دلیل اول به‌خاصیت اشباع نیروی هسته‌ای مربوط می‌شود. پشتوانهٔ تجربی خاصیت اشباع را از چگالی هسته‌ای نسبتاً ثابت وانرژی بستگی تقریباً ثابت به‌ازای هر نوکلئون در هسته‌های سنگین گوناگون به‌دست می‌آوریم. به نظر می‌رسد که هر نوکلئون فقط تعداد کمی از همسایه‌های نزدیکش را جذب می‌کند، اما این نوکلئون در فواصل خیلی کوتاه همان همسایه‌های نزدیك را هم دفع می‌کند تا از نزدیکی بیش از حد آنها جلوگیری کند. (در بخش پیشین این طرز رفتار را با انتخاب یك پتانسیل مرکزی که بردی محدود و مرکزیتی به صورت یك مغز دافعه داشت توضیح دادیم.) در مورد مولکولها نیز با طرز رفتاری دقیقاً از همین نوع روبه‌رو هستیم. وقتی دواتم را به‌همدیگر نزدیك می‌کنیم تا از ترکیب آنها یك مولکول دواتمی حاصل شود، نظیر آنچه در مورد پیوندهای کووالان دیده می‌شود، الکترونهای بین دو اتم به اشتراك گذاشته می‌شوند یا مبادله می‌شوند. در این صورت، در حالی‌که اتمها در فاصله‌ای تعادلی از یکدیگر قرار گرفته‌اند، یك مولکول پایدار تشکیل می‌شود. اگر بخواهیم اتمها را به‌زور به یکدیگر نزدیکتر کنیم، در اثر همپوشی پوسته‌های الکترونی پر یك نیروی دافعهٔ

قوی بین اتمها به‌وجود خواهد آمد. علاوه‌براین، نزدیك شدن مولکول به‌یك اتم سوم هم ممکن است فقط به تولید نیروی بسیار ضعیفی بین این اتم و دو اتم قبلی منجر شود. در صورتی‌که در مجموعهٔ مقید (یا مولکول) اولی، از همهٔ الکترونهای ظرفیت استفاده شده باشد، هیچ‌الکترونی برای تشکیل پیوند جدید نخواهیم‌داشت ودرنتیجه نمی‌توان پیوندی بین مولکول و اتم سوم ایجاد کرد. نیروهای هسته‌ای هم خصوصیت اشباعی مشابهی از خود بروز می‌دهند.

یکی دیگر از دلایل تأییدکنندهٔ مدل نیروی تبادل را از مطالعهٔ پراکندگی np در انرژیهای بالا به‌دست می‌آوریم. سطح‌مقطع دیفرانسیلی پراکندگی np را درشکل۱۷.۴ نشان داده‌ایم. سطح‌مقطع پراکندگی در زوایای نزدیك به‌صفر در جهات روبه‌جلو دارای مقادیر بزرگ قله‌ای است، و این نشانگر آن است که انتقال تکانه در برخورد بین ذرات فرودی و هدف کوچك است. مرتبهٔ بزرگی این قلهٔ رو به‌جلو را با بررسی بیشینهٔ انتقال



شکل ۱۷.۴ سطح مقطع دیفرانسیلی پراکندگی نوترون ـ پروتون در انرژیهای متوسط. قلهٔ بزرگ پراکندگی رو به‌جلو (در زوایای نزدیك به صفر) را انتظار داریم، اما قله‌ای به همان بزرگی را در پراکندگی رو به عقب (در زوایای نزدیك به °۱۸۰) نشانهٔ وجود نیروی تبادل می‌دانیم.

تکانه، بـه ترتیب زیر، می‌توان براورد کـرد: برای انحراف در زوایـای کوچك داریم $\sin\theta \simeq \theta = \Delta p/p$ کـه در آن p تکانهٔ ذرهٔ فرودی و Δp تکانهٔ عـرضی حاصل از برخورد است. اگر متوسط نیروی وارد در طی زمان برخورد Δt را F بگیریم، داریـم $\Delta p = F\Delta t$. نیروی F برابر $-dV/dr$ است، و از این‌رو نیـروی متوسط از مرتبهٔ $V_\circ/R$ می‌شود که در آن $V_\circ$ عمق چاه پتانسیل مربعی نوکلئون ـ نوکلئون و R برد آن است. (حتی اگـر پتانسیل واقعی صورت ثابتی هـم نداشته باشد، همان‌طورکه در جملهٔ مرکزی شکل ۱۶.۴ دیده می‌شود، مقـدار متوسط dV/dr باید از مرتبهٔ $V_\circ/R$ شود.) زمان برخورد Δt باید ازمرتبهٔ R/v باشد، که در آن v سرعت ذرهٔ فرودی‌است. بنابراین خواهیم داشت

$$\theta = \frac{\Delta p}{p} = \frac{F\Delta t}{p} = \frac{1}{p}\frac{V_\circ}{R}\frac{R}{v} = \frac{V_\circ}{pv} = \frac{V_\circ}{2T} \qquad (۵۲.۴)$$

که در آن T انرژی جنبشی ذرهٔ فرودی است. برای انرژیهایی که در شکل ۱۷.۴ نموده شده‌اند، مقادیر θ در حدود 10° یا کمتراز 10° است. مسلماً انتظار نداریم که در زاویهٔ پراکندگی 180° با قله‌ای روبه‌روشویم! اما این وسوسه وجود داردکه این‌قلهٔ «روبه‌عقب» را نتیجهٔ بـرخورد رودررو در چارچوب مرکز جـرم تلقی کنیم که در آن حرکت ذرهٔ فرودی معکوس می‌شود. براورد بـالا نشان می‌دهد کـه چنین توضیحی نمی‌تواند درست باشد.

اگرفرض کنیم که درطی برخورد، نوترون و پروتون جایشان راباهم عوض می‌کنند، مدل تبادل می‌تواند توضیح قانع‌کننده‌تری ارائه‌کند. این بدان معنی است کـه نوترونی که به‌طرف جلو در حرکت است به پروتون تبدیل می‌شود، و پروتونی‌که به طرف عقب در حرکت است (از دیدگاه چارچوب مرکز جرم) به نوترون تبدیـل می‌شود. در ایـن صورت از دیدگاه چارچوب آزمایشگاه، نوکلئون فرودی به صورت نوکلئونی نمـایان می‌شودکه به طرف جلو در حرکت است. چنین تحلیلی با براورد زاویهٔ انحراف کوچك در پراکندگی نوکلئون ـ نوکلئون که در بالا مطرح شد، سازگاری دارد.

خلاصه اینکه، هـم خصوصیت اشبـاع نیروهای هسته‌ای و هم وجود قلـهٔ بزرگ روبه‌عقب در پراکندگی np را با استفاده ازنیروی تبادل می‌توان تـوضیح داد. درمورد اول می‌گـوییم برای‌آنکه نوعی پیوند اشباعی بین نوکلئونها وجود داشته باشد باید بین آنها «چیزی» رد و بدل شود. در مورد دوم می‌گوییم که بین نوکلئونها «چیزی» مبادله می‌شودکه عملا خصوصیت آنها را تغییر می‌دهد.

در مراحل آغازین تکامل فیزیك‌کلاسیك، برهم‌کنش بین اجسام را ازطریق «کنش از دور» می‌دانستند. این بدان معنی است‌که نیروی یك جسم به‌طریق اسرارآمیزی درفضا به جسم دیگر منتقل می‌شود. پیشرفت بزرگ فیزیك نظری قرن نوزدهم را باید در معرفی مفهوم میدان دانست. طبق این نظر، هر جسمی در فضا یك میدان نیرو (که نمونه‌های آن

میدانهای الکترومغناطیسی و گرانشی هستند) ایجاد می‌کند و برهم‌کنش جسم دوم، نه‌مستقیماً باجسم اول، بلکه‌فقط ازطریق همین میدان صورت می‌گیرد. درمورد میدان‌الکترومغناطیسی، چگونگی انتقال میدان درفضا توسط ماکسول نشان داده شد. عمده‌ترین تحول فیزیك قرن بیستم را باید پیدایش مکانیك کوانتومی بدانیم که بنابرآن، هرگونه تبادل انرژیی لزوماً به‌صورت بسته‌ها یا مضربهایی ازیك مقدار گسسته یا کوانتوم انرژی است. میدان کلاسیك کمیتی یکنواخت و پیوسته است، و برای اینکه نظریهٔ کلاسیك میدان را با نظریهٔ کوانتومی سازگار کنیم، خود میدان را باید به صورت کوانتومی درآوریم. یعنی بنابرنظریهٔ کوانتومی میدان، جسم اول در فضای اطرافش یك میدان کلاسیك به‌وجود نمی‌آورد بلکه از خودکوانتوم میدان گسیل می‌کند. در این صورت، جسم دوم می‌تواند این کوانتومهای میدان را جذب کند (و به طرف جسم اول بازپس فرستد). پس این دو جسم به طور مستقیم با کوانتومهای (میدان) مبادله شده، و به طور غیرمستقیم با یکدیگر، برهم‌کنش دارند.

با توجه به‌بحث پیشین، طبیعی است که آن «چیزی» راکه در برهم‌کنش نوکلئون-نوکلئون مبادله می‌شود، کوانتوم میدان هسته‌ای در نظر بگیریم. روشن است که برای تبدیل یك نوترون بااسپین ۱/۲ به‌یك پروتون بااسپین ۱/۲، ذرهٔ مبادله شده باید دارای اسپین درست (۰ یا ۱) و بار الکتریکی باشد. بعلاوه، اگر بخواهیم همان مفهوم نیروی تبادل را برای برهم‌کنشهای nn و pp هم به‌کار ببریم، نوع بدون بار ذرهٔ مبادله شونده نیز باید وجود داشته باشد. با استفاده از برد نیروی هسته‌ای که در عمل مشاهده می‌کنیم، می‌توانیم جرم ذرهٔ تبادلی را براوردکنیم. فرض‌کنیدکه نوکلئون (که آن را با N نشان می‌دهیم تا پروتون و نوترون هردو را شامل شود) ذره‌ای مانند x از خود گسیل می‌کند. نوکلئون دومی این ذرهٔ x را جذب می‌کند

$$N_1 \rightarrow N_1 + x$$

$$x + N_2 \rightarrow N_3$$

یك نوکلئون چگونه می‌تواند یك ذره با انرژی جرمی $m_x c^2$ از خودگسیل کند و بدون نقض پایستگی انرژی همچنان به صورت نوکلئون باقی بماند؟ چنین عملی ممکن نیست، مگراینکه گسیل و جذب مجدد نوکلئون در چنان فاصلهٔ زمانی کوتاهی Δt صورت بگیرد که ما از نقض پایستگی انرژی مطلع نشویم. چون اصل عدم قطعیت توانایی ما را در اندازه‌گیری انرژی (و در نتیجه در تعیین پایستگی انرژی) محدود می‌کند، اگر $\Delta t < \hbar/(m_x c^2)$ باشد، ما از نقض پایستگی انرژی به میزان $\Delta E = m_x c^2$ مطلع نخواهیم شد. بیشینهٔ برد نیرو را بیشینهٔ فاصله‌ای که ذرهٔ x می‌تواند در زمان Δt طی کند، تعیین می‌کند. اگر سرعت ذره را از مرتبهٔ c بگیریم، حداکثر برد ذرهٔ R چنین می‌شود

$$R = c\,\Delta t = \frac{\hbar c}{m_x c^{۲}} = \frac{۲۰۰\ \mathrm{MeV}\cdot\mathrm{fm}}{m_x c^{۲}} \qquad (۵۳.۴)$$

که در آن به‌جای $\hbar c$ از تقریب ساده‌ای استفاده شده است. معادلهٔ (۵۳.۴) حاکی از وجود رابطه‌ای مفید بین انرژی جرمی ذرات مبادله‌شونده و برد نیروی تبادل است. روشن است که اگر برد نیروی هسته‌ای در حدود ۱ fm باشد، انرژی جرمی ذرهٔ تبادلی می‌باید در حدود ۲۰۰ MeV شود.

چنین ذراتی را که فقط برای لحظاتی زودگذر دوام می‌آورند و می‌توانند قانون پایستگی انرژی و تکانه را نقض کنند (در نوکلئونهای جذب‌کننده و گسیل‌کننده پس‌زنی دیده نمی‌شود)، ذرات مجازی می‌گویند. ما می‌توانیم نیروی حاصل از تبادل ذرات مجازی را مشاهده کنیم، ولی نمی‌توانیم خود این ذرات را در حین تبادل مشاهده کنیم. (اما، ذرات مجازی مبادله‌شونده را می‌توان همانند ذرات معمولی در نظر گرفت. بنابر نظریهٔ میدان، برهم‌کنش کولنی بین بارهای الکتریکی را می‌توان به صورت تبادل فوتونهای مجازی که خواص مشابهی با فوتونهای حقیقی و معمولی دارند، در نظر گرفت.)

ذرات تبادلی حامل نیروی هسته‌ای را مزون می‌نامند (واژهٔ «مزو» در یونانی به‌معنی میانه و متوسط است که به‌جرم متوسط این ذرات که از الکترون بیشتر واز نوکلئون کمتر است، اشاره دارد). سبکترین مزونها را که مزون π یا پیون نامیده می‌شود، عامل اصلی آن قسمت از پتانسیل نوکلئون-نوکلئون که برد بلندتر (از ۱٫۰ تا ۱٫۵ fm) دارد می‌دانیم. برای آنکه انواع تبادلهای لازم در سیستم دو نوکلئونی امکان‌پذیر باشد، باید سه‌نوع پیون با بارهای الکتریکی ۱+، ۰، و ۱− وجود داشته‌باشند. پیونها اسپین صفر دارند و انرژی سکون‌شان معادل ۱۳۹٫۶ MeV (برای $\pi^{\pm}$) و ۱۳۵٫۰ MeV (برای π°) است. در بردهای کوتاهتر (از ۰٫۵ تا ۱٫۰ fm)، شاید بتوان عامل پیوند هسته‌ای را تبادل دو پیونی دانست. در بردهای خیلی کوتاهتر (۰٫۲۵ fm)، تبادل مزون ω ($mc^{۲} = ۷۸۳\ \mathrm{MeV}$) ممکن است در تشکیل مغز دافعه دخالت داشته‌باشد و تبادل مزون ρ ($mc^{۲} = ۷۶۹\ \mathrm{MeV}$) می‌تواند تأمین‌کنندهٔ اثر اسپین-مدار در برهم‌کنش هسته‌ای باشد. در فصل ۱۷ (جلد دوم، ترجمهٔ فارسی) دربارهٔ خواص این مزونها بیشتر بحث خواهیم کرد.

اختلاف جرم پیونهای باردار وخنثی می‌تواند نقض احتمالی کوچکی را که قبلا در مورد استقلال بار مطرح شد، توضیح دهد. پیون منفردی که در برهم‌کنش بین نوکلئونهای یکسان مبادله می‌شود، لزوماً از نوع π° است

$$\mathrm{n}_{۱} \rightarrow \mathrm{n}_{۱} + \pi^{\circ} \qquad \pi^{\circ} + \mathrm{n}_{۲} \rightarrow \mathrm{n}_{۲}$$

یا

$$\mathrm{p}_{۱} \rightarrow \mathrm{p}_{۱} + \pi^{\circ} \qquad \pi^{\circ} + \mathrm{p}_{۲} \rightarrow \mathrm{p}_{۲}$$

چون هیچ نوکلئونی که بار ۱− یا ۲+ داشته باشد وجود ندارد، تبادل پیون باردار در این موارد کارساز نیست

$$\pi^- + n_2 \to ? \quad \text{اما} \quad n_1 \to p_1 + \pi^-$$

$$\pi^+ + p_2 \to ? \quad \text{اما} \quad p_1 \to n_1 + \pi^+$$

[چنانکه در فصلهای ۱۷ و ۱۸ (جلد دوم، ترجمهٔ فارسی) خواهیم دید، نوکلئونهای با بار ۱ — و ۲ + در حالتهای برانگیخته وجود دارند، ولی این حالتهای پرانرژی در آزمایشهای انرژی پایین که در این فصل مورد بحث است سهم قابل توجهی ندارد.] اما برهم‌کنش نوترون ـ پروتون با تبادل هر دو نوع پیون، باردار و خنثی، تحقق‌پذیر است

$$n_1 \to n_1 + \pi^\circ \qquad \pi^\circ + p_2 \to p_2$$

$$n_1 \to p_1 + \pi^- \qquad \pi^- + p_2 \to n_2$$

همین جملهٔ اضافی در برهم‌کنش np (و اختلاف جرم بین پیونهای باردار و خنثی) است که احتمالا اختلاف کوچکی را در پتانسیلها موجب می‌شود، و این اختلاف به‌نوبهٔ خود به اختلافی فاحش بین طولهای پراکندگی np از یك سو و pp و nn از سوی دیگر منجر می‌شود.

نظریهٔ تبادل‌مزون را در نیروهای‌هسته‌ای، نخستین‌بار یوکاوا درسال ۱۹۳۵ مطرح کرد. خلاصه‌ای‌ازکار یوکاوا را درفصل ۱۷ (جلددوم، ترجمهٔ‌فارسی) شرح می‌دهیم. تبادل‌مزون را می‌توان بااستفاده ازپتانسیلی به‌شکل کلی $r^{-1}e^{-r/R}$ نشان‌داد، که درآن R برد نیروست (برای پیونها $R = \hbar/m_\pi c = 1.5$ fm می‌شود). شکل تفصیلی پتانسیل تبادل تك‌پیونی (که در نشریات تخصصی با نماد OPEP مشخص می‌شود) به‌صورت زیراست

$$V(r) = \frac{g_\pi^2 (m_\pi c^2)^3}{3(Mc^2)^2 \hbar^2}\left[\mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{s}_2 + S_{12}\left(1 + \frac{3R}{r} + \frac{3R^2}{r^2}\right)\right]\frac{e^{-r/R}}{r/R} \quad (۵۴.۴)$$

در اینجا g_π^2 یك ثابت بدون بعد جفت‌شدگی است که (درست همانند e^2 در برهم‌کنش الکترومغناطیسی) قدرت برهم‌کنش را نشان می‌دهد، و M جرم نوکلئون است. این‌پتانسیل خاص، فقط بخش بلند ـ برد برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون را توصیف می‌کند، وجوه دیگر برهم‌کنش را باید با پتانسیلهای دیگری مشخص کرد.

مدل نیروی تبادل، در تحلیل خواص سیستم نوکلئون ـ نوکلئون موفقیت شایان توجهی داشته است. منشأ این نیروها را در تبادل مزونهای مجازی می‌دانیم. تمام این مزونها را می‌توان درآزمایشگاه تولیدکرد و به‌طور مستقیم مورد بررسی قرارداد. پیون، سبکترین مزون و در نتیجه بلند ـ بردترین مزون درمیان آنهاست. با استفاده از کاوه‌های پرانرژیتر (که طول موج دوبروی کوتاهتری دارند) می‌توانیم هسته‌ها را مورد بررسی قراردهیم و پدیده‌های مربوط به‌خصوصیات ظریفترساختار هسته‌ای را که فقط درفواصل بسیارکوتاه اتفاق می‌افتند، مطالعه کنیم. این‌گونه پدیده‌ها را ناشی از تبادل مزونهای سنگینتر تلقی می‌کنیم. با بررسی وابستگی فضایی و اسپینی این برهم‌کنشهای تفصیلی

می‌توان خواص مزونهای فرضی مبادله‌شونده را استنباط کرد. از سوی دیگر، متخصصان فیزیك ذرات قادرند که گونه‌های بسیار متنوعی از مزونها را در برخوردهای پرانرژیی که درشتابدهنده‌های بزرگ اتفاق می‌افتند مورد آزمایش قراردهند. درمیان خرده‌پاشهای همین برخوردهاست که ایـن فیزیکدانها انـواع مختلفی از ذرات جدیـد را تشخیص می‌دهند و فهرست خواص آنها را تهیه می‌کنند. متخصصان فیزیك هسته‌ای آنگاه با توجه به این فهرستها، مزونهایی را کـه ممکن است در پیدایش خصوصیات مختلف برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون سهم داشته باشند مشخص می‌کنند. چشم‌اندازی که دراینجا به‌طورساده تصویر شده است، برارتباط تنگاتنگ تاریخی میان فیزیك هسته‌ای وفیزیك ذرات بنیادی تأکید می‌کند.

مراجع مطالعات تکمیلی

بحث مشابهی از برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون را می‌توان در مراجع زیر یافت:

H. Enge, *Introduction to Nuclear Physics* (Reading : Addison-Wesley, 1966), Chap. 2&3,

R. D. Evans, *The Atomic Nucleus* (New York : McGraw-Hill, 1955), Chap. 10,

E. Segre, *Nuclei and Particles* (Reading, MA : Benjamin, 1977), Chap. 10.

تك‌نگاریهایی که به برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون اختصاص یافته‌اند عبارت‌اند از

H. A. Bethe and P. Morrison, *Elementary Nuclear Theory* (New York : Wiley, 1956),

M. J. Moravcsik, *The Two Nucleon Interaction* (Oxford : Clarendon, 1963),

R. Wilson, *The Nucleon-Nucleon Interaction* (New York: Wiley, 1963).

مروری از کارهای اولیه در مـورد پراکندگی نوکلئون ـ نوکلئون را می‌توان در مرجع زیر خواند

R. K. Adair, *Rev. Mod. Phys.* 22, 249 (1950),

برای مروری بـر تحلیل اطلاعات پراکندگی و تعیین اختلاف فازها و پارامترهای دیگر رجوع کنید به

M. H. MacGregor, M. J. Moravcsik, and H. P. Stapp, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* 10, 291 (1960),

H. P. Noyes, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* 22, 465 (1972),

M. H. MacGregor, *Phys. Today.* 22, 21 (Dec. 1969).

مسائل

۱. حداقل انرژی فوتون لازم برای تجزیهٔ ^{2}H چقدر است؟ انرژی بستگی این هسته را برابر ۲٫۲۲۴۵۸۹ MeV بگیرید.

۲. (الف) با استفاده ازشرایط پیوستگی و بهنجارش، ضرایب A و C را درتابع‌موجهای دوترون، معادلات (۳.۴) و (۴.۴)، به‌دست آورید.
(ب) بااستفاده ازتابع‌موج حاصل، ریشهٔ میانگین مربعی شعاع دوترون را تعیین کنید.

۳. شرط وجود حالت مقید را در پتانسیل چاه‌مربعی به‌ترتیب زیر می‌توان تعیین کرد:
(الف) با استفاده از تابع‌موج بهنجار شدهٔ کامل، یعنی معادلات (۳.۴) و (۴.۴)، نشان دهیدکه مقدار انتظاری انرژی پتانسیل عبارت است از

$$\langle V\rangle=\int\psi^{*}V\psi\,dv=-V_{0}A^{2}\left[\frac{1}{2}R-\frac{1}{4k_{1}}\sin 2k_{1}R\right]$$

(ب) نشان دهیدکه مقدار انتظاری انرژی جنبشی عبارت است از

$$\langle T\rangle=\frac{\hbar^{2}}{2m}\int_{0}^{\infty}\left|\frac{\partial\psi}{\partial r}\right|^{2}dv$$

$$=\frac{\hbar^{2}}{2m}A^{2}\left[\frac{1}{2}k_{1}^{2}R+\frac{1}{4}k_{1}\sin 2k_{1}R+\frac{k_{2}}{2}\sin^{2}k_{1}R\right]$$

(ج) نشان دهیدکه شرط‌لازم برای وجود حالت مقید به‌صورت $\langle T\rangle<-\langle V\rangle$ است.
(د) سرانجام، نشان دهید که فقط در صورتی حالت مقید خواهیم داشت که $V_{0}\geqslant\pi^{2}\hbar^{2}/8mR^{2}$ شود، و حداقل عمق پتانسیل را برای حالت مقید دوترون تعیین کنید.

گوشزد: این‌محاسبه فقط برای مسائل‌سه‌بعدی معتبراست. درمورد چاه‌مربعی یك‌بعدی (در واقع، درتمام موارد پتانسیلهای یك‌بعدی جاذبه‌که نسبتاً خوشرفتار باشند) همواره دستکم یك حالت مقید وجود دارد. فقط در مورد مسائل سه‌بعدی است‌که برای وجود حالت‌مقید به‌یك حداقل عمق نیازمندیم.[1]

۴. نوترون و پروتون موجود در دوترون، چه کسری از عمرشان را در خارج از برد نیروی هسته‌ای می‌گذرانند؟

۵. با استفاده ازمعادلهٔ (۵.۴)، نمایش تغییرات V_{0} را برحسب R درفاصلهٔ $R=1.0$ تا $R=3.0$ fm رسم‌کنید. چگونگی بستگی V_{0} به R را مورد بحث قرار دهید.

۶. (الف) نشان دهیدکه معادلهٔ (۵.۴) را می‌توان به‌صورت غیرجبری $x=-\tan bx$ نوشت، که درآن $x=\sqrt{-(V_{0}+E)/E}$ است. مقدار پارامتر b را به‌ازای

1. C. A. Kocher, *Am. J. Phys.* 45, 71 (1977).

$R = ۲\,\mathrm{fm}$ تعیین کنید. توجه داشته باشید که درمعادلهٔ (۲.۴)، m همان جرم کاهیدهٔ $m_p m_n/(m_p+m_n)$ است که تقریباً برابر $m_p/۲$ می‌شود.
(ب) این معادلهٔ غیرجبری را به‌دو روش حل کنید: روش ترسیمی و روش دوره‌ای با استفاده از ماشین حساب برنامه‌پذیر یاکامپیوتر.[۱]

۷. تابع‌موج دوترون را به صورت معادلهٔ (۹.۴) در نظر بگیرید و بگویید که چرا در عبارت مربوط به گشتاور چارقطبی الکتریکی، یعنی معادلهٔ (۱۱.۴)، یك جملهٔ متناسب با حاصلضرب $a_s a_d$ وجود دارد، در حالی که در عبارت مربوط به گشتاور دوقطبی مغناطیسی یعنی معادلهٔ (۱۰.۴) چنین جمله‌ای نیست.

۸. انرژی برهم‌کنش دوقطبی ـ دوقطبی مغناطیسی را در دوترون تعیین کنید، و آن را با انرژی بستگی هسته مقایسه کنید. حالاتی راکه درآنها اسپین نوکلئونها به‌موازات خط واصل بین نوکلئونها و عمود برآنهاست، به‌طور جداگانه در نظر بگیرید.

۹. سطح مقطع پراکندگی از «کرهٔ سخت» را با پتانسیل زیر به‌دست آورید

$$V(r) = \infty \qquad (r < R) : \text{درون کره}$$

$$= ۰ \qquad (r > R) : \text{بیرون کره}$$

۱۰. فرض کنید که انرژی بستگی دوترون خیلی ضعیفتر از مقدار واقعی آن، مثلا درحدود $۱۰\,\mathrm{keV}$، باشد. دراین صورت، سطح‌مقطع موج s نوترون ـ پروتون چقدرمی‌شود؟

۱۱. نشان دهید که حالت تك‌تایهٔ نوترون ـ پروتون نامقید است، و انرژی این حالت را به‌دست آورید.

۱۲. امروزه پادپروتون ($\bar{p}$) و پادنوترون ($\bar{n}$) را درتعدادی‌ازشتابدهنده‌های دنیا می‌توان تولیدکرد. خواص سیستمهای زیررا درمقایسه با سیستمهای مطرح شده در این فصل موردبحث قراردهید: (الف)حالت مقید $\bar{n}\bar{p}$، (ب)حالت مقید $n\bar{p}$، (ج) پراکندگی موج s در $\bar{n}p$، (د) پراکندگی $\bar{p}p$.

۱۳. معادلهٔ شرودینگر را با پتانسیلی که در معادلهٔ (۵۰.۴) برای پراکندگی موج s نوترون ـ پروتون داده شده است، حل کنید. عبارتی به‌دست آورید که رابطهٔ اختلاف فازموج s را با شعاع مغزدافعه نشان دهد، و مقدار شعاع مغز R_c را که باعث منفی شدن اختلاف فاز در شکل ۱۲.۴ می‌شود، پیدا کنید.

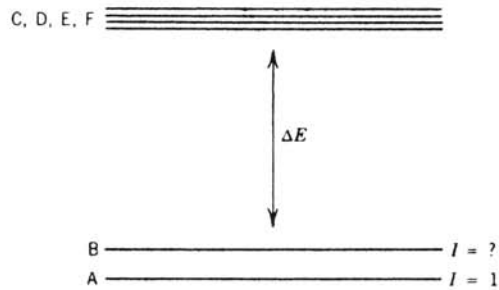
۱۴. در یکی از اندازه‌گیریهای سطح‌مقطع دیفرانسیلی pp، در انرژی آزمایشگاهی $۴٫۲\,\mathrm{MeV}$ و زاویهٔ‌پراکندگی آزمایشگاهی $۳۰°$، نتیجهٔ $d\sigma/d\Omega = ۰٫۱۱۱\,\mathrm{b/Sr}$ را به‌دست آورده‌ایم. اختلاف فاز موج s دراین مورد چقدر است؟

۱۵. فرض کنید که نیروی نوکلئون ـ نوکلئون قویتر، و حالتهای مقید دوترون به‌شرح زیر

---

۱. برای مروری برروشهای دوره‌ای حل این‌گونه معادلات رجوع کنید به
K. S. Krane, *Am. J. Phys.* **50**, 521 (1982).

باشد: حالت A همان حالت «شناخته‌شدهٔ» پایه است که خواص آن را در این فصل بررسی کردیم. حالت B خیلی به حالت A نزدیك است. بالاتراز حالتهای A و B و درفاصلهٔ زیاد ΔE ازآنها چهارحالت C، D، E، و F وجود دارند، وهیچ حالت دیگری در نزدیکی آنها نیست.



(الف) محتملترین مقدار تکانهٔ زاویه‌ای مداری نسبی نوکلئونها در حالت B چقدر است؟ سمتگیری نسبی اسپین ذاتی نوکلئونها درحالت B چیست، ومقدار منتجه تکانهٔ زاویه‌ای کل I درحالت B چقدر است؟

(ب) نوکلئونها درحالتهای C،D،E،وF، تکانهٔ زاویه‌ای مداری نسبی یکسان دارند (که باحالت A متفاوت است). حدسی قابل‌قبول ازاین مقدارتکانهٔ زاویه‌ای مداری ارائه کنید، و دلیل توجیهی خودتان را در این مورد شرح دهید.

(ج) با بررسی جفت‌شدگیهای ممکن بین تکانهٔ زاویه‌ای مداری و اسپین ذاتی این‌دو نوکلئون، نشان دهید که در چندتایهٔ برانگیخته باید فقط چهار حالت وجود داشته باشد. مقادیر چهارگانهٔ تکانهٔ زاویه‌ای کل I و پاریتهٔ آنها را تعیین کنید.

(د) به‌فرض آنکه فاصلهٔ انرژی ΔE عمدتاً از قسمت «مرکزگرای» پتانسیل حاصل شده باشد، مقدار ΔE را براوردکنید. سعی کنید انتخاب پارامترهایی که برای این براورد به‌کار می‌برید، قابل توجیه باشد.

۱۶. در آزمایشی که در آن نوترونهای کم‌انرژی (موج s) توسط پروتونها پراکنده می‌شوند، می‌خواهیم توزیع پروتونهای «پس‌زده» را اندازه‌گیری و تحلیل کنیم. زاویهٔ پراکندگی نوترون را در دستگاه مختصات آزمایشگاه θ می‌گیریم، و انرژی جنبشی نوترون فرودی را با T_n نشان می‌دهیم. (الف) نشان دهیدکه زاویهٔ خروج پروتونها نسبت به جهت نوترونهای فرودی برابر $\phi = ۹۰^\circ - \theta$ است. (ب) نشان دهید که در این فرایند $T'_n = T_n \cos^۲\theta$ و $T'_p = T_n \sin^۲\theta$ می‌شود. در اینجا مقصود از T' انرژی جنبشی پس از پراکندگی است. (ج) نشان دهید که رابطهٔ سطح‌مقطعها در دو دستگاه آزمایشگاه و مرکز جرم به‌صورت

$$(d\sigma/d\Omega)_{\text{lab}} = (۴\cos\theta)(d\sigma/d\Omega)_{\text{cm}}$$

است. (د) به‌فرض آنکه در دستگاه مرکز جرم پراکندگی مستقل ازجهت باشد، نشان دهید که در دستگاه آزمایشگاه داریم $d\sigma/dT'_{\mathrm{p}}=\sigma/T_{\mathrm{n}}$ که در آن σ سطح‌مقطع کل است. نتیجهٔ اخیر نشان می‌دهد که تعداد پروتونهایی که با انرژی معین T'_{p} $(0\leqslant T'_{\mathrm{p}}\leqslant T_{\mathrm{n}})$ پس‌زده می‌شوند مستقل از مقدار انرژی T'_{p} است. (ه) توزیع زاویه‌ای پروتونهای پس‌زده را در دستگاه آزمایشگاه پیدا کنید.

۵

مدلهای هسته‌ای

اکنون در شرایطی هستیم که میل داریم ملاحظات فصل قبلی را به هسته‌های سنگین نیز گسترش دهیم. متأسفانه، هنگامی که به این عمل مبادرت می‌ورزیم، به چند مشکل بنیادی برخورد می‌کنیم. یکی از مشکلات این است که از لحاظ ریاضی در حل مسئلهٔ چندجسمی باکار دشواری روبه‌رو هستیم. اگر در این مورد هم برای پتانسیل هسته‌ای شکل فوق‌العاده ساده‌ای مانند پتانسیل چاه‌مربعی یا پتانسیل نوسانگر ساده در نظر بگیریم، در اساس برای توصیف برهم‌کنش متقابل A نوکلئون می‌توانیم یك دستگاه معادلات مرتبط به دست آوریم. این دستگاه معادلات را نمی‌توان به طور تحلیلی حل کرد، بلکه با استفاده از روشهای عددی باید به‌حل آن پرداخت. مشکل دوم مسئله، به‌ماهیت نیروی هسته‌ای مربوط می‌شود. شواهد موجود نشان می‌دهد که برهم‌کنش نوکلئونها نه‌تنها از طریق نیروهای متقابل دوجسمی، بلکه از طریق نیروهای سه‌جسمی نیزصورت می‌گیرد. یعنی نیروی وارد برنوکلئون ۱ نه‌فقط به‌مواضع هر یك از نوکلئونهای ۲ و ۳ بستگی دارد، بلکه شامل یك جملهٔ اضافی است که از همبستگی بین مواضع نوکلئونهای ۲ و ۳ ناشی می‌شود. برای این نوع نیرو، در فیزیك کلاسیك نیروی مشابهی سراغ نداریم.

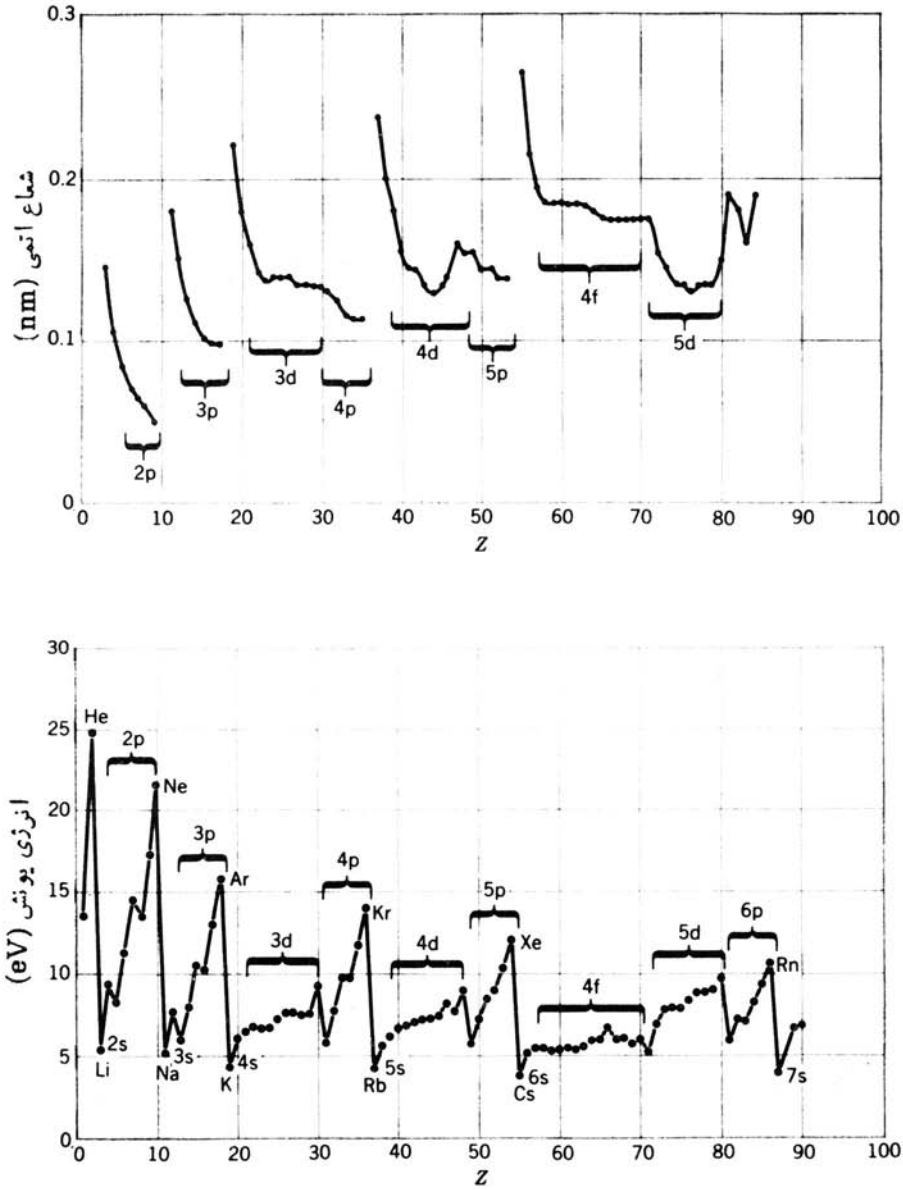
در اصل، برای به‌دست آوردن بعضی از پارامترهای مشخصهٔ نیروهای سه‌جسمی (همان طور که در بررسیهای دوجسمی در فصل ۴ دیدیم) می‌توانیم پراکندگی سیستم سه‌جسمی را به‌طور تجربی موردبررسی قراردهیم. اما خیلی زود معلوم می‌شود که این‌گونه رهیافت میکروسکوپیك، به‌جای آنکه مبانی فیزیك هسته‌ها را برای ما روشنتر کند، آن را

مبهمتر می‌کند. این عمل تاحدودی مثل آن است که با مطالعهٔ برهم‌کنشهای اتمهای موجود در یك حجم گازی و حل معادلات دینامیکی توصیف کنندهٔ نیروهای بین اتمی، بخواهیم خواص گاز را به‌طور میکروسکوپیك شرح دهیم. بیشتر شناخت ما از خواص گازها، از چند پارامترعمومی نظیرفشار و دما حاصل می‌شود نه از بررسی تفصیلی ومیکروسکوپیك اتمهای موجود درآن.

بنـا براین، برای بررسی هسته‌ها رهیافت زیررا در پیش می‌گیریم. در اینجا عمداً یك نظریهٔ فوق‌العاده ساده راکه ازلحاظ ریاضی بدون مشکل وازلحاظ فیزیکی غنی‌باشد، انتخاب می‌کنیم. اگـر این نظریـه در توصیف دستکم چند خـاصیت هسته‌ای نسبتاً موفق باشد، آنگاه بـا افزودن جمله‌های اضافی آن را تکمیل می‌کنیم. بدین ترتیب، یك مدل هسته‌ای می‌سازیم، یعنی چشم‌انداز ساده‌ای از ساختار هسته‌ای درنظر می‌گیریم که متضمن خصوصیات اصلی فیزیك هسته‌هاست. معیار موفقیت هر مدلی را باید در دو نکته دانست: (۱) مـدل باید بتواند خواص هسته‌ای تاکنون اندازه‌گیری شده را به طور قابل قبولی توضیح دهد، و همچنین (۲) مدل باید خواص دیگری را پیش‌بینی کندکه در آزمایشهای جدیدی قابل اندازه‌گیری باشند. این شیوهٔ مدل‌سازی فرایندهای پیچیده، در بسیاری از عرصه‌های علمی رایج است. مدل‌سازی زیست ـ شیمیدانها در مـورد فرایندهای پیچیدهٔ تکثیر ژنها، ومدل‌سازی متخصصان هواشناسی درمورد دینامیك پیچیدهٔ جریانهای جوی که باعث تغییر آب و هوا می‌شود، نیز از همین قبیل است.

۱۰۵ مدل پوسته‌ای

نظریهٔ اتمی با استفاده از مدل پوسته‌ای توانسته است به‌طور کاملا روشن جزئیات پیچیدهٔ ساختار اتمها را توضیح‌دهد. به‌همین دلیل متخصصان فیزیك هسته‌ای، به‌امیدآنکه بتوانند به توصیف روشنی از خواص هسته‌ها دست یابند، سعی کردند در بررسی ساختار هسته‌ای از نظریهٔ مشابهی استفاده کنند. در مدل پوسته‌ای اتمها، پوسته‌ها را بـا الکترونهایی که انرژی‌شان به‌ترتیب افزایش می‌یابد پر می‌کنیم، واین آرایش الکترونی به‌گونه‌ای است که اصل طرد پاؤلی درآن رعایت می‌شود. بدین‌ترتیب، هراتمی متشکل‌است از یك ناحیهٔ مرکزی خنثی که پوسته‌های پردارد، و چند الکترون ظرفیت که در پوسته‌ای خارج از این ناحیهٔ مرکزی قرار می‌گیرند. در این مدل، فرض براین است که عمدتاً همین الکترونهای ظرفیت هستند که خواص اتمها را تعیین می‌کنند. هنگامی که پیش‌بینیهای این مدل را با بعضی از خواص اندازه‌گیری شدهٔ سیستمهای اتمی مقایسه می‌کنیم، آنها را بخوبی باهم سازگارمی‌یابیم. بویژه مشاهده می‌کنیم که تغییرات خواص اتمی در محدودهٔ هرزیرپوسته تدریجی و کم است، درحالی که وقتی ازیك زیرپوسته به زیرپوستهٔ دیگرمی‌رویم تغییرات خواص ناگهانی و زیاد است. اثرات تغییر زیرپوسته را بـرشعاع یونها و انرژی یونش عناصر، در شکل ۱۰۵ نشان داده‌ایم.



شکل ۱۰۵ تغییرات شعاع اتمی (در شکل بالا) و انرژی یونش عناصر (درشکل پایین) نشان داده شده است. تغییرات کم با پرشدن تدریجی پوستهٔ اتمی متناظراست، در حالی که تغییرات زیاد به‌گذار از یك پوسته به‌پوستهٔ دیگرمربوط می‌شود.

هنگامی که سعی می‌کنیم تا این مدل را به‌قلمرو هسته‌ای هم گسترش دهیم، از همان آغازکار باچند مانع روبه‌رو می‌شویم. درمورد اتمها، پتانسیل حاکم را میدان کولنی هسته تأمین می‌کند، یعنی یك عامل خارجی زیرپوسته‌ها یا «مدارها» را سازمان می‌دهد. در این حالت، معادلهٔ شرودینگر را باهمین پتانسیل می‌توان حل کرد، و انرژی زیرپوسته‌هایی راکه الکترونها باید در آنها قرار گیرند محاسبه کرد. امـا در مورد هسته هیچ عامل خارجیی وجود ندارد، و نوکلئونها در پتانسیلی که خودشان به‌وجود می‌آورند در حرکت‌اند.

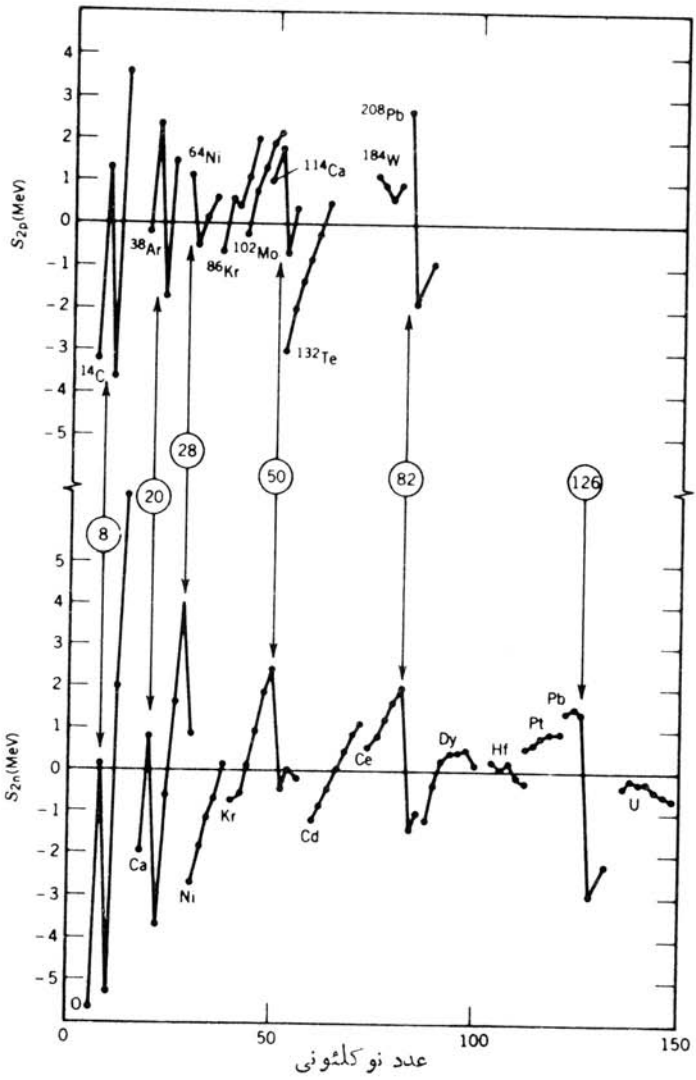
یکی دیگر از جنبه‌های جالب توجه نظریهٔ پوسته‌ای اتمها وجـود مدارهای فضایی است. خواص اتمها را اغلب برحسب مدارهـای فضایی الکترونهـا توصیف مـی‌کنیم. الکترونها می‌توانند نسبتاً آزادانه در این مدارها حرکت کنند، بدون اینکه برخوردی با الکترونهای دیگرداشته‌باشند. قطر نوکلئونها درمقایسه با اندازهٔ هسته نسبتاً بزرگ است. در حالی که هرنوکلئون منفرد در خلال حرکتش در هرمدار می‌تواند برخوردهای متعددی با نوکلئونهای دیگرداشته باشد، چگونه می‌توان نوکلئونها را در مدارهای کاملا مشخص در حرکت تصور کرد؟

درآغاز، شواهد تجربی وجود پوسته‌های هسته‌ای را ازنظر می‌گذرانیم. در شکل ۲.۵، مقادیراندازه‌گیری شدهٔ انرژی جدایی پروتون و نوترون را به صورت انحراف از مقادیرپیش‌بینی‌شده توسط فرمول نیمه‌تجربی جرم [معادلهٔ (۲۸.۳)] نشان داده‌ایم. (با این شیوهٔ نمایش، اختلاف زیاد بین بستگیهای هسته‌ای برطرف می‌شود واثرات پوسته به‌طور برجسته‌تری نمایان می‌شود.) شباهت بیـن این شکل و شکل ۱.۵ چشمگیر است: انرژی جدایی، مانند انرژی یونش دراتمها، به‌استثنای موارد افت سریع درمقابل بعضی‌ازاعداد پروتونی و نوترونی یکسان، به تدریج با افزایش N یا Z افزایش می‌یابد. توجه به این نکته ما را به این حدس می‌رساندکه شاید ناپیوستگیهای تیزانرژی جدایی (همانند مورد مشابه اتمی) با پرشدن پوسته‌های اصلی ارتباط داشته باشد. شواهد دیگری از چند نوع آزمایش را در شکل ۳.۵ نشان داده‌ایم. طرز رفتار ناگهانی و ناپیوستهٔ هسته‌ها در ایـن موارد هم در مقابل همان اعداد پروتونی یا نوترونیی کـه در انرژی جدایی دیدیم اتفاق می‌افتد. این اعداد پروتونی یا نوترونی هسته‌هایی‌که Z یا N آنها برابر ۲، ۸، ۲۰، ۲۸، ۵۰، ۸۲، و۱۲۶ است ومعرف اثرات پوسته‌های اصلی پرشده هستند را «اعداد جادویی» می‌گویند. هـر نظریهٔ موفقی باید بتواند برای وجود این پوسته‌های پر با اعداد اشغالی‌که برشمرده‌ایم، توضیحی قابل قبول فراهم‌کند.

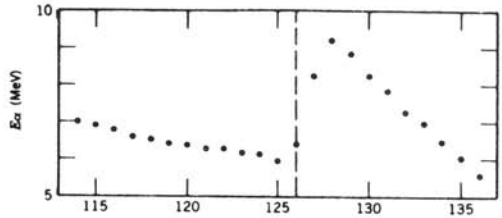
درمدل پوسته‌ای، مسئلهٔ پتانسیل‌هسته‌ای را با این فرض بنیادی حل می‌کنیم: حرکت هر نوکلئون منفرد را تحت تأثیر پتانسیل واحدی که نوکلئونهای دیگر همه در تولید آن شرکت دارند، در نظر می‌گیریم. اگر هر یك از نوکلئونها را به این نحو مورد بررسی قـرار دهیم، آنگاه برای تمامی نوکلئونهای موجود در هسته می‌توانیم ترازهای انـرژی متناظر به زیرپوسته‌ها را به‌دست آوریم.

وجود مدارهای فضایی مشخص را اصل پاؤلی تعیین می‌کند. فرض می‌کنیم که در

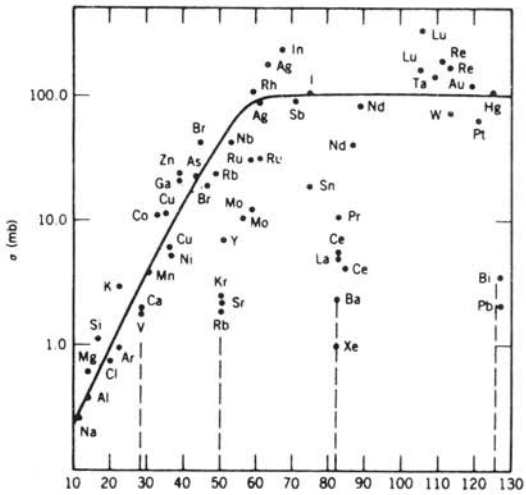
یك هستهٔ سنگین، تقریباً در ته‌چـاه پتانسیل، برخوردی بین دو نوکلئون صورت می‌گیرد و نوکلئونهـا هنگام برخورد با هم انرژی مبادله می‌کنند، اما اگر تمامی ترازهای انرژی



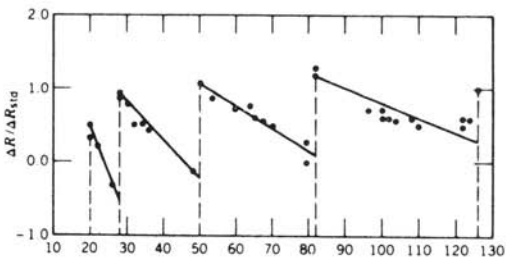
شکل ۲.۵ نمودار بالا: انرژی جدایی دوپروتونی در چند رشته از ایزوتونها (N ثابت). در هر رشته‌هسته‌ای که کمترین Z را دارد مشخص‌شده‌است. نمودار پایین: انرژی جدایی دونوترونی درچندرشته ازایزوتوپها، تغییرات ناگهانی درمقابل «اعدادجادویی» به‌وضوح قابل‌مشاهده‌اند. دراین نمودار، اختلاف بین مقادیراندازه‌گیری‌شده و مقادیر پیش‌بینی شدهٔ فرمول نیمه‌تجربی جرم نشان داده شده است.



(الف) عدد نوترونی



(ب) عدد نوترونی



(ج) عدد نوترونی

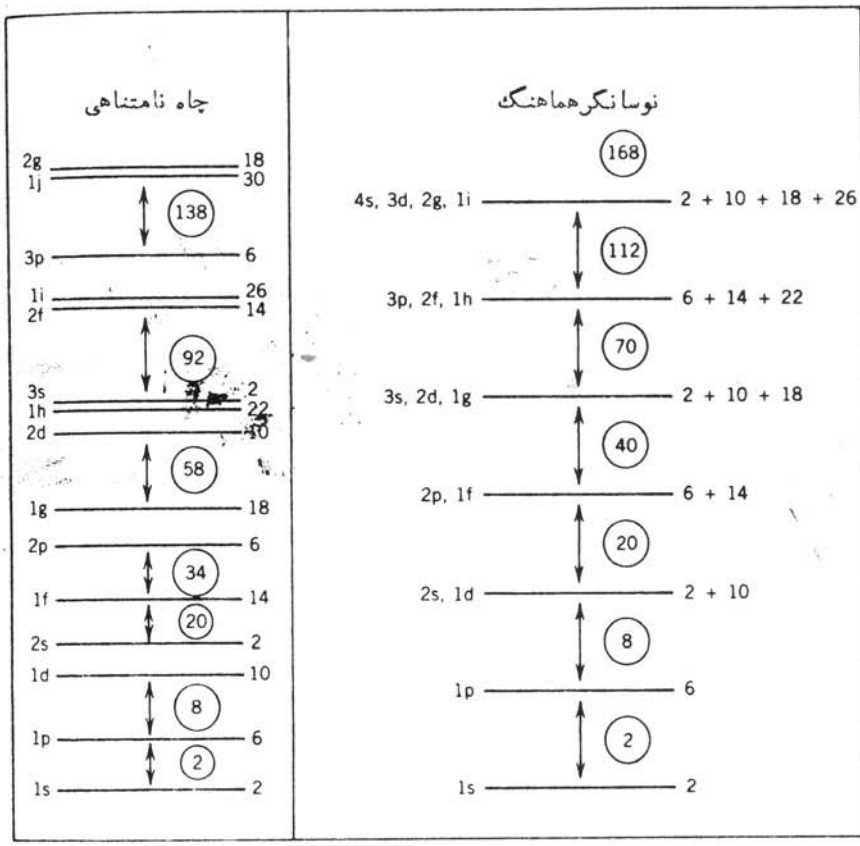
شکل ۳.۵ شواهد اضافی درتأیید ساختار پوسته‌ای هسته‌ها. (الف) انرژی ذرات آلفای گسیل شده از ایزوتوپهای مختلف Rn. بـه افزایش ناگهانی انرژی در دختر هستهٔ $N=۱۲۶$ (یـا مادرهستهٔ $N=۱۲۸$) توجه کنید. انـرژی بستگی دخترهسته هرچه بیشتر باشد، ذرهٔ آلفـا می‌تواند با انرژی زیادتری گسیل شود. (ب) سطح‌مقطع گیراندازی نوترون درهسته‌های مختلف. سطح‌مقطع در نواحی $N=۵۰, ۸۲, ۱۲۶$ تقریباً به اندازهٔ دو مرتبهٔ بزرگی کاهش می‌یابد. (ج) تغییرات شعاع بـار هسته در فواصل $\Delta N=۲$. بـه صعودهای ناگهانـی در نقاط $N=۲۰, ۲۸, ۵۰, ۸۲, ۱۲۶$ توجه کنید وآن را با شکل ۱.۵ مقایسه کنید. برای برجسته کردن اثرات پوسته‌ای، اختلاف شعاع ΔR به اختلاف شعاع استاندارد حاصل از رابطهٔ $A^{۱/۳}$ تقسیم شده است.

تا تراز نوکلئونهای ظرفیت پرشده‌باشد، هیچ راهی برای کسب انرژی نوکلئون نمی‌ماند مگر آنکه مقدار انرژی به اندازه‌ای باشد کـه نوکلئون را به تراز ظرفیت برساند. سایر ترازهای نزدیکتر به تراز اولیهٔ نوکلئون همگی پرهستند و نمی‌توانند یك نوکلئون اضافی را بپذیرند. انرژی لازم برای این انتقال که از ترازی نزدیك به تراز پایه به‌نوار ظرفیت انجام می‌شود، بیشتر از مقداری است که معمولا در برخورد بین دو نوکلئون از یکی از آنها به‌دیگری منتقل می‌شود. ازاین‌رو، چنین برخوردی بین نوکلئونها نمی‌تواند صورت گیرد، وگویی نوکلئونها درحرکت مداری‌شان با هیچ‌گونه ممانعتی ازطرف نوکلئونهای درون هسته روبه‌رو نمی‌شوند!

پتانسیل مدل پوسته‌ای

نخستین گام در ارائهٔ مدل پوسته‌ای، انتخاب پتانسیل هسته‌ای مناسب است. در آغاز دو نوع پتانسیل چاه نامتناهی و نوسانگر هماهنگ را درنظر می‌گیریم که حل معادلهٔ سه‌بعدی شرودینگر مربوط به‌آنها را در فصل ۲ دیدیم. ترازهای انرژی حاصل را در شکل ۴.۵ نشان داده‌ایم. همچنانکه در فیزیك اتمی دیدیم، واگنی هرتراز را تعداد نوکلئونهایی که می‌توانند در آن قـرار بگیرند تعیین می‌کند. بـه عبارت دیگر، واگنی هـر تراز برابر $2(2l+1)$ می‌شود که در آن عامل $(2l+1)$ از طریق واگنی m_l، و عامل ۲ از طریق واگنی m_s حاصل شده است. بـرای نامگذاری این ترازها، مثـل مورد فیزیك اتمی، از نمادهای طیف‌نمودی استفاده می‌کنیم. امـا این نمادگذاری از یك نظر بـا فیزیك اتمی تفاوت دارد. در اینجا n عدد کوانتومی اصلی نیست، بلکه صرفاً شمارهٔ تراز مربوط به l مشخص را نشان می‌دهد. بنابراین 1d به‌معنی اولین (یا پایینترین) حالت d، 2d به‌معنی دومین حالت d است وهمین‌طور... . (در نمادگذاری فیزیك‌اتمی، هیچ حالتی به‌صورت 1d یا 2d نداریم.) درشکل ۴.۵، عدد اشغال هرتراز وتعداد جمعی نوکلئونهای متناظر به‌پوسته‌های اصلی‌کامل را هم نشان داده‌ایم. (نوترونها و پروتونها، چون ذرات نایکسان هستند، به‌طورجداگانه شمرده می‌شوند. بنابراین درتراز 1s، علاوه‌بر۲نوترون، ۲پروتون هـم می‌تواند قرار گیرد.) ظهور اعـداد جادویی ۲، ۸، و ۲۰ در هـر دو نوع پتانسیل دل‌گرم کننده است، ولی در ترازهای انرژی بالاتر هیچ‌گونه ارتباطی با اعداد جادویی تجربی به‌چشم نمی‌خورد.

به‌عنوان اولین‌گام در اصلاح مدل، سعی می‌کنیم پتانسیل واقع‌بینانه‌تری را انتخاب کنیم. چاه نامتناهی، بنابردلایلی، تقریب خوبی برای پتانسیل هسته‌ای نیست: برای جـدا کردن یك نوترون یا پروتون از هسته، با صرف انرژی کافی باید بتوانیم آن را از چاه خارج کنیم. دراین‌صورت، عمق چاه نمی‌تواند بی‌نهایت باشد! بعلاوه، لبهٔ پتانسیل‌هسته‌ای نباید تیز باشد بلکه مثل توزیع بار و جرم هسته‌ای، مقدار پتانسیل بعد از شعاع میانگین R باید به آهستگی به‌سوی صفر میل کند. از طرف دیگر، پتانسیل نوسانگر هماهنگ هم

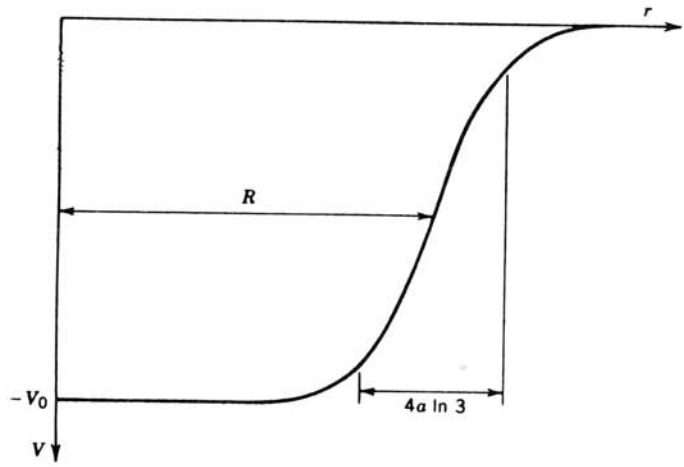


شکل ۴.۵ ساختار پوسته‌ای حاصل از پتانسیلهای چاه نامتناهی و نوسانگر هماهنگ. ظرفیت هر تراز را درسمت راست آن نشان داده‌ایم. فاصلهٔ زیاد بین ترازها را ناشی از پرشدن پوسته‌ها می‌دانیم. اعداد درون دایره‌ها نشانگر تعداد کل نوکلئونهای موجود در پوسته‌های پرهستند.

لبه‌اش به‌قدر کافی تیز نیست و انرژی جدایی آن نیز بی‌نهایت می‌شود. از این‌رو، شکل واقع‌بینانه‌تر پتانسیل را به‌صورت بینابینی

$$V(r)=\frac{-V_{\circ}}{۱+\exp[(r-R)/a]} \qquad (۱.۵)$$

انتخاب می‌کنیم که منحنی نمایش آن درشکل ۵.۵ رسم شده است. پارامترهای R و a به‌ترتیب شعاع میانگین وضخامت پوست هستند که مقادیرشان طبق اندازه‌گیریهای مذکور در فصل ۳ انتخاب می‌شود: $R=۱٫۲۵A^{۱/۳}\,\mathrm{fm}$ و $a=۰٫۵۲۴\,\mathrm{fm}$. عمق چاه $V_{\circ}$ چنان تنظیم می‌شود که برای انرژیهای جدایی که از مرتبهٔ ۵۰ MeV است، مقادیرمناسبی



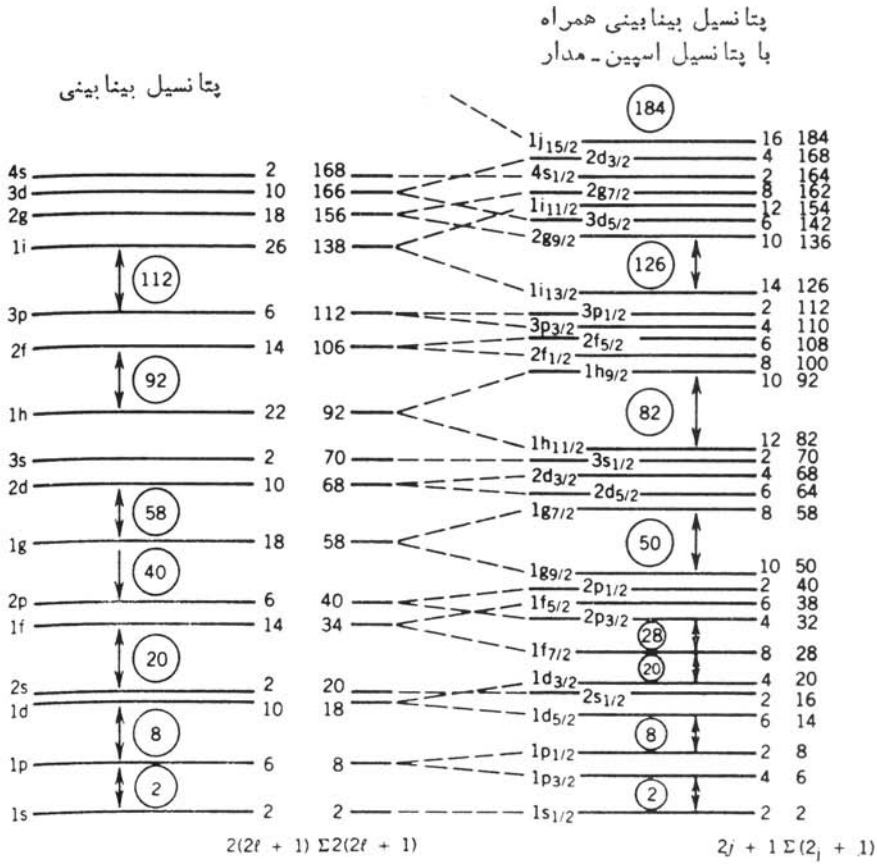
شکل۵.۵ شکل واقع‌بینانهٔ پتانسیل درمدل‌پوسته‌ای. «ضخامت پوست» $4a \ln 3$ برابرفاصله‌ای است که درطی آن پتانسیل از $0.9V_0$ به $0.1V_0$ کاهش می‌یابد.

به‌دست آید. ترازهای انرژی حاصل را درشکل ۶.۵ نشان داده‌ایم. نتیجهٔ پتانسیل جدید، درمقایسه با نوسانگر هماهنگ (شکل ۴.۵)، این است که واگنی l را در پوسته‌های اصلی بر طرف می‌کند. هرچه به طرف انرژیهای بالاتر پیش می‌رویم، فاصلهٔ ایجادشده در این مورد بیشتروبیشترمی‌شود، به‌طوری‌که سرانجام این فاصله بافاصلهٔ بین ترازهای نوسانگر هماهنگ قابل مقایسه خواهد شد. وقتی پوسته‌های حاصل را به ترتیب با $2(2l+1)$ نوکلئون پر می‌کنیم، بازهم اعداد جادویی ۲، ۸، و ۲۰ را به‌دست می‌آوریم، ولی اعداد جادویی بالاتر را نمی‌توان با این محاسبات پیدا کرد.

پتانسیل اسپین ـ مدار

این پتانسیل را چگونه می‌توانیم اصلاح کنیم تاهمهٔ اعداد جادویی را ازآن به‌دست‌آوریم؟ چون نمی‌خواهیم محتوای فیزیکی مدل را از بین ببریم، مسلماً نمی‌توانیم تغییر زیادی در پتانسیل واردکنیم. دلایل توجیهی معادلهٔ (۱.۵) را به عنوان یك حدس خوب پتانسیل هسته‌ای قبلا ارائه کردیم. بنابراین، برای بهبود محاسبات لازم است که جمله‌های مختلفی به معادلهٔ (۱.۵) افزوده شود. در دههٔ ۱۹۴۰ تلاشهای نافرجام زیادی برای یافتن این جملهٔ تصحیحی صورت گرفت و سرانجام مایر، هاکسل، سوئس، و جنسن در سال ۱۹۴۹ موفق شدند که با افزودن یك پتانسیل اسپین ـ مدار فاصله‌های مناسبی بین زیرپوسته‌ها به‌دست آورند.

دراینجا، باردیگر به‌فیزیك اتمی روی می‌آوریم و یکی دیگرازمفاهیم آن را به‌کار می‌گیریم. برهم کنش اسپین ـ مدار در فیزیك اتمی که مولد ساختار ریز مشاهده‌شده در



شکل ۶.۵ در نمـودار چپ، ترازهای انرژی حاصل از پتانسیل شکل ۵.۵ را نشان داده‌ایم. درسمت‌راست هرتراز، ظرفیت نوکلئونی تراز وتعدادکل نوکلئونهای منتهی به‌آن‌تراز مشخص شده است. نمودار سمت راست، تأثیر برهم‌کنش اسپین ـ مدار را به صورت شکافتگی ترازهای $l > 0$ و تبدیل آنها به دو تراز جدید نشان می‌دهد. اثر پوسته‌ای کاملا نمایان شده است، و اعداد جادویی دقیقاً بازتولید شده‌اند.

خطوط طیفی است، از برهم‌کنش الکترومغناطیسی بین‌گشتاور مغناطیسی الکترون ومیدان مغناطیسی ناشی از حرکت الکترون به دور هسته حاصل می‌شود. اثر این برهم‌کنش نوعاً خیلی کوچك و شاید از مرتبهٔ یك قسمت از 10^5 قسمت فاصلهٔ بین ترازهای اتمی است. هیچ برهم‌کنش الکترومغناطیسیی از این نوع نخواهد توانست تغییرات محسوسی را در فواصل تراز هسته‌ای ایجاد و اعداد جادویی تجربی را بازتولید کند. با وجود این، در اینجا مفهوم نیروی اسپین ـ مدار هسته‌ای را به‌همان صورت نیروی اسپین ـ مدار اتمـی، ولی نه از نوع الکترومغناطیسی آن، درنظر مـی گیریم. در واقع، با توجه به آزمایشهای

پراکندگی درفصل ۴، شواهدی قوی در دست داریم که حاکی از وجود نیروی اسپین ـ مدار در برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون است.

برهم‌کنش اسپین ـ مدار را به‌صورت $V_{so}(r)\mathbf{l}\cdot\mathbf{s}$ درنظر می‌گیریم، ولی شکل $V_{so}(r)$ خیلی مهم نیست. این عامل $\mathbf{l}\cdot\mathbf{s}$ است که باعث تجدید سازمان ترازها می‌شود. همچنانکه در فیزیك اتمی دیدیم، حالتها را در حضور برهم‌کنش اسپین ـ مدار باید با تکانهٔ زاویه‌ای کل $\mathbf{j}=\mathbf{l}+\mathbf{s}$ نشانه‌گذاری کنیم. عدد کوانتومی اسپین هر نوکلئون برابر $s=1/2$ است، پس مقادیر ممکن برای عدد کوانتومی تکانهٔ زاویه‌ای کل عبارت‌اند از $j=l+1/2$ و $j=l-1/2$ (البته به استثنای مورد $l=0$ که در آن فقط مقدار $j=1/2$ مجاز است). مقدار انتظاری $\mathbf{l}\cdot\mathbf{s}$ را با استفاده از یك شگرد متداول می‌توان محاسبه کرد. نخست، مقدار $\mathbf{j}^2=(\mathbf{l}+\mathbf{s})^2$ را به‌دست می‌آوریم

$$\mathbf{j}^2=\mathbf{l}^2+2\mathbf{l}\cdot\mathbf{s}+\mathbf{s}^2$$
$$\mathbf{l}\cdot\mathbf{s}=\frac{1}{2}(\mathbf{j}^2-\mathbf{l}^2-\mathbf{s}^2) \qquad (2.5)$$

با قرار دادن مقادیر انتظاری در این معادله، حاصل می‌شود

$$\langle\mathbf{l}\cdot\mathbf{s}\rangle=\frac{1}{2}[j(j+1)-l(l+1)-s(s+1)]\hbar^2 \qquad (3.5)$$

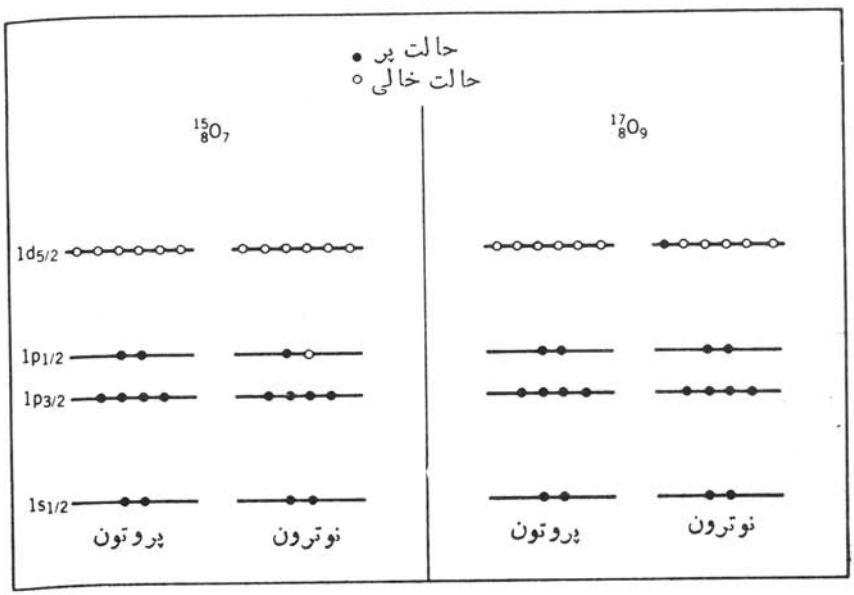
اکنون تراز $1f$ $(l=3)$ راکه دارای واگنی $2(2l+1)=14$ است درنظر می‌گیریم. مقادیر ممکن برای j در این تراز عبارت‌اند از $l\pm 1/2=5/2, 7/2$. بنابراین، ترازهای مورد نظر به صورت $1f_{5/2}$ و $1f_{7/2}$ خواهند بود. واگنی هر تراز برابر $(2j+1)$ است که از مقادیر m_j حاصل می‌شود. (در حضور برهم‌کنش اسپین ـ مدار، m_s و m_l دیگر اعداد کوانتومی «خوب» به حساب نمی‌آیند و نمی‌توان آنها را برای نمایاندن حالتها یا شمردن واگنیها به‌کاربرد.) در این صورت، ظرفیت نوکلئونی تراز $1f_{5/2}$ برابر ۶ وظرفیت $1f_{7/2}$ برابر ۸ می‌شود که از جمع آنها مجدداً تعداد ۱۴ حالت به دست می‌آید (تعداد حالتهای ممکن باید حفظ شود، فقط نحوهٔ دسته‌بندی آنها را تغییر داده‌ایم). فاصلهٔ انرژی بین حالتهای $1f_{5/2}$ و $1f_{7/2}$، که زوج اسپین ـ مدار یا دوتایه نامیده می‌شوند، متناسب بامقدار $\langle\mathbf{l}\cdot\mathbf{s}\rangle$ است. در واقع می‌توان اختلاف انرژی هرزوج حالتی را که در آن $l>0$ باشد، به‌کمك معادلهٔ (۳.۵) محاسبه کرد

$$\langle\mathbf{l}\cdot\mathbf{s}\rangle_{j=l+1/2}-\langle\mathbf{l}\cdot\mathbf{s}\rangle_{j=l-1/2}=\frac{1}{2}(2l+1)\hbar^2 \qquad (4.5)$$

شکافتگی (یافاصلهٔ) انرژی بین حالتها با افزایش l افزایش می‌یابد. حال اگراثر $V_{so}(r)$ را به‌صورت منفی درنظر بگیریم، عضوی از زوج که مقدار j درآن بزرگتراست درسطح

پایینتر قرار خواهد گرفت. اثر این شکافتگی را در نمودار شکل ۶.۵ نشان داده‌ایم. در اینجا، تراز $1f_{7/2}$ در فاصلهٔ (یا گاف) بین پوسته‌های دوم و سوم قرار می‌گیرد. ظرفیت این تراز برابر ۸ نوکلئون است، و بدین‌سان عدد جادویی ۲۸ از آرایش جدید حاصل خواهد شد. (شکافتگیهای p و d به‌اندازه‌ای نیستند که تغییرات مهمی در دسته‌بندی ترازها به‌وجود آورند.) اثر مهم بعدی ناشی از جملهٔ تصحیحی اسپین-مدار را در تراز $1g$ می‌بینیم. حالت $1g_{9/2}$ آن‌قدر به پایین رانده می‌شود که در پوستهٔ اصلی پایینتر قرار می‌گیرد، و وقتی ظرفیت ۱۰ نوکلئونی آن به‌پوستهٔ ۴۰ نوکلئونی قبلی افزوده می‌شود، عدد جادویی ۵۰ به دست می‌آید. این اثر روی پوسته‌های اصلی دیگر نیز تکرار می‌شود. در هر یك از این‌موارد، عضو کم‌انرژی‌تر زوج اسپین-مدار از پوستهٔ بعدی به‌پوستهٔ قبلی تنزل می‌کند، و بدین ترتیب باقیماندهٔ اعداد جادویی هم طبق انتظار به دست می‌آید. (حتی یك عدد جادویی جدید، ۱۸۴، هم پیش‌بینی می‌شود که هنوز در عمل مشاهده نشده است.)

برای بررسی نمونه‌ای از کاربرد مدل پوسته‌ای، نحوهٔ پرشدن ترازهای انرژی را در تشکیل هسته‌های $^{15}_{8}O$ و $^{17}_{8}O$ درنظر می‌گیریم. در هر دو مورد، تعداد ۸ پروتون در یك پوستهٔ اصلی قرار می‌گیرد و نقشی در ساختار هسته‌ای ندارد. پرشدن ترازهای انرژی در نمودار شکل ۷.۵ نشان داده شده است. مدل پوسته‌ای در نهایت به این نتیجه می‌رسد که فقط نوکلئون تزویج‌نشده در تعیین خواص هسته دخالت دارد. نوترون تزویج‌نشده در هستهٔ ^{15}O در تراز $p_{1/2}$ قرار دارد. بنابراین، حالت پایهٔ ^{15}O را باید با اسپین ۱/۲



شکل ۷.۵ پرشدن پوسته‌ها در ^{15}O و ^{17}O. ترازهای کامل پروتونی در ساختار هسته دخالتی ندارد. خواص حالت پایه را عمدتاً نوترون منفرد تعیین می‌کند.

و پاریتهٔ فرد پیش‌بینی کنیم، زیرا پاریته از $(-1)^l$ به دست می‌آید. حالت پایهٔ ^{17}O را با مشخصات یك نوترون منفرد در تراز $d_{5/2}$، یعنی اسپین ۵/۲ و پاریتهٔ زوج، تعیین می‌کنیم. این دو پیش‌بینی دقیقاً با آنچه در عمل برای اسپین و پاریته مشاهده می‌شود، سازگاری دارند. در واقع، در گستره‌ای که مدل پوسته‌ای برای هسته‌های A فرد اعتبار دارد (به دلایلی که بعداً در همین فصل خواهیم دید، عموماً برای هسته‌هایی که در آنها $A<۱۵۰$ و $۱۹۰<A<۲۲۰$ است)، با چنین سازگاریهایی بین پیش‌بینی مدل و مشاهدات تجربی روبه‌رو می‌شویم. این موفقیت در پیش‌بینی اسپین و پاریتهٔ حالت پایهٔ هسته‌ها را باید پیروزی بزرگی برای مدل پوسته‌ای به‌شمار آورد.

گشتاور دوقطبی مغناطیسی

یکی دیگرازموارد سازگاری قابل‌قبول (ولی نه‌چندان دقیق) بین خواص هسته‌ای مشاهده شده و پیش‌بینی مدل پوسته‌ای، مورد گشتار دوقطبی مغناطیسی است. چنانکه در فصل ۳ دیدیم، گشتاور مغناطیسی را ازطریق مقدار انتظاری عملگر گشتاورمغناطیسی در حالتی که تصویر z تکانهٔ زاویه‌ای حداکثر مقدارش را دارد، محاسبه می‌کنیم. بنابراین، با درنظر گرفتن هر دو جملهٔ l و s باید مقدار زیررا در حالی‌که $j_z=j\hbar$ است، به‌دست آوریم

$$\mu=\mu_N\frac{g_l l_z+g_s s_z}{\hbar} \qquad (۵.۵)$$

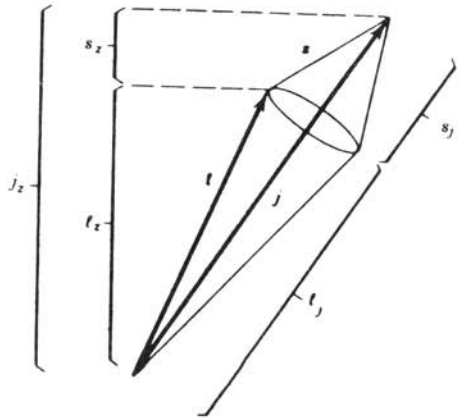
این مقدار را به‌طور مستقیم نمی‌توان تعیین‌کرد. زیرا، وقتی در سیستمی که در آن j دقیقاً تعریف شده‌است کار می‌کنیم، مقادیر l_z و s_z دقیقاً مشخص نیستند. این عبارت را با استفاده از $\mathbf{j}=\mathbf{l}+\mathbf{s}$ می‌توان به‌صورت زیرنوشت

$$\mu=\frac{[g_l j_z+(g_s-g_l)s_z]\mu_N}{\hbar} \qquad (۶.۵)$$

و چنانچه مقدار انتظاری آن را در حالت $j_z=j\hbar$ درنظر بگیریم، خواهیم داشت

$$\langle\mu\rangle=\left[\frac{g_l j+(g_s-g_l)\langle s_z\rangle}{\hbar}\right]\mu_N \qquad (۷.۵)$$

مقدار انتظاری $\langle s_z\rangle$ را با یادآوری این نکته که $\mathbf{j}$ تنها بردار مورد توجه در این مسئله است (بردارهای $\mathbf{l}$ و $\mathbf{s}$ تنها در ارتباطشان با $\mathbf{j}$ درنظر گرفته می‌شوند)، به‌آسانی می‌توان محاسبه‌کرد. وقتی‌که به‌طورمشخص $\langle s_z\rangle$ رامحاسبه می‌کنیم، همچنانکه ازنمودار برداری شکل ۸.۵ استنباط می‌شود، تنها قسمتی‌که باقی می‌ماند همان مؤلفهٔ $\mathbf{s}$ در امتداد $\mathbf{j}$ است. مقدار لحظه‌ای s_z تغییر می‌کند، اما مؤلفهٔ آن در امتداد $\mathbf{j}$ ثابت می‌ماند. بنابراین، برای بردار $\mathbf{s}_j$ که مؤلفهٔ $\mathbf{s}$ درامتداد $\mathbf{j}$ است، باید بتوانیم عبارتی به دست آوریم. بردار یکهٔ



شکل ۸.۵ همان‌طور که بردار تکانهٔ زاویه‌ای کل $\mathbf{j}$ با ثابت ماندن j_z با حرکت تقدیمی به‌دور محور z درگردش است، بردارهای $\mathbf{l}$ و $\mathbf{s}$ هم حول j درگردش‌اند. مؤلفه‌های $\mathbf{l}$ و $\mathbf{s}$ در امتداد $\mathbf{j}$ ثابت می‌مانند، ولی l_z و s_z تغییر می‌کنند.

امتداد $\mathbf{j}$ برابر $\mathbf{j}/|\mathbf{j}|$، و مؤلفهٔ $\mathbf{s}$ در امتداد $\mathbf{j}$ برابر $|\mathbf{s}\cdot\mathbf{j}|/|\mathbf{j}|$ است. بنابراین، بردار $\mathbf{s}_j$ برابر $\mathbf{j}|\mathbf{s}\cdot\mathbf{j}|/|\mathbf{j}|^2$ می‌شود که با قرار دادن مقادیر انتظاری خواهیم داشت

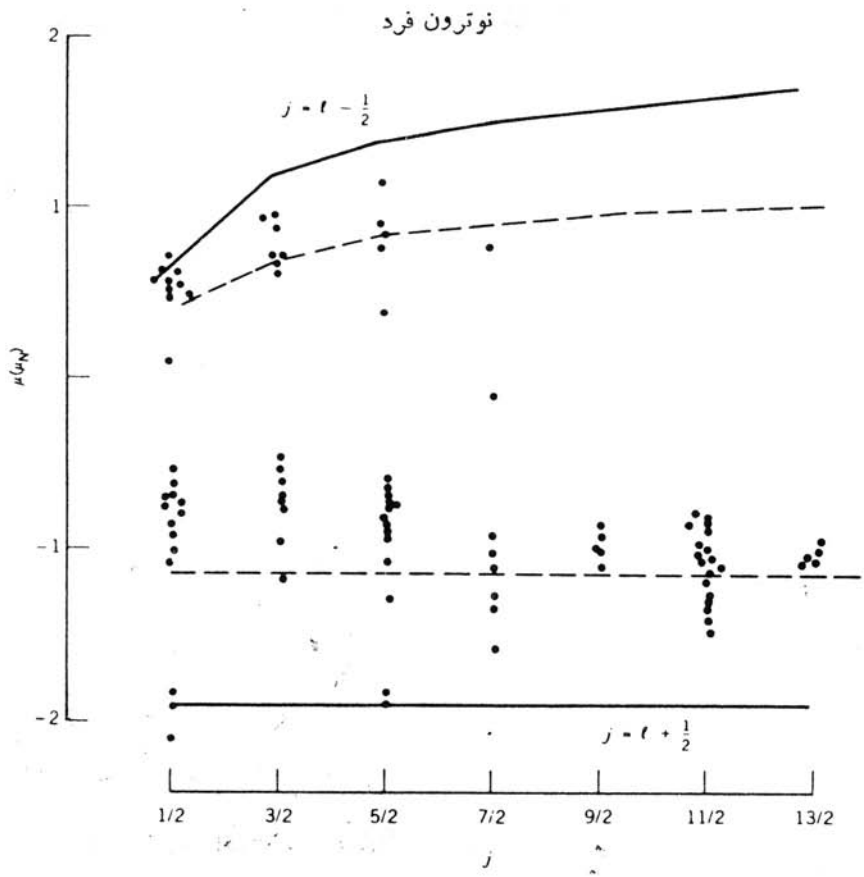
$$\langle s_z\rangle=\frac{j}{2j(j+1)}[j(j+1)-l(l+1)+s(s+1)]\hbar \qquad (۸.۵)$$

که در آن $\mathbf{s}\cdot\mathbf{j}=\mathbf{s}\cdot(\mathbf{l}+\mathbf{s})$ به کمک معادلهٔ (۳.۵) محاسبه می‌شود. پس برای $j=l+1/2$ داریم $\langle s_z\rangle=\hbar/2$، و برای $j=l-1/2$ داریم $\langle s_z\rangle=-\hbar j/2(j+1)$. گشتاورهای مغناطیسی متناظر به این مقادیر عبارت‌اند از

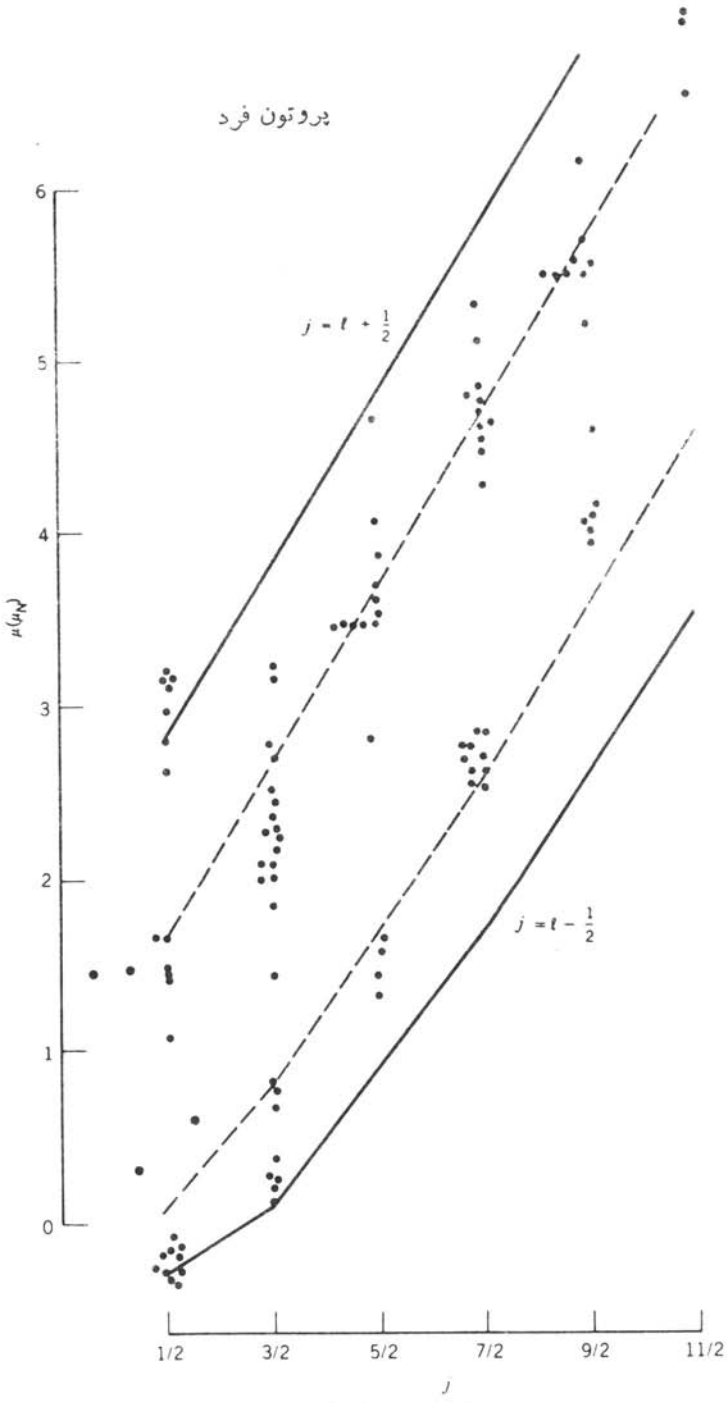
$$\begin{aligned} j=l+\frac{1}{2} \qquad & \langle\mu\rangle=\left[g_l\left(j-\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{2}g_s\right]\mu_N \\ j=l-\frac{1}{2} \qquad & \langle\mu\rangle=\left[g_l\frac{j(j+3/2)}{(j+1)}-\frac{1}{2}\frac{1}{j+1}g_s\right]\mu_N \end{aligned} \qquad (۹.۵)$$

نتایج اندازه‌گیری‌شدهٔ گشتاورهای مغناطیسی را با مقادیر حاصل از محاسبات مبتنی بر مدل پوسته‌ای برای هسته‌های A فرد در شکل ۹.۵ مقایسه کرده‌ایم. مقادیر محاسبه‌شده به‌صورت خطوط پر که خطوط اشمیت نامیده می‌شوند نموده شده‌اند. این محاسبه را نخستین بار اشمیت درسال ۱۹۳۷ انجام داد. مقادیر تجربی که در محدودهٔ خطوط اشمیت قراردارند، بزرگی‌شان عموماً کوچکتر و پراکندگی‌شان خیلی زیاد است. یکی از نقصهای این نظریه، قبول این فرض است که عامل g_s نوکلئون موجود در هسته را با g_s نوکلئون آزاد برابر می‌گیرد. در فصل ۳ اختلاف قابل توجه بین عامل اسپینی g مربوط به نوکلئونها و مقدار انتظاری ۲ را برای ذرهٔ «بنیادی» با اسپین ۱/۲ شرح دادیم. اگر این اختلاف قابل توجه را ناشی از «ابر مزونی» اطراف نوکلئون بدانیم، جای هیچ تعجبی نیست که ابر مزونی

درون هسته که در آن مزونها و نوکلئونهای دیگر هم حضور دارند، با ابرمزونی نوکلئون آزاد تفاوت داشته‌باشد. معمولا این اثررا با کاهش (تقریباً اختیاری) عامل g_s درمحاسبه وارد می‌کنند کـه برای نمونه خطوط متناظر به (آزاد) $g_s = ۰٫۶g_s$ را در شکل ۹.۵ نشان داده‌ایم. دراین صورت، سازگاری کلی بین مقادیرتجربی و نظری بهتر می‌شود، ولی پراکندگی نقاط حاکی از آن است که محاسبهٔ گشتاورمغناطیسی دراین مدل بیش از حد ساده درنظر گرفته شده‌است. با وجود این، موفقیت محاسبه درنشان دادن روندکلی مقادیر تجربی گشتاورهای مغناطیسی، دال برآن است که مدل پوسته‌ای می‌تواند دستکم درکی تقریبی از ساختار این‌گونه هسته‌ها به‌دست بدهد.



شکل ۹.۵ مقادیرتجربی گشتاورمغناطیسی هسته‌های نوترون فرد و پروتون فرد مدل پوسته‌ای. خطوط اشمیت را برای (آزاد) $g_s = g_s$ به صورت خطوط پر، و برای (آزاد) $g_s = ۰٫۶g_s$ به‌صورت خط‌چین نشان داده‌ایم.


پروتون فرد
$j = l + \frac{1}{2}$
$j = l - \frac{1}{2}$
$\mu(\mu_N)$
0
1
2
3
4
5
6
1/2
3/2
5/2
7/2
9/2
11/2
j

شکل ۹.۵ (ادامه).

گشتاور چارقطبی الکتریکی

گشتاور چارقطبی الکتریکی درمدل پوسته‌ای به‌کمك عملگر چارقطبی الکتریکی $3z^2-r^2$، درحالتی که تصویر تکانهٔ زاویه‌ای کل ذرهٔ فرد درامتداد محور z بیشینه (یعنی $m_j=+j$) است، محاسبه می‌شود. در اینجا فرض می‌کنیم کـه ذرهٔ فرد یك پروتون است. اگر تکانهٔ زاویه‌ای این ذره (تاحدی که درمکانیك کوانتومی مجازاست) درامتداد محور z قرار گیرد، مـدار درون آن باید عمدتاً در صفحهٔ xy قرار داشته باشد. همچنانکه در بحث پس از معادلـهٔ (۳۶.۳) گفتیم، در این صورت گشتاور چارقطبی منفی و از مرتبهٔ $Q\approx-\langle r^2\rangle$ خواهد بود. بعضی از مقادیر تجربی گشتاورچارقطبی هسته‌هایی که یك پروتون بعد از یك زیرپوستهٔ کامل دارند، در جدول ۱.۵ نشان داده شده است. مقـدار $\langle r^2\rangle$ درگسترهٔ بیـن ۰٫۰۳ b تا ۰٫۳ b، بنـه ترتیب بـرای هسته‌های $A=7$ تا $A=209$، تغییر می‌کند. از این‌رو، سازگاری بین مقادیر تجربی وانتظاری را باید خوب بدانیم.

محاسبهٔ دقیقتر کوانتوم مکانیکی، گشتاورچارقطبی تك‌ذره‌ای یك پروتون فرد را در حالت j مدل پوسته‌ای چنین به‌دست می‌دهد

$$\langle Q_{sp}\rangle=-\frac{2j-1}{2(j+1)}\langle r^2\rangle \qquad (10.5)$$

برای یك کرهٔ باردار یکنواخت داریم $\langle r^2\rangle=(3/5)R^2=(3/5)R_0^2A^{2/3}$. با استفاده از این نتایج می‌توان گشتاور چارقطبی هسته‌های موجود در جدول ۱.۵ را محاسبه کرد. علامت مقادیر محاسبه‌شده به‌درستی به‌دست می‌آید، ولی اندازهٔ آنها به‌میزان ۲ تا ۳ برابر کوچکتر است.

درمورد هسته‌هایی که یك نوترون فرد دارند، دردسر بزرگتری داریم. نوترون بدون بار درخارج ازیك زیرپوستهٔ کامل نباید مولد گشتاورچارقطبی باشد. با توجه به‌جدول ۱.۵ معلوم می‌شود که مقادیر مربوط به نوترون فرد عموماً از مقادیر مربوط بـه پروتون فرد کوچکترند، ولی مسلم است که این مقادیر برابر صفر نیستند.

هنگامی که یك زیرپوسته بیش از یك ذرهٔ منفرد داشته باشد، تمام ذرات موجود در زیرپوسته می‌توانند در تولید گشتاور چارقطبی شرکت کنند. چون ظرفیت هر زیرپوسته برابر $(2j+1)$ است، تعداد نوکلئونهای موجود در زیرپوستهٔ پرنشده از ۱ تا $2j$ نوکلئون تغییر می‌کند. گشتاور چارقطبی دراین حالت عبارت است از

$$\langle Q\rangle=\langle Q_{sp}\rangle\left[1-2\,\frac{n-1}{2j-1}\right] \qquad (11.5)$$

کـه درآن n تعداد نوکلئونهای موجـود در زیرپوسته $(1\leqslant n\leqslant 2j)$ و Q_{sp} گشتاور چارقطبی ذرهٔ منفرد است که از معادلهٔ (۱۰.۵) به دست می‌آید. هنگامی که $n=1$ باشد داریم $Q=Q_{sp}$، ولی وقتی که $n=2j$ باشد (یعنی زیرپوسته‌ای که ازحالت کاملا پرفقط یك نوکلئون کمتردارد) داریم $Q=-Q_{sp}$. درجدول ۱.۵ گشتاورهای چارقطبی مربوط

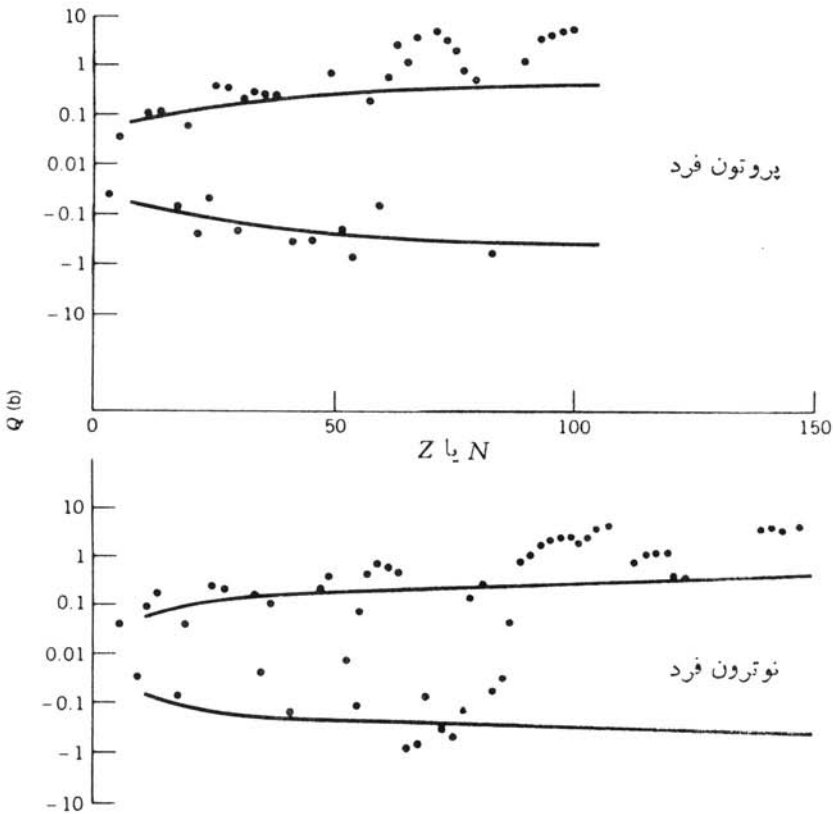
جدول ۱۰۵ گشتاورهای چارقطبی مدل پوسته‌ای.

حالت مدل پوسته‌ای	مقدارمحاسبه شدهٔ Q (پروتون منفرد)	مقدار اندازه‌گیری شدهٔ Q			
		ذرهٔ منفرد		حفرهٔ منفرد	
		p	n	p	n
$1p_{3/2}$	−۰٫۰۱۳	−۰٫۰۳۶۶(^{7}Li)		+۰٫۰۴۰۷(^{11}B)	+۰٫۰۵۳(^{9}Be)
$1d_{5/2}$	−۰٫۰۳۶	−۰٫۱۲(^{19}F)	−۰٫۰۲۶(^{17}O)	+۰٫۱۴۰(^{27}Al)	+۰٫۲۰۱(^{25}Mg)
$1d_{3/2}$	−۰٫۰۳۷	−۰٫۰۸۲۴۹(^{35}Cl)	−۰٫۰۶۴(^{33}S)	+۰٫۰۵۶(^{39}K)	+۰٫۴۵(^{35}S)
$1f_{7/2}$	−۰٫۰۷۱	−۰٫۲۶(^{43}Sc)	−۰٫۰۸۰(^{41}Ca)	+۰٫۴۰(^{59}Co)	+۰٫۲۴(^{49}Ti)
$2p_{3/2}$	−۰٫۰۵۵	−۰٫۲۰۹(^{63}Cu)	−۰٫۰۲۸۵(^{53}Cr)	+۰٫۱۹۵(^{67}Ga)	+۰٫۲۰(^{57}Fe)
$1f_{5/2}$	−۰٫۰۸۶		−۰٫۲۰(^{61}Ni)	+۰٫۲۷۴(^{85}Rb)	+۰٫۱۵(^{67}Zn)
$1g_{9/2}$	−۰٫۱۳	−۰٫۳۲(^{93}Nb)	−۰٫۱۷(^{73}Ge)	+۰٫۸۶(^{115}In)	+۰٫۴۵(^{85}Kr)
$1g_{7/2}$	−۰٫۱۴	−۰٫۴۹(^{123}Sb)		+۰٫۲۰(^{139}La)	
$2d_{5/2}$	−۰٫۱۲	−۰٫۳۶(^{121}Sb)	−۰٫۲۳۶(^{91}Zr)		+۰٫۴۴(^{111}Cd)

عدم‌قطعیت مقادیر این جدول نوعاً درحدود چند قسمت از آخرین رقم بامعنایی است که در اینجا ذکر شده است.

بـه این حالتهـای موسوم بـه «حفره» را هـم نشان داده‌ایم، و چنـانکه می‌بینیم رابطهٔ $Q(\text{حفره}) = -Q(\text{ذره})$ با تقریب خوبی برقرار است. بویژه باید به‌این نکته در جدول توجه داشت کـه گشتاور چارقطبی حالتهای حفـره مثبت است، یعنـی علامت آن نسبت به‌گشتاور چارقطبی حالتهای ذره‌ای تغییر کرده است.

پیش از آنکه هیجان ناشی از موفقیت این مدل ساده بر ما غلبه کند، رفتار و نظم عمومی گشتاورهای دوقطبی را به‌طور دسته‌جمعی درنظر می‌گیریم. مقادیر اندازه‌گیری‌شدهٔ گشتاورچارقطبی حالت پایه، برای هسته‌هایی که عدد جرمی فرد دارند، به‌طور خلاصه در شکل ۱۰.۵ نشان داده شده است. شواهدی از تغییر علامت Q کـه در معادلهٔ (۱۱.۵)



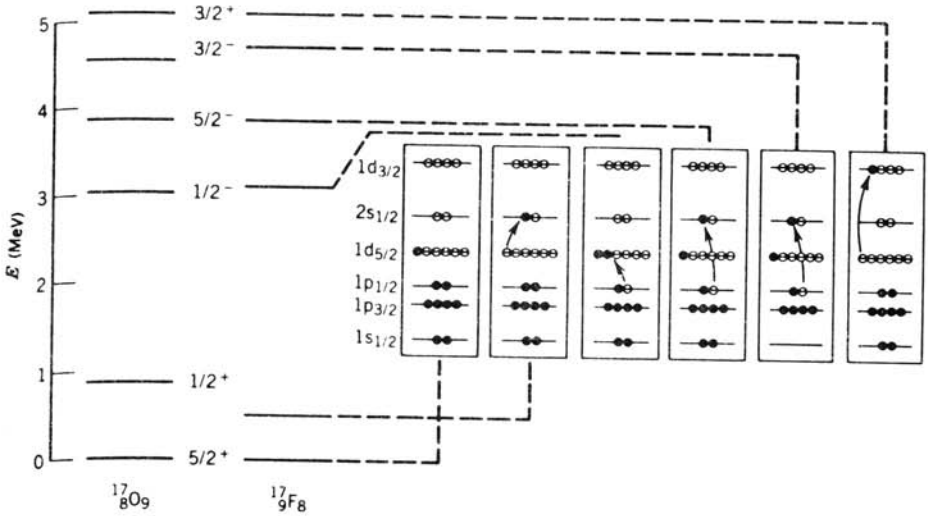
شکل ۱۰.۵ مقادیر تجربی گشتاور چارقطبی الکتریکی برای هسته‌هایی کـه پروتون فرد و نوترون فرد دارند. خطوط پر حدود انتظاری $Q \sim \langle r^2 \rangle$ را برای هسته‌های مـدل پوسته‌ای نشان می‌دهند. بجـز در نواحی $60 < Z < 80$، $Z > 90$، $90 < N < 120$، و $N > 140$ کـه مقادیر تجربی یك مرتبه از مقادیر پیش‌بینی شده در مدل پوسته‌ای بزرگترند، اطلاعات تجربی در محدودهٔ مدل قرار دارند.

پیش بینی شده‌است، دراین شکل دیده می‌شود. اما دراین مورد با نظمی سراسری روبه‌رو نیستیم، زیرا تعـداد مقادیر گشتاور چارقطبی مثبت خیلی بیشتر از گشتاورهای منفی است. نکتهٔ ناخوشایندتراینکه، این مدل از پیش‌بینی گشتاورهای چارقطبی بسیار بزرگ چندین بارنی که در مورد بعضی از هسته‌های سنگین دیده شده است، ناتوان است. با توضیح این نارساییها، به جنبه‌های دیگری از ساختار هسته‌ای رهبری می‌شویم که در چارچوب مدل پوسته‌ای توجیه‌پذیر نیستند. این ویژگیهای جدید را در دوبخش آخر این فصل موردبحث قرار می‌دهیم.

نوکلئونهای ظرفیت

مدل پوسته‌ای، بـا وجود سادگی‌اش، در توضیح اسپین و پاریتهٔ حالت پایهٔ تقریباً تمـام هسته‌های A فرد موفق است و برای گشتاورهای دوقطبی مغناطیسی و چارقطبی الکتریکی آنها نیز توضیحی نسبتاً موفق (و رضایت‌بخش) به دست می‌دهد. کاربرد خاصی از مـدل پوسته‌ای راکه دراینجا درنظر گرفتیم، مدل ذرهٔ خیلی مستقل می‌گویند. فرضیهٔ‌اساسی مدل ذرهٔ خیلی مستقل این است که به استثنای یکی از نوکلئونها، بقیهٔ نوکلئونهای موجود در هسته تزویج شده‌اند و خـواص هسته از حرکت همین نوکلئون تزویج نشدهٔ منفـرد ناشی می‌شود. روشن است که چنین برخوردی مسئله را بیش از حد ساده می‌کند، و بهتر است کـه در تقـریب بعدی تمـام ذرات موجود در زیـرپوستهٔ پـرنشده را در نظر بگیریم. برای نمونه، در مورد هسته‌ای مانند $^{۴۳}_{۲۰}Ca_{۲۳}$ که بعد از پوستهٔ کامل $N=۲۰$ دارای سه نوترون است، نوع خیلی مستقل مـدل پوسته‌ای فقط بیست و سومین نوترون را در نظـر می‌گیرد، درحالی‌که در محاسبهٔ کاملترمدل پوسته‌ای باید هرسه نوترون ظرفیت را درنظر گرفت. برای هستهٔ $^{۴۵}_{۲۲}Ti_{۲۳}$ باید هر پنج ذرهٔ (۲ پروتون، ۳ نوترون) بالاتراز پوسته‌های $Z=۲۰$ و $N=۲۰$ را درنظر بگیریم.

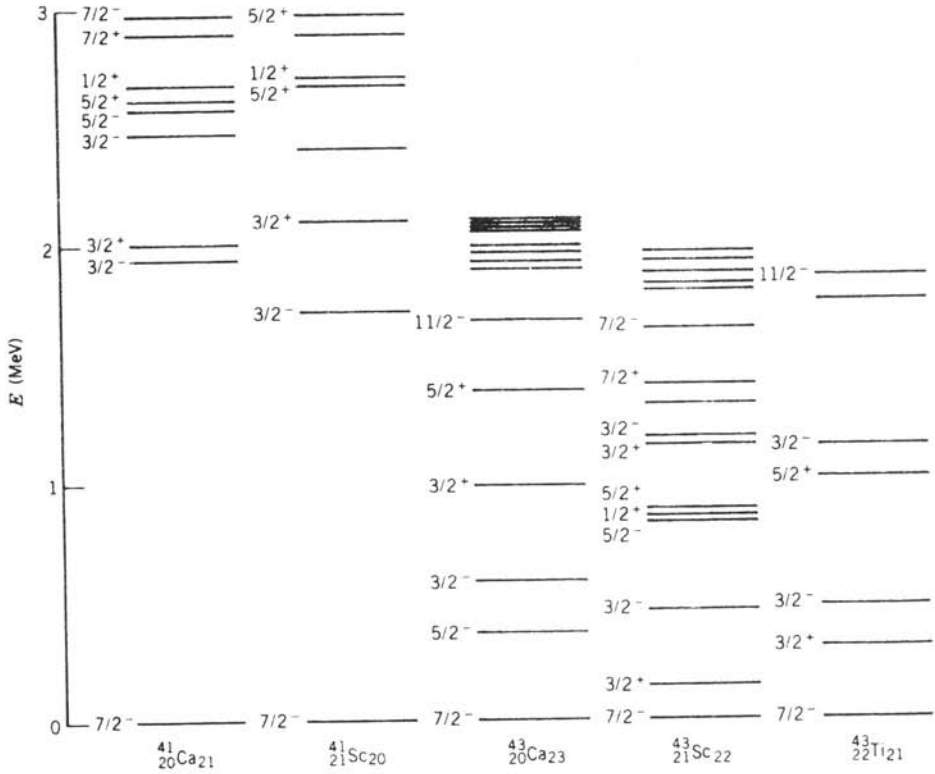
اگر مدل ذرهٔ خیلی مستقل معتبر بود، باید می‌توانستیم با بررسی حالت برانگیختهٔ هسته‌ها نمودار ترازهای انرژی شکل ۶.۵ را بازتولیدکنیم. دراینجا نمونه‌هایی را مورد بررسی قرارمی‌دهیم. برخی ازحالتهای برانگیختهٔ هسته‌های $^{۱۷}_{۸}O_{۹}$ و $^{۱۷}_{۹}F_{۸}$ راکه هرکدام از آنهـا پس از بخش مرکزی دوجادویی ($N=۸$ و $Z=۸$) فقط شامل یك نوکلئون هستند، درشکل۱۱.۵ نشان داده‌ایم. حالت پایه، همچنانکه از حالت $d_{۵/۲}$ نهمین نوکلئون مدل پوسته‌ای انتظار می‌رود، به صورت $^{+}(۵/۲)$ است. بـا توجه به شکل ۶.۵ انتظار خواهیم داشت کـه متناظر با ترازهای $۱s_{۱/۲}$ و $۱d_{۳/۲}$ در مدل پوسته‌ای، بـا حالتهای برانگیخته‌ای بـا اسپین-پاریتهٔ $^{+}(۱/۲)$ و $^{+}(۳/۲)$ روبه‌رو شویم. طبق ایـن فرضیه، وقتی که به هسته انرژی می‌دهیم، بخش مرکزی هسته هیچ تغییری نمی‌کند ولی نوکلئون فرد باجذب انرژی به‌یکی ازترازهای بالاترمدل پوسته‌ای خواهد رفت. حالت $^{+}(۱/۲)$ کـه مورد انتظار مدل پوسته‌ای است، به عنوان اولین حالت برانگیخته ظاهر می‌شود، و حالت $^{+}(۳/۲)$ هم در فاصلهٔ زیادی بالاتر از آن قرار می‌گیرد. اما حالتهای $^{-}(۱/۲)$،



شکل ۱۱.۵ ترازهای ^{17}O و ^{17}F از دیدگاه مدل پوسته‌ای. تمام ترازهای پایینتر از حدود ۵ MeV نشان داده شده‌اند. شباهت بین ترازهای این دو هسته حاکی‌ازساختار یکسانی‌است که نوکلئونهای ظرفیت به وجود می‌آورند. حالتهای پاریته ـ زوج را به آسانی می‌توان با برانگیختگی تنها نوکلئون فرد از حالت پایهٔ $d_{5/2}$ به حالت $2s_{1/2}$ یا $1d_{3/2}$ توضیح داد. حالتهای پاریته ـ فرد ساختار پیچیده‌تری دارند. یکی از پیکربندیهای ممکن نشان داده شده است، ولی پیکربندیهای دیگر نیز حائز اهمیت‌اند.

$^-(3/2)$، و $^-(5/2)$ را چگونه می‌توان به‌حساب آورد؟ (حالتهای پاریته ـ منفی $2p_{1/2}$، $2p_{3/2}$، و $1f_{5/2}$ درمدل پوسته‌ای خیلی بالاتر ازحالت $1d_{3/2}$ قرار می‌گیرند که دراین صورت، حالت اخیر باید پایینترظاهرشود.) درشکل۱۱.۵ یکی ازتوضیحات ممکن برای حالت $^-(1/2)$ نشان داده شده‌است: به‌جای‌آنکه نوکلئون فرد به‌حالت برانگیختهٔ بالاتر برود، زوج نوکلئون موجود در تراز $1p_{1/2}$ می‌شکند و یکی از نوکلئونهای آن در اثر برانگیزش به‌تراز $d_{5/2}$ می‌رود وبا نوکلئون موجود درآنجا زوج جدیدی تشکیل‌می‌دهد. دراین‌صورت، نوکلئون فرد درحالت $1p_{1/2}$ خواهدبودکه به‌حالت برانگیختهٔ $^-(1/2)$ منجر می‌شود. (چون انرژی تزویج با افزایش l افزایش می‌یابد، در واقع از نقطه‌نظر انرژی بهتر است که زوج $l=1$ شکسته و زوج $l=2$ تشکیل شود.) تأیید این فرضیه مستلزم آن است که به‌کمك آزمایش مشخص شود که خواص حالت $^-(1/2)$ با خواص مورد انتظار حالت $p_{1/2}$ در مدل پوسته‌ای سازگاری دارد. برای حالت $^-(3/2)$ نیز می‌توان از فرضیه‌ای مشابه استفاده کرد (با شکستن زوج $p_{3/2}$)، ولی حالت $^-(5/2)$ و بسیاری از حالتهای برانگیختهٔ دیگر بدون توضیح می‌ماند.

در شکل ۱۲.۵ وضعیت مشابهی را برای هسته‌های پوستهٔ $1f_{7/2}$ نشان داده‌ایم.



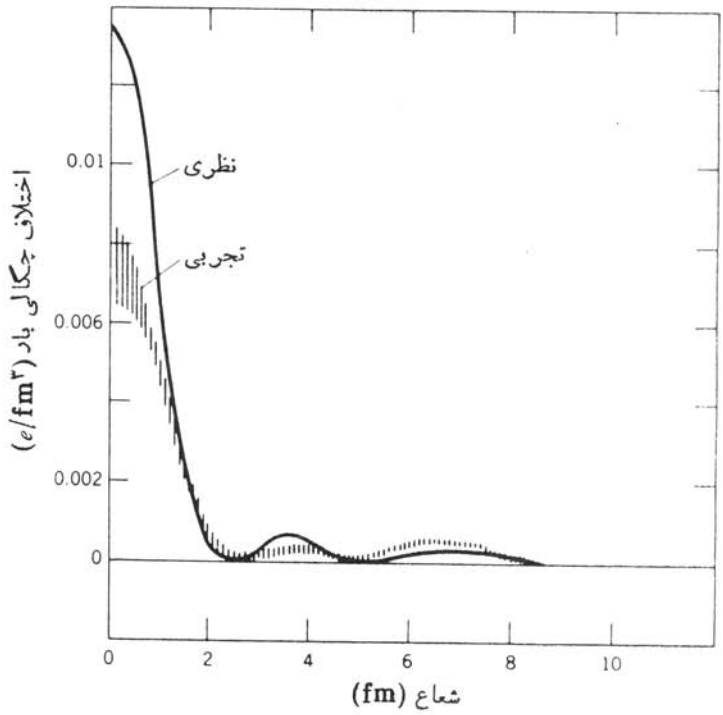
شکل ۱۲.۵ ترازهای انرژی چندهسته که تعداد ذرات موجود در پوستهٔ $1f_{7/2}$ در آنها فرد است.

حالت پایهٔ $(7/2)^-$ مربوط به $(1f_{7/2})$ وحالت برانگیختهٔ $(3/2)^-$ مربوط به $(2p_{3/2})$، طبق انتظار در هسته‌های ^{41}Ca و ^{41}Sc که هر یك درخارج از بخش مرکزی دوجادویی ($N = 20$، $Z = 20$) فقط یك نوکلئون منفرد دارند، ظاهرمی‌شود. چنانکه دیده می‌شود، ساختار ^{43}Ca کاملا با ^{41}Ca تفاوت دارد. در مورد ^{43}Ca تعداد حالتهای کم-انرژی خیلی زیاد است. این حالتها درنتیجهٔ جفت‌شدگی سه ذره درپوستهٔ $1f_{7/2}$ حاصل‌می‌شوند واختلاف بین مدل پوسته‌ای کامل و مدل پوسته‌ای ذرهٔ خیلی مستقل را نشان می‌دهند. اگر فقط ذرهٔ فرد درساختار هسته اهمیت داشته‌باشد، ترازهای ^{43}Ca باید با ترازهای ^{41}Ca مشابه باشد. تأثیر قابل توجه نوترونهای بیست و یکم و بیست و دوم در ^{43}Sc، کـه در مدل حدی ذرهٔ خیلی مستقل از آنها صرفنظرمی‌شود، بخوبی درنمودار تراز انرژی مشخص شده است. نمودار تراز انرژی ^{43}Ti هم تأثیرمشابه پروتونهای بیست و یکم و بیست و دوم را برترازهای مدل پوسته‌ای نوترون بیست و یکم نشان می‌دهد.

مدل پوسته‌ای نه‌تنها برای تعیین خواص اسپین-پاریته، گشتاور دوقطبی مغناطیسی، گشتاور چارقطبی الکتریکی، وحالت برانگیختهٔ هسته‌ها، بلکه برای محاسبهٔ احتمال گذار

هسته‌ای از یك حالت به حالت دیگر در اثر واپاشی رادیواکتیو یا واکنش هسته‌ای نیز به‌کار برده می‌شود. پیش‌بینی مـدل پوسته‌ای را در مورد این فرایندها در فصلهای بعـدی خواهیم دید.

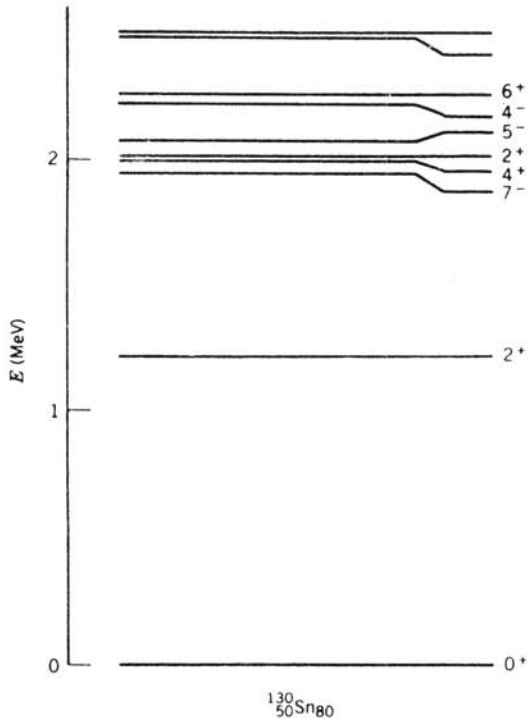
بحث مدل پوسته‌ای را دراینجا با اشاره به‌پرسشی که درآغاز مطرح کردیم به‌پایان می‌رسانیم. چگونه می‌توانیم مطمئن باشیم کـه فرض اولیهٔ ما، مبنی بر وجود نوکلئون با خواص مـداری مشخص در اعماق هسته، معتبر می‌ماند؟ حقیقت این است که بسیاری از آزمونهایی که درمورد مدل پوسته‌ای انجام‌می‌شوند، به‌خواصی مانند اسپین و گشتاورهای الکترومغناطیسی نوکلئونهای ظرفیت کـه محل استقرارشان در نزدیکی سطح هسته است، مربوط می‌شوند. به‌همین‌ترتیب، بسیاری از ابزارهای تجربی کاوش درون هسته نیز بیشتر از خواص سطحی هسته‌ها خبر می‌دهند. ذرات مورد استفاده در تحقیق نیروی هسته‌ای هم ازجملهٔ این ابزارها هستند. برای آنکه بتوانیم به پرسش مطرح شده پاسخ دهیم، به‌وسیلهٔ کاونده‌ای نیاز داریم که به اعماق هسته رسوخ کند. با استفاده از این وسیله باید بتوانیم به‌جای خواص‌سطحی، خواص درونی هسته‌ها را مورد اندازه‌گیری قراردهیم. همچنانکه درمطالعهٔ توزیع بار هسته در فصل ۳ عمل کردیم، الکترونهای پرانرژی را به‌عنوان وسیلهٔ کاونده اختیار می‌کنیم. خاصیتی که می‌خواهیم اندازه‌گیری کنیم، چگالی بار یك نوکلئون منفرد درمدار است که کمیتی معادل مربع تابع‌موج آن $|\psi|^2$ است. بامراجعه به‌شکل ۱۲.۲، به خاطر می‌آوریم که فقط تابع‌موج حالت s می‌تواند عمیقاً به درون هسته نفوذ کند و تابع‌موج حالتهای دیگردر مرکز هسته به‌صفرمیل می‌کند ($r \to 0,\ \psi \to 0$). پس برای این‌منظور، هسته‌ای مانند ${}^{205}_{81}Tl_{124}$ را انتخاب می‌کنیم که ازتمامی زیرپوسته‌های پایینتر ازگاف $Z = 82$ یك‌پروتون منفرد مربوط به‌مدار $3s_{1/2}$ راکم دارد. اماچگونه می‌توانیم سهم پروتون $3s_{1/2}$ را به تنهایی در توزیع بار اندازه‌گیری کنیم و پروتونهای دیگر را در نظر نگیریم؟ با اندازه‌گیری اختلاف توزیع بار بین هسته‌های ${}^{205}Tl$ و ${}^{206}_{82}Pb_{124}$ که پوستهٔ پروتونی کاملی دارد، می‌توان به این هدف دست یافت. هرگونه اختلاف بین توزیع بـارهای این دو هسته را باید بـه پروتون $3s_{1/2}$ موجود در ${}^{206}Pb$ نسبت داد. اختلاف توزیع بار تجربی که اخیراً در یك آزمایش اندازه‌گیری شده است، در شکل ۱۳.۵ نموده شده است. نتیجهٔ تجربی بخوبی بامربع یك تابع‌موج $3s$ قابل مقایسه است (دراینجا از همان تابع‌موج نوسانگرهماهنگ شکل ۱۲.۲ استفاده شده است، با این استثنا که ترسیم فعلی تغییرات $|\psi|^2$ را نشان می‌دهد نه r^2R^2 را). پس اعتبار این فرضیه که ویژگیهای مداری نوکلئونها حتی دراعماق درون هسته‌ها هم‌حفظ می‌شود، به‌تأیید می‌رسد. بااستفاده ازاین‌گونه آزمایشها مطمئن می‌شویم که توصیف ذرهٔ مستقل که درنظریهٔ‌پوسته‌ای نقشی اساسی برعهده دارد، صرفاً به‌خاطرسهولت در تحلیل اندازه‌گیریهای نزدیك به‌سطح هسته اختیار نشده است، بلکه می‌توان آن را معرف رفتار نوکلئون در سراسر حجم هسته تلقی کرد.



شکل ۱۳.۵ اختلاف چگالی بار بین ^{205}Tl و ^{206}Pb که بااستفاده از پراکندگی الکترون حاصل شده‌است. منحنی «نظری»، صرفاً مربع تابع‌موج ۳s را در یك نوسانگرهماهنگ نشان می‌دهد. تغییرات چگالی بار به‌کمك نظریه بخوبی بازتولید می‌شود.

۲.۵ هسته‌های Z زوج و N زوج و ساختار جمعی

اکنون سعی می‌کنیم که ساختارهسته‌های باتعداد زوج پروتون و نوترون را (که هسته‌های زوج ـ زوج نامیده می‌شوند) درك کنیم. برای نمونه، هستهٔ ^{130}Sn را که تراز انرژی آن در شکل ۱۴.۵ نموده شده است، در نظر می‌گیریم. بنابر پیش‌بینی مدل پوسته‌ای، حالت پایهٔ تمام هسته‌های زوج ـ زوج به صورت 0^+ (اسپین صفر، پاریتهٔ زوج) خواهد بود، زیرا همهٔ نوکلئونها در این‌گونه هسته‌ها تزویج شده‌اند. موافق مدل پوسته‌ای، تعداد ۵۰ پروتون هستهٔ ^{130}Sn پوستهٔ $g_{9/2}$ را پر می‌کند و تعداد ۸۰ نوترون آن برای پرکردن پوستهٔ $h_{11/2}$ که متناظر باعدد جادویی ۸۲ است، ۲نوترون‌کم دارد. برای تشکیل حالت برانگیخته، می‌توان یکی از زوجها را شکست و یك نوکلئون آن را به‌تراز بالاتری برد که دراین‌صورت جفت‌شدگی بین این دونوکلئون فرد، اسپین و پاریتهٔ ترازها را مشخص خواهدکرد. بالابردن یکی‌از پروتونهای $g_{9/2}$ یایکی ازنوترونهای $h_{11/2}$ مستلزم انرژی زیاد است، زیرا دراین‌موارد بایدازفاصلهٔ زیاد بین پوسته‌های اصلی‌عبور کرد(شکل۶.۵).



شکل ۱۴۰۵ چند تراز انرژی سطح پایین درهستهٔ ^{۱۳۰}Sn.

بنابراین انتظار می‌رود که مؤلفه‌های اصلی تابع‌موجهای مربوط بـه حالتهای برانگیختهٔ پایین، از برانگیزش نوترون در داخل آخرین پوستهٔ اصلی اشغال‌شده حاصل شود. برای نمونه، اگر فرض کنیم پیکربندی حالت پایهٔ ^{۱۳۰}Sn به صورت زیرپوسته‌های کامل $s_{۱/۲}$ و $d_{۳/۲}$ و اشغال ۱۰ نوترون در زیرپوستهٔ $h_{۱۱/۲}$ (که با ۱۲ نوترون پر می‌شود) باشد، حالت برانگیخته را می‌توان بـا شکستن زوج $s_{۱/۲}$ و رسانـدن یکی از نوترونهای آن به‌زیرپوستهٔ $h_{۱۱/۲}$ به‌وجود آورد. دراین صورت، یك نوترون در زیرپوستهٔ $s_{۱/۲}$ و ۱۱ نوترون در زیرپوستهٔ $h_{۱۱/۲}$ موجـود خواهند بـود. خواص چنین سیستمی عمـدتاً از جفت‌شدگی نوترون موجود در $s_{۱/۲}$ و نوترون تزویج‌نشدهٔ $h_{۱۱/۲}$ حـاصل خواهد شد. جفت‌شدگی تکانه‌های زاویه‌ای $j_۱$ و $j_۲$ درمکانیك کوانتومی، مقادیری باحداکثر $(j_۱+j_۲)$ تا حداقل $|j_۱-j_۲|$ به فاصله‌های واحد به‌دست خواهد داد. مقادیر ممکن در این مورد عبارت‌اند از $۶=(۱/۲)+(۱۱/۲)$ و $۵=(۱/۲)-(۱۱/۲)$. احتمال دیگر این‌است که یکی از زوجهای $d_{۳/۲}$ شکسته شود و باز هم یك نوترون فـرد در زیرپوستهٔ $h_{۱۱/۲}$ قرار گیرد. دراین‌صورت، بزرگی تکانهٔ زاویه‌ای درگسترهٔ مقادیر $۷=(۳/۲)+(۱۱/۲)$ تا $۴=(۳/۲)-(۱۱/۲)$ قرار خواهند گرفت. چون نوترونهای $s_{۱/۲}$ و $d_{۳/۲}$ پاریتهٔ زوج و نوترون $h_{۱۱/۲}$ پاریتهٔ فرد دارند، تمام این جفت‌شدگیها به‌حالتهای با پاریتهٔ فرد

منجر خواهند شد. هنگامی که نمودار تراز ^{۱۳۰}Sn را بررسی می‌کنیم، عملا با چند حالت پاریتهٔ فرد واسپینهایی که در گسترهٔ ۴ تا ۷ قراردارند، وانرژیهای حدود ۲ MeV، روبه‌رو می‌شویم. این انرژی از مشخصهٔ لازم برای شکستن یك زوج و برانگیزش یکی از ذرات درون پوسته برخوردار است، و بدین گونه می‌توان گفت دلیلی قوی که حاکی از درك این حالتهاست در اختیار داریم. احتمال دیگر در تشکیل حالتهای برانگیخته این است که یکی‌از زوجهای $h_{۱۱/۲}$ شکسته شود، وهردو عضو زوج شکسته درهمان زیرپوستهٔ $h_{۱۱/۲}$ نگهداشته شوند. دراین صورت، جفت‌شدگی مجدد این دو نوکلئون به‌اسپینی غیراز صفر قبلی منجرخواهد شدکه بنابرقواعد جفت‌شدگی تکانهٔ زاویه‌ای می‌تواند برابربا هرمقداری از ۱۱ =(۱۱/۲)+(۱۱/۲) تا ۰ =(۱۱/۲)−(۱۱/۲) باشد. این دو نوترون موجود در $h_{۱۱/۲}$ را باید مانند ذرات یکسان تلقی کرد، و بنابراین تابع‌موج مربوط به‌آنهاهم باید متقارن درنظر گرفته شود. این شرط، اسپین برایند حاصل ازجفت‌شدگی را به‌مقادیرزوج محدود می‌کند و درنتیجه حالتهای ممکن عبارت‌اند از $^{+}۰$، $^{+}۲$، $^{+}۴$، $^{+}۶$، $^{+}۸$، $^{+}۱۰$. برای این حالتها درناحیهٔ ۲ MeV می‌توان نمونه‌های متعددی به‌دست‌آورد. بدین ترتیب، به‌نظر می‌رسدکه مدل پوسته‌ای دراین مورد هم می‌تواند توصیفی قابل‌قبول از ساختار ترازها ارائه دهد.

یکی از استثناهای مهم این تعبیر موفق، حالت $^{+}۲$ درانرژی حدود ۱٫۲ MeV است. در شرایطی‌که بحث ما به حالتهای نوترونی محدود است، طریقه‌های ممکن برای جفت‌شدگی دونوترون درتشکیل $^{+}۲$ چه خواهد بود؟ چنانکه دربالا گفته شد، حالت $^{+}۲$ می‌تواند از جفت‌شدگی دو نوترون در $h_{۱۱/۲}$ حاصل شود. همچنین به کمك برانگیزش می‌توان یك زوج ازنوترونهای $d_{۳/۲}$ را تا زیرپوستهٔ $h_{۱۱/۲}$ بالابرد (که بدین‌ترتیب این پوسته کاملا پر و پیکربندی بسیار پایدار خواهد شد)، وآنگاه با شکستن جفت‌شدگی دونوترون باقیمانده در $d_{۳/۲}$ وجفت‌شدن مجددآنها به‌حالت $^{+}۲$ دست‌یافت. یك احتمال دیگرهم این خواهدبودکه زوج نوترونهای $s_{۱/۲}$ در زیرپوستهٔ $h_{۱۱/۲}$ قرارگیرد، وسپس یکی از نوترونهای $d_{۳/۲}$ به زیرپوستهٔ $s_{۱/۲}$ برود. در این صورت، در هرکدام از زیرپوسته‌های $s_{۱/۲}$ و $d_{۳/۲}$ یك نوترون فرد خواهیم داشت‌که ازجفت‌شدگی آنها ممکن است حالت $^{+}۲$ حاصل شود. به‌هرحال، در تمام این موارد نخست باید یك زوج شکسته شود، و در نتیجه انرژی حالتهای انتظاری در حدود ۲ MeV خواهد بود.

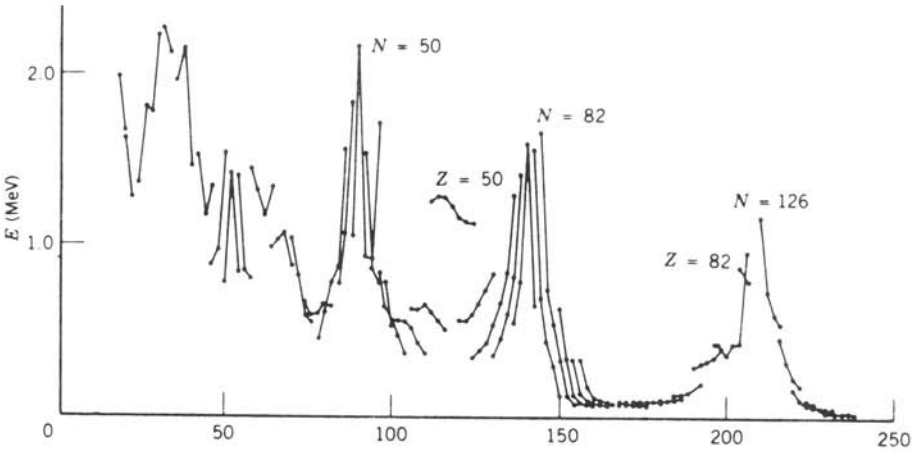
البته توصیف مدل پوسته‌ای صرفاً نوعی تقریب است، و بعید است که بتوانیم حالتهای مدل پوسته‌ای «ناب» را در یك نمودار تراز انرژی پیچیده پیدا کنیم. رهیافت بهتراین است‌که وقتی ازمدل پوسته‌ای به‌عنوان وسیله‌ای برای تعبیرساختارهسته‌ای‌استفاده می‌کنیم، حالتهای فیزیکی را به‌صورت ترکیبی از حالتهای مدل پوسته‌ای در نظر بگیریم

$$\psi(۲^{+})=a\psi(\nu h_{۱۱/۲}\oplus\nu h_{۱۱/۲})+b\psi(\nu d_{۳/۲}\oplus\nu d_{۳/۲})$$
$$+c\psi(\nu d_{۳/۲}\oplus\nu s_{۱/۲})+\cdots \qquad (۱۲\cdot۵)$$

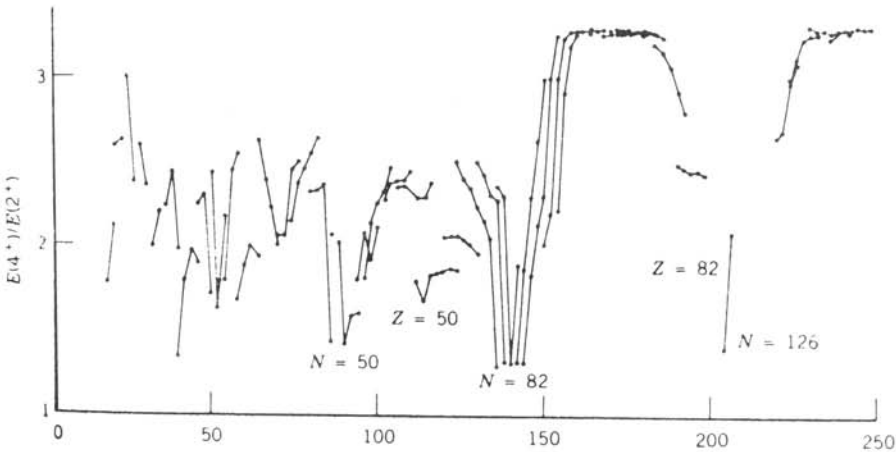
که در آن ν نشانهٔ نوترون است و علامت $\oplus$ حاکی از این است کـه جفت‌شدگی تکانهٔ زاویه‌ای را باید چنان تنظیم کنیم که برایند 2^+ حاصل شود. اکنون مسئلهٔ پیچیدهٔ حالت 2^+ درانرژی پایین را می‌توان چنین بیان کرد: انرژی هریك‌ازحالتهای سازنده(یاحالتهای جزئی) درحدود ۲ MeV است، اما دربارهٔ برهم‌کنش هسته‌ایی که منجر به ترکیب مناسبی ازضرایب a، b، c، . . . دربسط (۱۲.۵) می‌شود وحالت برایند راتا انرژی ۱٫۲ MeV تنزل می‌دهد، چه می‌توان گفت؟

نخستین حدس ما این است که چنین ساختاری ممکن است از ترازهای خاصی از مدل پوسته‌ای، در حالی‌که بـا ذرات ظرفیتی هستهٔ ^{130}Sn اشغال شده‌اند، حاصل شود. وقتی هسته‌های زوج-زوج دیگـر را مورد بررسی قرار می‌دهیم، به این واقعیت درخور توجه می‌رسیم: از کاربرد مدل پوسته‌ای درصدها مورد هسته‌های زوج-زوج شناخته شده معلوم می‌شودکه همگی آنها دارای یك حالت «بی‌هنجار» 2^+ هستندکه انرژی آن معادل یا کوچکتر ازنصف انرژی لازم برای شکستن یك زوج نوکلئونی است. این حالت 2^+، جز در چنـد مورد استثنایی، در همهٔ موارد پایینترین حالت برانگیخته است. از این‌رو، ظهور این حالت یك امر تصادفی نیست که از ساختار مدل پوسته‌ای ^{130}Sn حاصل شده باشد بلکه از یك خاصیت کلی هسته‌های زوج-زوج ناشی می‌شود که صرفنظر از اشغال حالتهای خاص مدل پوسته‌ای، در سراسر گسترهٔ جرم معتبر است. چنانکه خواهیم دیـد، خواص کلی دیگری هم وجود دارند که در همهٔ هسته‌ها مشترك‌اند، پس همان بهترکه این خواص را نه بـا حرکت چند نوکلئون ظرفیت بلکه با تمام هسته مرتبط بدانیم. این‌گونه خواص راکه منشأ آنها درحرکت دسته‌جمعی اجزای هسته‌ای است وبسیاری ازنوکلئونهای هسته درایجادشان شرکت دارند، خواص جمعی می‌گویند. خواص جمعی هسته‌ها برحسب عدد جرمی به‌طور ملایم و تدریجی تغییر می‌کند، و اکثراً هم ازتعداد و نوع نوکلئونهای ظرفیت که خارج از زیرپوسته‌های کامل قرار دارند، مستقل است (هرچند که نوکلئونهای ظرفیت درساختار پوسته‌ای ادغام‌شونده در ساختارجمعی شرکت خواهند داشت).

درشکلهای ۱۵.۵ و ۱۶.۵ چهارخاصیت مختلف هسته‌های زوج-زوج راکه حاکی از رفتار جمعی هسته‌ها هستند، نشان داده‌ایم. با توجه به‌شکل ۱۵.۵(الف) به‌نظر می‌رسد که انرژی نخستین حالت برانگیختهٔ 2^+ بـا افزایش A به تدریج کاهش می‌یابد (نواحی نزدیك به پوسته‌های کامل استثناست). مقادیـر $E(2^+)$ در ناحیهٔ تقریبی $A=150$ تـا $A=190$ هم فوق‌العاده ثابت‌اند و هم بسیار کوچك. در شکل ۱۵.۵(ب) نیز، به‌استثنای نواحی نـزدیك به پوسته‌های کامل، نسبت $E(4^+)/E(2^+)$ بـرای هسته‌هـای سبکتر از $A=150$ تقریباً برابر ۲٫۰ و برای هسته‌های $150<A<190$ و $A>230$ برابر مقدار ثابت ۳٫۳ است. گشتاور مغناطیسی حالتهای 2^+ (طبق شکل ۱۶.۵الف) درگسترهٔ مقادیر۰٫۷ تا ۱٫۰ تقریباً ثابت می‌ماند، وگشتاور چارقطبی الکتریکی (طبق شکل۱۶.۵ب) برای‌هسته‌های $A<150$ دارای مقادیرکوچك و برای هسته‌های $A>150$ دارای مقادیر خیلی بزرگتری است. بـرای توضیح این خصوصیات باید دو نوع ساختار جمعی در نظر



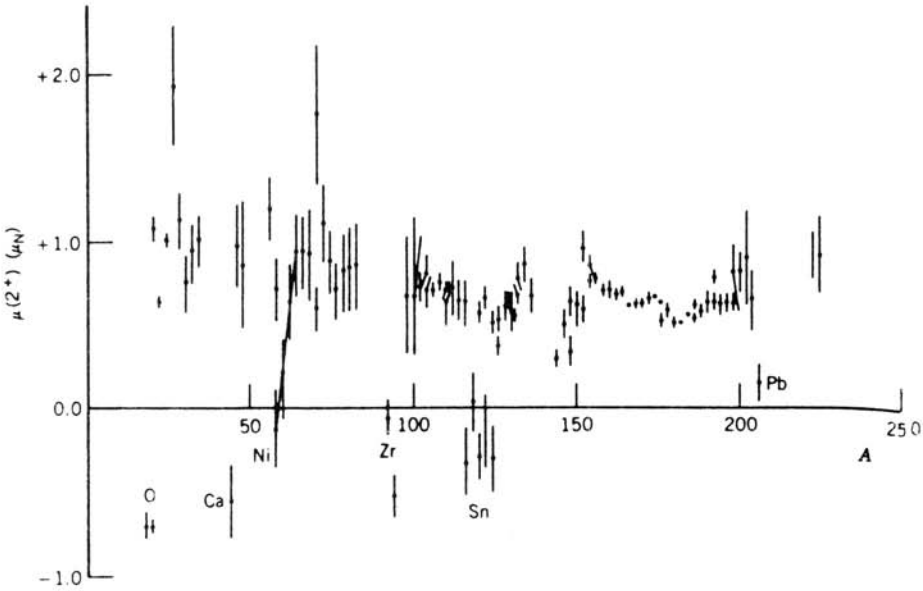
شکل ۱۵.۵(الف) انرژی پایینترین حالتهای 2^+ در هسته‌های زوج-زوج. نقاط مربوط به‌ایزوتوپهای متوالی با خط به‌هم وصل شده‌اند.



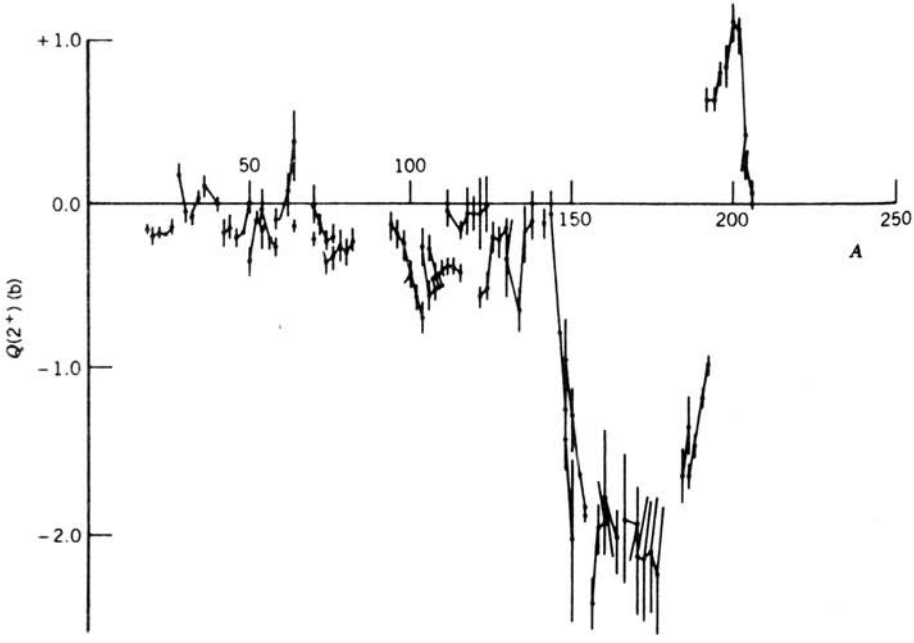
شکل ۱۵.۵(ب) نسبت $E(4^+)/E(2^+)$ برای پایینترین حالتهای 2^+ و 4^+ در هسته‌های زوج-زوج. نقاط مربوط به‌ایزوتوپهای متوالی با خط به‌هم وصل شده‌اند.

بگیریم، زیرا به نظر می‌رسد که یك دسته از خواص به هسته‌های $A<150$ و دستهٔ دیگر به‌هسته‌های $150<A<190$ مربوط می‌شوند.

هسته‌های با عدد جرمی $A<150$ را عموماً به کمك مدلی که مبتنی بر ارتعاشات حول شکل تعادل کروی است بررسی می‌کنیم، در حالی‌که خواص هسته‌های با عدد جرمی بین ۱۵۰ و ۱۹۰ خیلی شبیه اثرات دورانی سیستمهای غیرکروی است. ارتعاش ودوران،



شکل ۱۶.۵(الف) گشتاورمغناطیسی پایینترین‌حالتهای 2^+ درهسته‌های زوج ـ زوج. هسته‌های مدل پوسته‌ای که رفتار غیرجمعی دارند، مشخص شده‌اند.



شکل ۱۶.۵(ب) گشتاورچارقطبی الکتریکی پایینترین حالتهای 2^+ درهسته‌های زوج‌ـزوج. نقاط مربوط به‌ایزوتوپهای متوالی با خط به‌هم وصل شده‌اند.

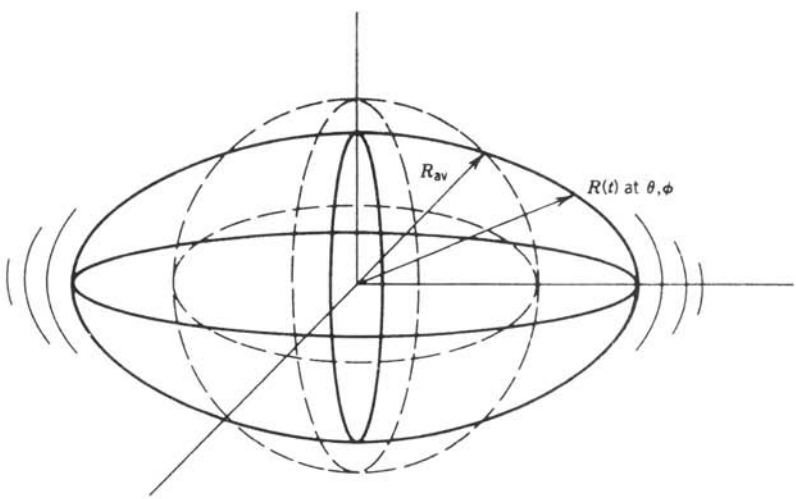
دو نوع اصلی حرکت جمعی در هسته‌هاست که هریك ازآنها را به‌نوبت بررسی خواهیم کرد. مدل‌جمعی هسته‌ها را غالباً مدل «قطره مایع» می گویند، زیرا ارتعاش و دوران هسته کاملا مشابه ارتعاش و دوران قطرهٔ مایع معلق است وباهمان تحلیل ریاضی می‌توان هسته‌ها را مورد بررسی قرار داد.

ارتعاشات هسته‌ای

با در نظرگرفتن قطرهٔ مایعی که با بسامد زیاد در حال ارتعاش باشد، می‌توان بـه مفهوم قابل‌قبولی ازفیزیك ارتعاشات هسته‌ای دست یافت. هرچندکه شکل چنین قطره‌ای به‌طور متوسط کروی است، ولی شکل لحظه‌ای آن کروی نیست. مختصهٔ لحظه‌ای $R(t)$ یك نقطه از سطح هسته را در زوایای (θ, ϕ) بـه‌آسانی می‌توان، مطابق شکل ۱۷.۵، به صورت هماهنگ‌کروی $Y_{\lambda\mu}(\theta, \phi)$ نشان داد. هرمؤلفه از هماهنگ‌کروی دارای دامنهٔ $\alpha_{\lambda\mu}(t)$ خواهد بود

$$R(t) = R_{av} + \sum_{\lambda \geqslant 1} \sum_{\mu=-\lambda}^{+\lambda} \alpha_{\lambda\mu}(t) Y_{\lambda\mu}(\theta, \phi) \qquad (۱۳.۵)$$

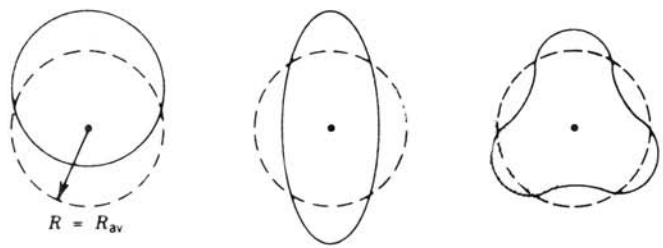
دامنه‌های $\alpha_{\lambda\mu}$ کاملا اختیاری نیستند؛ تقارن انعکاسی مستلزم آن است که $\alpha_{\lambda\mu} = \alpha_{\lambda-\mu}$ شود واگرمایع‌هسته‌ای را تراکم‌ناپذیر بگیریم، محدودیتهای دیگری هم وارد خواهندشد. جملهٔ ثابت $(\lambda = 0)$، در شعاع متوسط $R_{av} = R_0 A^{1/3}$ مستتر است. ارتعاش نمونه‌وار



شکل ۱۷.۵ یك هستهٔ درحال ارتعاش باشکل تعادل‌کروی. مختصهٔ وابسته به‌زمان $R(t)$، یك نقطه ازسطح هسته را تحت زوایای θ, ϕ مشخص می‌کند.

$\lambda = ۱$ را کـه ارتعاش دوقطبی نامیده می‌شود، در شکل ۱۸.۵ نشان داده‌ایم. باید توجه داشتـه باشیم که در این ارتعاش با جابه‌جایی مرکز جـرم روبه‌رو هستیم، و بنـا براین نمی‌توانیم آن را نتیجهٔ عملکرد نیروهای درون هسته به شمار آوریم. در ایـن صورت، پایینترین مد بعدی ارتعاش را کـه ارتعاش (چارقطبی) $\lambda = ۲$ است، در نظر می‌گیریم. همانند نظریهٔ کوانتومی الکترومغناطیس که در آن واحد انرژی الکترومغناطیسی را فوتون می‌نامند، یك کوانتوم انرژی ارتعاشی را فونون می‌گویند. درهرجایی که ارتعاش مکانیکی وجود داشته باشد، می‌توان گفت که فونونهای ارتعاشی تولید می‌شود. بدین گونه، واحد منفرد انرژی ارتعاشی متناظر به $\lambda = ۲$ را فونون چارقطبی می‌نامند.

در اینجا نتیجهٔ افزایش یك واحد انرژی ارتعاشی (یـا یك فونون چارقطبی) را به‌حالت پایهٔ هسته‌ای زوج-زوج مورد بررسی قرارمی‌دهیم. فونون $\lambda = ۲$ حاوی ۲واحد تکانهٔ زاویه‌ای (که درست مانند مورد Y_{lm} بـا $l = ۲$، باعث افزایش مؤلفهٔ $Y_{۲\mu}$ بـه تابع‌موج هسته می‌شود) و پاریتهٔ زوج است، زیرا پاریتهٔ Y_{lm} به صورت $(-۱)^l$ است. با افزودن دو واحد تکانهٔ زاویه‌ای به حالت ۰^+ یك حالت ۲^+ حاصل می‌شود که با نتایج تجربی اسپین-پاریتهٔ نخستین حالتهای برانگیختهٔ هسته‌های زوج-زوج سازگاری دقیقی دارد. (در این نظریه، انرژی فونون چارقطبی پیش‌بینی نمی‌شود و باید آن را به‌صورت یك پارامترقابل تنظیم در نظر گرفت.) اکنون فرض می‌کنیم که فونون چارقطبی دومی را هم به‌هسته افزوده‌ایم. تعداد مؤلفه‌های ممکن μ برای هرفونون برابر ۵ است وهمچنانکه در جدول ۲.۵ نموده شده است، برای این دو فونون تعداد ۲۵ ترکیب $\lambda\mu$ قابل تصور است. حـال ترکیبات مختلف را بررسی می‌کنیم. در میان این ترکیبات، یك حالت بـا جمع کل $\mu = +۴$ وجود دارد. طبیعی است که این ترکیب را متناظر با انتقال ۴ واحد تکانهٔ زاویه‌ای (یك تابع Y_{lm} که در آن $m = +۴$ و در نتیجه $l = ۴$ است) تلقی کنیم. دو ترکیب با مقدارکل $\mu = +۳$ وجود دارد که یکی از $(\mu_۱ = +۱, \mu_۲ = +۲)$ و دیگری‌از $(\mu_۱ = +۲, \mu_۲ = +۱)$ به‌دست می‌آید. اما وقتی ترکیب متقارن تابع‌موجهای



$\lambda = ۱$ (دوقطبی) $\lambda = ۲$ (چارقطبی) $\lambda = ۳$ (هشت‌قطبی)

شکل ۱۸.۵ سه مد از پایینترین مدهای ارتعاشی هسته. دراین شکلها، برش مرکزی هسته‌ها نشان داده شده است. منحنیهای خط‌چین شکل تعادل‌کروی، وخطوط پر وضعیت لحظه‌ای سطح درحال ارتعاش را نشان می‌دهد.

جدول ۲.۵ مؤلفهٔ z تکانهٔ برایند از جمع تصاویر تکانه‌های زاویه‌ای دوفونون در راستای z به‌دست می‌آید.[۱]

μ_2	μ_1				
	-2	-1	0	$+1$	$+2$
-2	-4	-3	-2	-1	0
-1	-3	-2	-1	0	$+1$
0	-2	-1	0	$+1$	$+2$
$+1$	-1	0	$+1$	$+2$	$+3$
$+2$	0	$+1$	$+2$	$+3$	$+4$

۱. مقادیر این جدول نشان می‌دهد که $\mu=\mu_1+\mu_2$ است.

فونونی (مطابق آنچه در بخش ۷.۲ گفته شد، فونونهای با اسپین درست باید تابع‌موجهای متقارن داشته باشند) را مورد توجه قرار می‌دهیم، فقط یك نوع ترکیب دیده می‌شود. سه ترکیب با مقدار $\mu=+2$ وجود دارد که از مجموعه‌های

$$(\mu_1, \mu_2)=(+2, 0), (+1, +1), (0, +2)$$

حاصل می‌شود. از ترکیب اولی وسومی باید یك تابع‌موج متقارن به‌دست آید. پیش‌از این دیدیم که ترکیب $(+1, +1)$ متقارن است. اگر تعداد ترکیبهای ممکن را به‌همین‌طریق تعیین کنیم، تعداد ترکیبهای مجاز را نه ۲۵ بلکه ۱۵ خواهیم یافت: یك ترکیب با $\mu=+4$، یك ترکیب دیگر با $\mu=+3$، دوتا با $\mu=+2$، دوتا با $\mu=+1$، سه‌تا با $\mu=0$، دوتا با $\mu=-1$، دوتا با $\mu=-2$، یکی با $\mu=-3$، و یکی با $\mu=-4$ به‌دست می‌آید. این ترکیبها را به‌صورت زیر می‌توان دسته‌بندی کرد

$$l=4 \qquad \mu=+4, +3, +2, +1, 0, -1, -2, -3, -4$$

$$l=2 \qquad \mu=+2, +1, 0, -1, -2$$

$$l=0 \qquad \mu=0$$

به‌این‌ترتیب، در انرژیی معادل دوبرابر انرژی نخستین حالت $^+2$ (چون انرژی دوفونون یکسان، دوبرابر انرژی یکی از آنهاست)، انتظار داریم که با سه‌تایه‌ای از حالتهای $^+0$، $^+2$، $^+4$ روبه‌رو شویم. سه‌تایهٔ $^+0$، $^+2$، $^+4$ یکی‌از ویژگیهای مشترك هسته‌های ارتعاشی

است و پشتوانه‌ای قوی برای اعتبار ایـن مدل به شمار می‌رود. این سه حالت، به دلیل اثرات دیگری کـه در این مدل ساده در نظر گرفته نشده‌اند، هرگز انرژی دقیقاً یکسان ندارند. با محاسبهٔ مشابهی می‌توان نشان داد که بـا افزودن سه فونون چارقطبی به هسته، حالتهای $^{+}$۰، $^{+}$۲، $^{+}$۳، $^{+}$۴، $^{+}$۶ به‌دست می‌آیند (مسئلهٔ ۱۰ را ببینید).

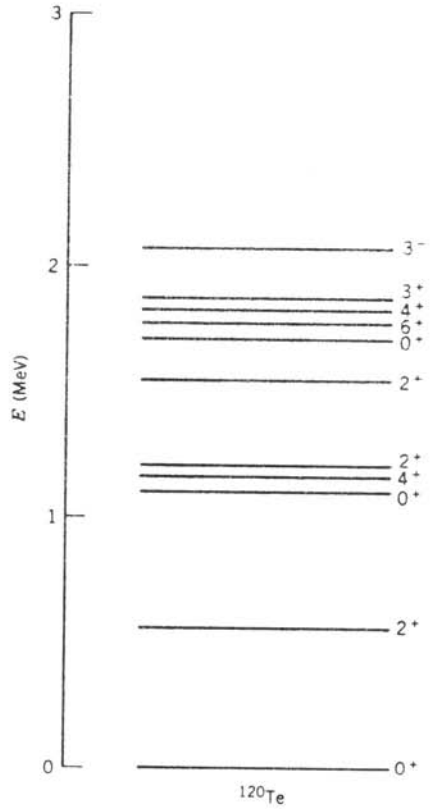
مد ارتعاشی بعدی، مد هشت‌قطبی $\lambda = ۳$ است که حاوی سه واحد تکانهٔ زاویه‌ای با پاریتهٔ منفی است. با افزایش یك فونون منفرد هشت‌قطبی به حالت پایهٔ $^{+}$۰، یك حالت $^{-}$۳ حاصل می‌شود. معمولا درانرژیهای اندکی بالاتر ازسه‌تایهٔ دوفونونی، چنین‌حالتهایی را هم می‌توان در هسته‌های ارتعاشی پیدا کرد. وقتی به طرف انرژیهای بالاتر می‌رویم، ساختار ارتعاشی به‌تدریج باساختار برانگیزش ذره‌ای جایگزین می‌شود که با شکسته‌شدن یك زوج حالت پـایه متناظر است. بررسی این‌گونه برانگیختگیها بسیار پیچیده است، و جای بحث آن در ساختار جمعی هسته‌ها نیست.

مدل ارتعاشی متضمن چند پیش‌بینی است که می‌توان آنها را در آزمایشگاه مورد بررسی قرار داد. اگر شکل تعادل را کروی بگیریم، از گشتاور چارقطبی نخستین حالت $^{+}$۲ باید صرفنظر کرد. چنانکه در شکل ۱۶.۵(ب) دیدیم، مقادیر این گشتاورها کوچك و اغلب در ناحیهٔ $A<۱۵۰$ نزدیك به صفر هستند. گشتاور مغناطیسی نخستین حالتهای $^{+}$۲ به‌صورت $۲(Z/A)$ پیش‌بینی می‌شود که برای هسته‌های موردنظر در گسترهٔ ۰٫۸ تا ۱٫۰ قرارمی‌گیرد، و سازگاری قابل قبولی هم با آزمایش دارد. اگرحالت $^{+}$۴ را عضوی از سه‌تایهٔ‌دوفونونی وحالت $^{+}$۲ را نخستین‌حالت برانگیخته‌بگیریم، نسبت $E(۴^{+})/E(۲^{+})$ برابر با ۲٫۰ پیش‌بینی می‌شود که طبق شکل ۱۵.۵(ب)، درناحیهٔ $A<۱۵۰$ سازگاری قابل قبولی با آزمایش نشان می‌دهد. در فصل ۱۰، سازگاری قابل قبول دیگری را بین مقادیر تجربی و نظری احتمال گذار پرتوگاما خواهیم دیـد. نمونه‌ای از ساختار تراز انرژیهای پایین را برای یك نوع هستهٔ «ارتعاشی» درشکل ۱۹.۵ نشان داده‌ایم که درآن بسیاری از ویژگیهای پیش‌بینی شده به‌آسانی قابل مشاهده است. بدین‌سان، می‌توان گفت که مدل ارتعاشی کروی تصویر نسبتاً دقیقی از ساختار این‌گونه هسته‌ها به‌دست می‌دهد.

دورانهای هسته‌ای

حرکت دورانی را تنها درهسته‌هایی می‌توان مشاهده کرد که شکل تعادل غیرکروی دارند. این هسته‌ها راکه ممکن است تغییرشکل زیادی به‌نسبت شکل کروی درآنها رخ داده‌باشد، غالبـاً هسته‌های تغییر شکل‌یافته می‌گوینـد. ایـن‌گونه هسته‌ها در گستره‌هـای جرمـی $۱۵۰<A<۱۹۰$ و $A>۲۲۰$ (خاکهای نادر و آکتینیدها) دیده می‌شوند. درشکل۱۰.۵ دیدیم‌که گشتاور چارقطبی هسته‌های با عدد جرمی فرد نیز در این نواحی به‌طور استثنایی بزرگ است. شکل عمومی این‌نوع هسته‌ها را به‌صورت یك بیضیوار دوار (شکل۲۰.۵) می‌توان نشان داد که سطح آن با معادلهٔ زیر توصیف می‌شود

$$R(\theta, \phi) = R_{av}[۱ + \beta Y_{۲۰}(\theta, \phi)] \qquad (۱۴.۵)$$

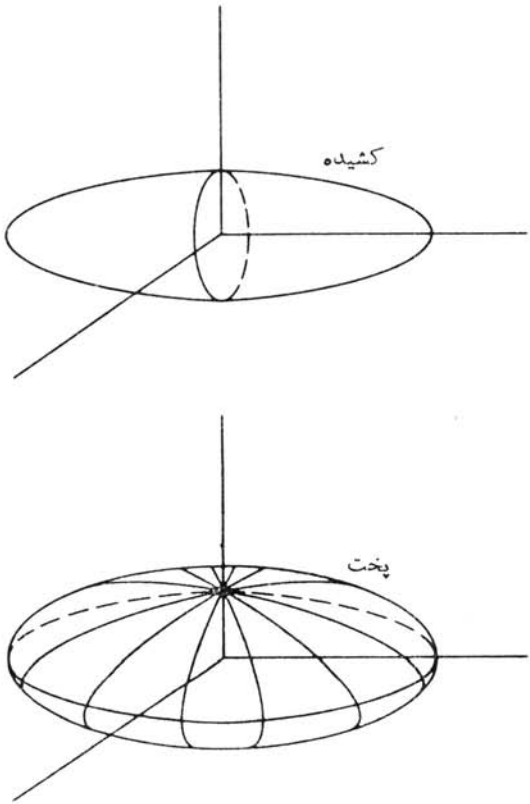


شکل ۱۹.۵ ترازهای انـرژی پایین در ^{120}Te. حالت تک‌فونون چارقطبی (اولیـن 2^+)، سه‌تایهٔ دوفونونی، و پنج‌تایهٔ سه فونونی را به‌آسانی می‌توان مشاهده کرد. حالت 3^- را می‌توان ناشی از ارتعاش هشت‌قطبی دانست. در انرژیهای بالاتر از ۲ MeV، ساختار آنچنان پیچیده است که هیچ‌گونه نقش ارتعاشی در آن دیده نمی‌شود.

چون ایـن معادله مستقل از ϕ است، هسته دارای تقارن استوانه‌ای می‌شود. رابطهٔ بیـن پارامتر تغییر شکل β و خروج از مرکز بیضی به‌صورت زیراست

$$\beta=\frac{4}{3}\sqrt{\frac{\pi}{5}}\frac{\Delta R}{R_{av}} \qquad (۱۵.۵)$$

که در آن ΔR اختلاف طول محورهای بزرگ و کوچك بیضی است. معمولا شعاع متوسط هسته را به صورت $R_{av}=R_0A^{1/3}$ در نظر می‌گیرند که چندان دقیق نیست. چون حجم هسته‌ای کـه با معادلهٔ (۱۴.۵) توصیف می‌شود کاملا برابر $4/3\pi R_{av}^3$ نمی‌شود، تقریب حاضردقت زیادی ندارد (مسئلهٔ ۱۱ را ببینید). محور تقارن معادلهٔ (۱۴.۵) محور مرجعی



شکل ۲۰.۵ شکل تعادل هسته‌های با تغییرشکل دائمی. اختلاف بین این طرح شکلها و شکلهای ۱۷.۵ و ۱۸.۵ در آن است که این طرح شکلها تصاویری فوری ازسطح متحرك هسته دریك لحظهٔ خاص زمانی نیستند، بلکه شکل هسته را درحالت ایستا نشان می‌دهند.

است که زاویهٔ θ نسبت به آن تعریف می‌شود. هنگامی که $\beta > ۰$ باشد، هسته به‌صورت یك بیضیوار کشیده و طویل است؛ و هنگامی که $\beta < ۰$ باشد، هسته به‌شکل یك بیضیوار پخت و پهن درمی‌آید.

یکی از نشانه‌های تغییرشکل پایدار در هسته، وجود گشتاور چارقطبی الکتریکی قابل توجه است که نمونه‌های آن در شکل ۱۰.۵ نموده شده است. رابطهٔ بین گشتاور چارقطبی و پارامتر تغییرشکل به‌صورت زیراست

$$Q_{۰} = \frac{۳}{\sqrt{۵\pi}} R_{av}^{۲} Z\beta(۱ + ۰٫۱۶\beta) \qquad (۱۶.۵)$$

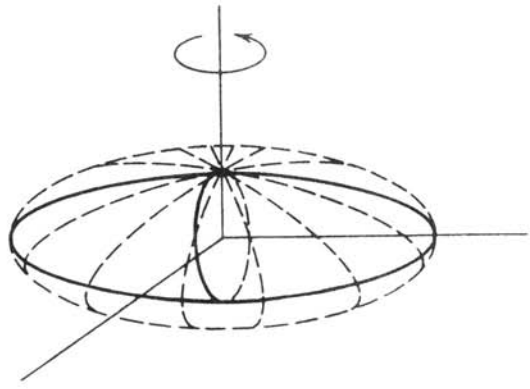
گشتاور چارقطبی $Q_{۰}$ را گشتاور چارقطبی ذاتی می‌نامند و فقط در چارچوب مرجعی که نسبت به هسته در حال سکون باشد قابل مشاهده است. در چارچوب مرجع آزمایشگاه،

هسته حالت دورانی دارد واندازه‌گیری گشتارچارقطبی آن به‌مقدار کاملا متفاوت Q منتهی می‌شود. در واقع، چنانکه در شکل ۲۱.۵ دیده می‌شود، از دوران یك توزیع ذاتی کشیده حول محوری که برمحور تقارن آن عمود باشد (دورانهای حول محور موازی بـا محور تقارن قابل مشاهده نیستند)، توزیعی حاصل می‌شود که متوسط زمانی آن به‌صورت پخت است. بنابراین برای وقتی‌که $Q_0 > 0$ باشد، خواهیم داشت $Q < 0$. رابطهٔ بین Q و Q_0 به‌تکانهٔ زاویه‌ای هسته بستگی دارد: برای حالتهای 2^+ داریم $Q = -(2/7)Q_0$. مطابق شکل ۱۶.۵(ب)، بـرای هسته‌هایی کـه در ناحیهٔ تغییرشکل دائمی پایدار قـرار دارند ($150 \leqslant A \leqslant 190$)، داریم $Q \simeq -2\,\mathrm{b}$ که دراین‌صورت $Q_0 = +7\,\mathrm{b}$ خواهدشد. باتوجه به‌معادلهٔ (۱۶.۵) معلوم می‌شود که $\beta \simeq 0.29$ است. این مقدار نشانگرانحراف قابل توجهی نسبت به هستهٔ کروی است، به‌طوری‌که بنابرمعادلهٔ (۱۵.۵)، اختلاف طول نیم‌محورهای بزرگ وکوچك در حدود ۰٫۳ شعاع هسته می‌شود.

انرژی جنبشی یك جسم دوار به‌صورت $(1/2)\mathcal{J}\omega^2$ است، که در آن $\mathcal{J}$ گشتاور لختی جسم است. این مقدارانرژی را می‌توان برحسب تکانهٔ زاویه‌ای $l = \mathcal{J}\omega$ به‌صورت $l^2/2\mathcal{J}$ نوشت. اگر مقادیرکوانتوم مکانیکی l^2 را در نظر بگیریم و عددکوانتومی تکانهٔ زاویه‌ای را با I نشان دهیم، بنابرمکانیك‌کوانتومی انرژی جسم دوار چنین می‌شود

$$E = \frac{\hbar^2}{2\mathcal{J}} I(I+1) \qquad (۱۷.۵)$$

افزایش انرژی دورانی هسته با افزایش عددکوانتومی I متناظراست، واز توالی حالتهای برانگیختهٔ هسته یك نوار دورانی به وجود می‌آید. (حالتهای برانگیخته در مولکولها هم نوار دورانی تشکیل می‌دهندکه دراین مورد دوران مولکول حول مرکز جرم آن خواهد بود.) حالت پایهٔ یك هستهٔ Z زوج و N زوج، همیشه حالت 0^+ است و تقـارن آینه‌ای



شکل ۲۱.۵ از دوران یك توزیع کشیدهٔ ایستا حول محورعمود برمحورتقارن، یك توزیع پخت عملا مسطح حاصل می‌شود.

هسته دراین مورد خاص باعث می‌شود که تمامی حالتهای دورانی به‌مقادیر زوج I محدود شوند. بنابراین، توالی حالتها چنین خواهد شد

$$E(0^+) = 0$$

$$E(2^+) = 6\,\frac{\hbar^2}{2\mathcal{J}}$$

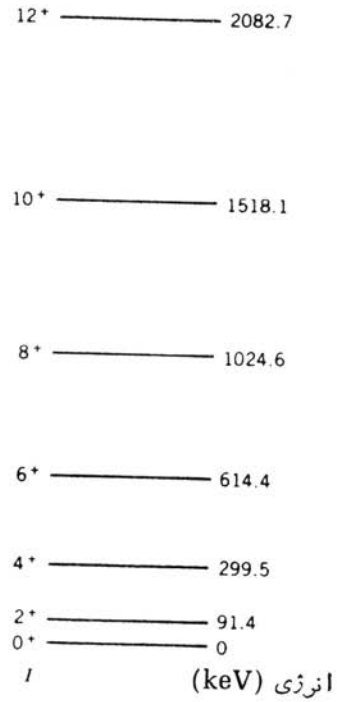
$$E(4^+) = 20\,\frac{\hbar^2}{2\mathcal{J}}$$

$$E(6^+) = 42\,\frac{\hbar^2}{2\mathcal{J}}$$

$$E(8^+) = 72\,\frac{\hbar^2}{2\mathcal{J}}$$

و همین‌طور تا آخر.

حالتهای برانگیختهٔ یك نمونه از هسته‌های دوار را در شکل ۲۲.۵ نشان داده‌ایم. نخستین حالت برانگیخته دارای انرژی $E(2^+) = 91.4\ \mathrm{keV}$ است، و درنتیجه داریم



شکل ۲۲.۵ حالتهای برانگیختهٔ ناشی از دوران $^{164}\mathrm{Er}$ درحالت پایه.

$\hbar^{۲}/۲\mathcal{J} = ۱۵٫۲\ \mathrm{keV}$. انرژیهای چند حالت بعدی در این توار دورانی حالت پایه عبارت‌اند از

$$E(۴^{+}) = ۲۰\frac{\hbar^{۲}}{۲\mathcal{J}} = ۳۰۵\ \mathrm{keV}, \qquad (\text{اندازه‌گیری‌شده: } ۳۰۰\ \mathrm{keV})$$

$$E(۶^{+}) = ۴۲\frac{\hbar^{۲}}{۲\mathcal{J}} = ۶۴۰\ \mathrm{keV}, \qquad (\text{اندازه‌گیری‌شده: } ۶۱۴\ \mathrm{keV})$$

$$E(۸^{+}) = ۷۲\frac{\hbar^{۲}}{۲\mathcal{J}} = ۱۰۹۷\ \mathrm{keV}, \qquad (\text{اندازه‌گیری‌شده: } ۱۰۲۵\ \mathrm{keV})$$

ترازهای انرژی محاسبه‌شده کاملا دقیق نیستند (شاید به این دلیل که هسته تاحدودی مثل شارهٔ نوکلئونی عمل می‌کند و درست مانند جسم صلبی‌که گشتاور لختی ثابتی داشته باشد نیست)، اما آن‌قدر خوب هستندکه مطمئن شویم دست‌کم ایده‌ای تقریبی از منشأ ترازهای برانگیخته در اختیار داریم. بویژه نسبت $E(۴^{+})/E(۲^{+})$ برابر با ۳٫۳۳ پیش‌بینی می‌شودکه سازگاری درخورتوجهی بانتایج ترازهای هسته‌ای هسته‌های $۱۵۰ < A < ۱۹۰$ و $A > ۲۳۰$ در شکل ۱۵.۵(ب) دارد.

با بررسی گشتاور لختی هستهٔ تغییرشکل‌یافته در دو حالت حدی می‌توان اطلاعاتی از ساختار این‌گونه هسته‌ها به دست آورد. گشتاور لختی حالت صلب یك بیضیوار دوار به‌جرم M که سطح آن با معادلهٔ (۱۴.۵) مشخص می‌شود، عبارت است از

$$\mathcal{J}_{r} = \frac{۲}{۵}MR_{av}^{۲}(۱ + ۰٫۳۱\beta) \qquad (۱۸.۵)$$

که اگر $\beta = ۰$ باشد، مقدار آن با گشتاور لختی یك‌کرهٔ توپر برابرمی‌شود. با استفاده از این معادله، مقدار ثابت انرژی دورانی یك هسته در ناحیهٔ تغییرشکل ($A \approx ۱۷۰$) چنین می‌شود

$$\frac{\hbar^{۲}}{۲\mathcal{J}_{r}} \cong ۶\ \mathrm{keV}$$

مرتبهٔ بزرگی این مقدار ثابت درست است، ولی مقدار آن در مقایسه با مقادیر تجربی [حدود ۱۵ keV برای $E(۲^{+}) = ۹۰\ \mathrm{keV}$] خیلی‌کم است. یعنی، گشتاورلختی حالت صلب بایك مضرب ۲ تا ۳ بزرگتر از مقدار مورد انتظار است. اکنون اگر حالت حدی دیگررا در نظر بگیریم و هسته را به‌صورت شاره‌ای‌که در یك ظرف بیضیوار دوار قرار گرفته است تصورکنیم، گشتاور لختی آن چنین خواهد شد

$$\mathcal{J}_{f} = \frac{۹}{۸\pi}MR_{av}^{۲}\beta \qquad (۱۹.۵)$$

که با استفاده از آن، مقدار ثابت انرژی دورانی به‌صورت زیر براورد می‌شود

$$\frac{\hbar^{2}}{2\mathcal{J}_{f}} \cong 90\ \mathrm{keV}$$

پس معلوم می‌شود که گشتاور لختی شاره خیلی کوچك است، و در نتیجه خواهیم داشت $\mathcal{J}_{r} > \mathcal{J} > \mathcal{J}_{f}$. بنابراین رفتار دورانی هسته‌ها را می‌توان به صورت رفتار بینابینی جسم صلب وجسم شاره‌ای توضیح داد. ذرات جسم صلب قویاً درقید یکدیگرند، درحالی که در شاره‌ها قیـد ذرات با یکدیگرخیلی ضعیف است. (شاید با توجه به شناختی که از نیروی هسته‌ای داریم، باید می‌توانستیم ایـن نتیجه را حدس بزنیم. نیروی قوی فقط بیـن یك نوکلئون و نوکلئونهای دیوار به دیوارآن وجود دارد، و درست به همین دلیل است کـه ساختار بلندبردی راکه مشخصهٔ جسم صلب است نمی‌توان از هسته انتظار داشت.)

یکی دیگر از نشانه‌های صلب نبودن هسته، افزایش گشتاور لختی آن در تکانه‌های زاویه‌ای زیاد یا بسامدهای دورانی زیاد است. این اثر که آن را «کشیدگی گریزازمرکز» می‌نامند، اغلب در واکنشهای یون سنگین دیده می‌شود که در بخش ۱۳.۱۱ دربارهٔ آنها بحث خواهد شد.

البته هسته هیچ‌گونه «ظرفی» ندارد که به شارهٔ دوار شکل بدهد، بلکه این همـان پتانسیل ناشی از نوکلئونهای درون هسته است که شکل هسته را تعیین می‌کند. مطلب بعدی ایـن است که ببینیم آیا مفهوم شکل برای یك هستهٔ دوار معنایی دارد یا نه. اگر دوران هسته در مقایسه با سرعت نوکلئونهای موجود در «مدار» که با پتانسیل هسته‌ای (واز دید چارچوب مرجع در حال سکون نسبت به‌هسته) مشخص می‌شود خیلی سریع باشد، دراین صورت چـون حرکت نوکلئونها تحت‌الشعاع دوران هسته قـرار می‌گیرد، مفهـوم شکل ایستای هسته خیلی بـامعنی نیست. انرژی جنبشی متوسط هر یك از نوکلئونهای هسته، از مرتبهٔ ۲۰ MeV و تقریباً متناظر بـا سرعت ۰٫۲c است. این مقدار براورد معقولی از سرعت حرکت نوکلئونهای درون هسته بـه دست می‌دهد. سرعت زاویه‌ای یك حـالت دورانی از رابطهٔ $\omega = \sqrt{2E/\mathcal{J}}$ به دست می‌آید، که در آن E انرژی حالت مورد نظر است. برای نخستین حالت دورانی داریم $\omega \simeq 1.1 \times 10^{20}\ \mathrm{rad/s}$؛ و دراین‌صورت نوکلئونی که نزدیك به سطح هسته باشد با سرعت مماسی $v \simeq 0.002c$ دوران خواهد کرد. بدین‌ترتیب معلوم می‌شود که حرکت دورانی درمقایسه باحرکت درونی خیلی کندتر است. بنابراین تصویر درست یك هستهٔ تغییر شکل‌یافتهٔ دوار همانند شکل تعادل پایداری است که در اثـر حرکت درونی سریع نوکلئونها در پتانسیل هسته‌ای حاصل می‌شود، و درحالی‌که این توزیع نوکلئونی به‌طور نسبتاً کند دوران می‌کند این دوران تأثیرچندانی برساختار هسته یا بر مدارهای نوکلئونی نخواهد داشت. (به‌همین دلیل، مدل دورانی را گاهی مدل «بی‌دررو» می‌گویند.)

تشکیل انواع دیگـر حالتهای برانگیخته کـه نوارهای دورانی جدیدی به وجود

می‌آورند نیز امکان‌پذیر است. نمونه‌هایی از این‌گونه حالتها که به‌دلیل تغییردادن ساختار ذاتی هسته حالتهای ذاتی نامیده می‌شوند، عبارت‌اند از: حالتهای ارتعاشی (که در آن هسته حول یك شکل تعادل تغییر شکل‌یافته ارتعاش می‌کند) و برانگیختگی ذره‌ای زوج ـ شکن. اگر اسپین حالت ذاتی غیرصفر باشد، نوار دورانی مبتنی بر آن حالت به ترتیب دارای مقادیر اسپین I، $I+1$، $I+2$، و . . . خواهد شد. حالتهای ارتعاشی هسته‌های تغییرشکل یافته بردو نوع است: ارتعاشهای β که طی آن پارامتر تغییرشکل β نوسان می‌کند و هسته تقارن استوانه‌ای‌اش را حفظ می‌کند، و ارتعاشهای γ که طی آن تقارن استوانه‌ای هسته نقض می‌شود. (اگرهسته را به‌صورت توپ فوتبال درنظربگیریم، ارتعاشهای بتا به بالا و پایین رفتن دوسرتوپ و ارتعاشهای گاما به جلو و عقب رفتن دو پهلوی آن مربوط می‌شود.) هر دو حالت ارتعاشی و برانگیزش ذره‌ای در انرژیهای حدود ۱ MeV اتفاق می‌افتند، درحالی‌که فواصل انرژی دورانی خیلی‌خیلی ازاین مقدار کمتراست (ازمرتبهٔ $\hbar^2/2\mathcal{J} \simeq 10-20$ keV).

درشکل ۲۳.۵، ساختار کامل هستهٔ ^{164}Er را درانرژی پایین نشان داده‌ایم. اگرچه ازکل مجموعهٔ حالتهای برانگیخته هیچ نقش‌مشخصی به‌دست نمی‌آوریم، ولی این حالتها را با توجه به اسپین ـ پاریته‌شان می‌توان به‌صورت نوارهای دورانی با فواصل مشخصهٔ $I(I+1)$ دسته‌بندی کرد. برای شناسایی ساختارهسته، ازخواص دیگرحالتهای برانگیخته (مانند احتمال گسیل پرتوگاما) هم می‌توان کمك گرفت.

حرکتهای جمعی دورانی و ارتعاشی هر دو باعث تولید گشتاورمغناطیسی در هسته می‌شوند. حرکت پروتونها را می‌توان به صورت یك جریان الکتریکی در نظر گرفت، و دراین صورت گشتاورمغناطیسی ناشی ازیك پروتون منفرد با عددکوانتومی تکانهٔ زاویه‌ای l عبارت است از $\mu = l\mu_N$. اما چنانکه می‌دانیم، کل تکانهٔ زاویه‌ای یك هسته صرفاً از پروتونهای آن حاصل نمی‌شود بلکه نوترونهای هسته هم در ایجاد تکانهٔ زاویه‌ای کل سهیم‌اند. اگر حرکت جمعی پروتونها و نوترونهای درون هسته را یکسان بگیریم (که فرضی است معقول ولی نه‌چندان دقیق)، سهم تقریبی پروتونها را در ایجاد تکانهٔ زاویه‌ای کل هسته به‌نسبت Z/A به‌دست خواهیم آورد. (دراینجا فرض می‌کنیم که حرکت جمعی نوترونها دخالتی در تولید گشتاورمغناطیسی هسته ندارد، و همچنین فرض می‌کنیم که همهٔ نوترونها و پروتونها به صورت دوبه‌دو باهم جفت شده‌اند به‌طوری که گشتاورمغناطیسی ناشی از اسپین نیز درگشتاورمغناطیسی هسته سهمی ندارد.) بدین‌ترتیب، گشتاورمغناطیسی یك حالت دورانی یا ارتعاشی با تکانهٔ زاویه‌ای I درمدل جمعی چنین پیش‌بینی می‌شود

$$\mu(I) = I\frac{Z}{A}\mu_N \qquad (۲۰.۵)$$

برای هسته‌های سبك که درآنها $Z/A \simeq 0.5$ است، داریم $\mu(2) \simeq +1\mu_N$؛ درحالی که برای هسته‌های سنگین که درآنها $Z/A \simeq 0.4$ است، داریم $\mu(2) \simeq +0.8\mu_N$.

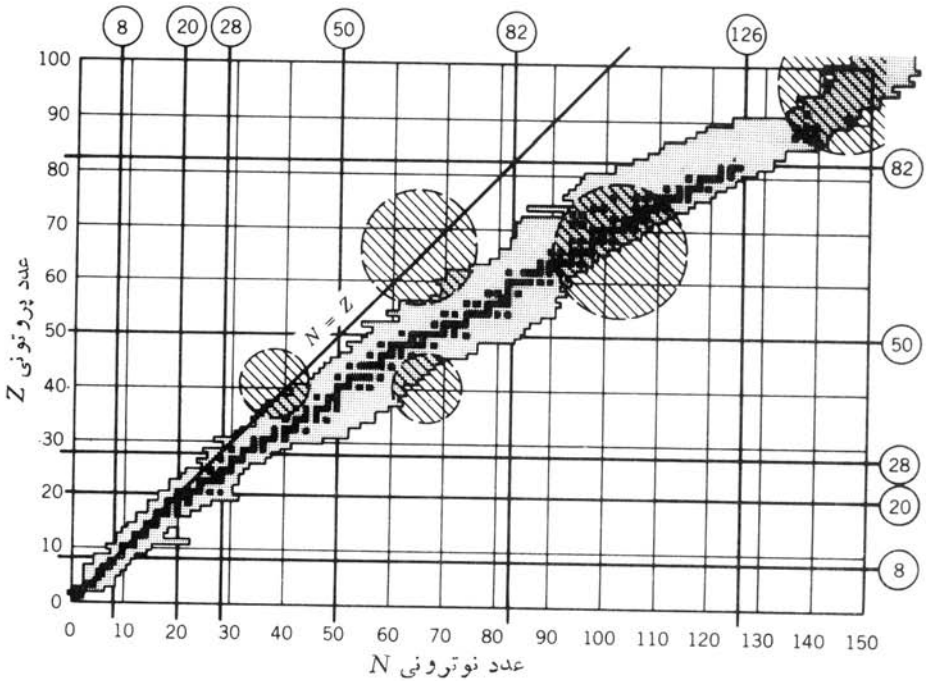
شکل ۲۳.۵ حالتهای ^{164}Er در انرژی پایینتر از ۲ MeV. اکثر حالتها را می‌توان در سه نوار دورانی جای داد که به ترتیب عبارت‌اند از: حالت پایهٔ هستهٔ تغییرشکل یافته، ارتعاش نوع گاما (که در آن ارتعاش سطوح برمحور تقارن عمود است)، و ارتعاش نوع بتا (که در آن ارتعاش سطوح به موازات محور تقارن است). منشأ بسیاری از حالتهای برانگیختهٔ دیگر را می‌توان در برانگیزش ذره‌ای زوج ـ شکن و نوارهای دورانی مربوط به آن جستجو کرد.

با توجه به شکل ۱۶.۵(الف) معلوم می‌شود که به‌استثنای مورد هسته‌های با پوستهٔ پر (که مدل جمعی برای آنها معتبر نیست)، مقادیر گشتاورمغناطیسی حالتهای 2^+ در سایر موارد بخوبی با این پیش‌بینی سازگار است.

به عنوان آخرین نکته در این آشنایی مختصر با حرکت جمعی هسته، باید بکوشیم که منشأ رفتارجمعی را با رهیافتی میکروسکوپیک‌تر درساختارهسته جستجو کنیم. این قضیه بویژه در مورد هسته‌های دورانی با تغییرشکل دائمی صادق است. قبلا دیده‌ایم که مدل پوسته‌ای را می‌توان بایك پتانسیل کروی متقارن بخوبی برای بسیاری ازهسته‌ها به‌کاربرد. وقتی‌که به هسته انرژی می‌دهیم، به‌آسانی می‌توانیم پتانسیل مدل پوسته‌ای را در اطراف وضع تعادل درحال ارتعاش تصور کنیم. دراین صورت، حرکت ارتعاشی هسته را به‌طور طبیعی می‌توان به‌کمك مدل پوسته‌ای بررسی کرد. چنانکه در بحث ازساختار ^{130}Sn در آغازاین بخش گفتیم،ساختار ارتعاشی‌جمعی‌را حتی‌با رهیافت میکروسکوپیك‌ترهم‌می‌توان

بررسی کرد. برای نمونه، می‌توان تمام نوکلئونهای ظرفیت (یعنی نوکلئونهای خارج از پوسته‌های بسته) را درنظر گرفت، تمام جفت‌شدگیهای ممکن که منجر به‌اسپین برابند 2^+ می‌شوند (از جمله آنهایی که زوج ـ شکن هستند) را پیدا کرد، وکوشید که ترکیب درست تابع‌موجهایی راکه نخستین حالت برانگیختهٔ مورد مشاهدهٔ 2^+ را تولید می‌کنند به‌دست آورد. اگر تعداد جفت‌شدگیهای ممکن زیاد باشد، این روش ممکن است از لحاظ ریاضی پیچیدگی داشته باشد. اما مدل پوسته‌ای مبنای این روش، اساساً اختلاف چندانی با مدل ذرهٔ کاملا مستقل که در بخش قبلی بررسی شد ندارد. این رهیافت برای هسته‌های کروی کارایی دارد، ولی به طور طبیعی به یك هستهٔ دورانی با تغییر شکل دائمی منجر نمی‌شود.

سؤال بسیار حساسی که در اینجا مطرح می‌شود این است: مدارهای مدل پوسته‌ای که بـا استفاده از پتانسیل کروی محاسبه می‌شوند، چگونه بـه یك هستهٔ غیرکروی منجر می‌شوند؟ با روی‌هم قراردادن یك نمودار «اعداد جادویی» و یك نمودار انواع هسته‌های شناخته شده، همچنانکه در شکل ۲۴.۵ می‌بینیم، بـه جواب این سؤال نزدیك می‌شویم.



شکل ۲۴.۵ مناطق هاشورخورده، نواحی دور از پوسته‌های پر هستند که انتظار داریم اثرات دسته‌جمعی تعداد زیادی از ذرات منفرد و ترکیب چندین حالت مدل پوسته‌ای به پیدایش یك تغییرشکل دائمی در هسته منجر شود. این‌گونه هسته‌های تغییرشکل یافته را در تمامی نواحی همپوشی بین‌مناطق هاشورخورده ومناطق مربوط به‌انواع هسته‌های شناخته شده شناسایی کرده‌اند.

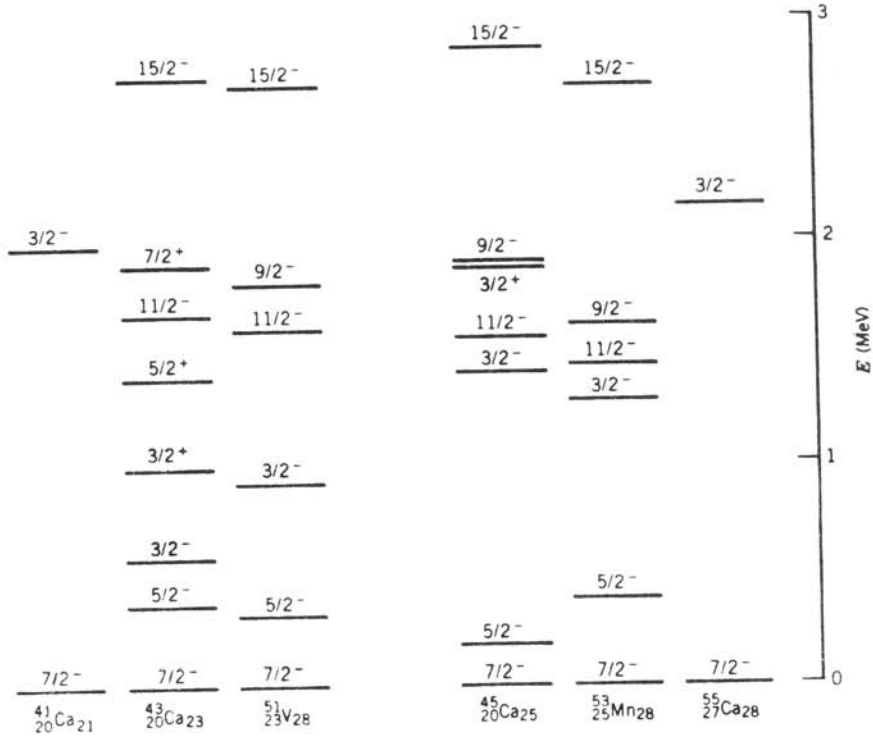
هسته‌های تغییرشکل‌یافته را فقط در نواحی دور از پوسته‌هـای کامل نوترونی و پروتونی می‌توان یافت. درست همان‌طور که تشریك مساعی چندزوج نوکلئونی خارج از پوستهٔ پر به ساختار میکروسکوپیك ارتعاشهای هسته‌های کروی منجـر می‌شد، تشریك‌مساعی چندین زوج از نوکلئونهای ظرفیت هـم می‌تواند آنچنان تغییری در هستهٔ مرکـزی نوکلئونها به‌وجود آورد که شکل تعادل هسته قویاً دگرگون شود.

۳.۵ مدلهای هسته‌ای واقعیتر

مدل پوسته‌ای هسته‌های A فرد ومدل جمعی هسته‌های زوج ـ زوج، هردو ایده‌آل‌سازیهایی هستندکه فقط به‌طورتقریبی برای هسته‌های واقعی قابل استفاده‌اند. ساختارهسته‌های واقعی خیلـی پیچیده‌تراز آن چیزی است که در ایـن مدلهای ساده مطرح می‌شود. بعلاوه، در هسته‌های واقعی نمی‌توان یك نوع ساختار را در نظر نگرفت و فقط نوع دیگر را مطرح کرد. از این‌رو، حتی درهسته‌های با خواص شدیداً جمعی نیز با اثرات ذرهٔ منفرد روبه‌رو می‌شویم. ضمناً بخش مرکـزی هسته‌های مدل پوسته‌ای هم می‌تواند در خواص جمعی آن نقشی داشته باشدکه تاکنون در این نوع بررسیها از آن صرفنظرکرده‌ایم. ساختار بسیاری از هسته‌ها را نمی‌توان به‌سادگی در یك گروه از دسته‌بندی دوگانهٔ ذرهٔ منفرد و حرکت جمعی قرارداد، بلکه معمولا لازم است که ترکیبی ازهردو مدل را برای توصیف ساختار هسته درنظر بگیریم. این مدل هسته‌ای وحدت‌یافته ازلحاظ ریاضی پیچیده‌تراز آن است که در اینجا مطرح شود، و به همین جهت ما در اینجا صرفاً برخی از خواص هسته‌ها را شرح می‌دهیم و می‌کوشیم رابطهٔ آنها را بـا وجوه بنیادیتر مدلهـای پوسته‌ای و جمعی نشان دهیم.

مدل پوسته‌ای چند ذره‌ای

در بررسی مدل پوسته‌ای، فقط اثرات ناشی از آخرین تك‌ذرهٔ تزویج‌نشده را در نظـر گرفتیم. رهیافت واقع‌بینانه‌تر برای هسته‌های A فرد این است که تمام ذرات خارج از پوسته‌های پر را در نظر بگیریم. برای نمونه هسته‌های Z فرد یا N فرد را درفاصلهٔ بین ۲۰ تا ۲۸ درنظر می‌گیریم که دراین صورت نوکلئونهای فرد در پوستهٔ $f_{7/2}$ قراردارند. برای سهولت، بحثمان را فقط به‌یك نوع نوکلئون محدود می‌کنیم و نوکلئون نوع دیگر را نه‌فقط باتعداد زوج بلکه بایك عدد جادویی در نظرمی‌گیریم. درشکل ۲۵.۵، حالتهای برانگیختهٔ انـرژی پایین را برای چندتـا از این هسته‌ها نشان داده‌ایم. هسته‌هایی کـه ساختارشان توسط یك ذرهٔ منفرد تعیین می‌شود (^{41}Ca و ^{55}Co)، ترازهای مورد انتظار را نشان می‌دهند: حالت پایهٔ $(7/2)^-$ که متناظر با ذرهٔ منفرد $f_{7/2}$ با پاریتهٔ فرد است (و یا متناظر با تهیجای نوکلئونی در ^{55}Co است، زیرا یك حفره یـا تهیجای منفرد در پوسته مانند یك ذرهٔ منفرد عمل می‌کند)؛ وحالت برانگیختهٔ $(3/2)^-$ درانرژی حدود ۲MeV



شکل ۲۵.۵ حالتهای برانگیختهٔ چند هسته که در پوستهٔ $f_{7/2}$ دارای نوکلئونهای ظرفیت‌اند. تمام ترازهای زیر ۲ MeV نموده شده‌اند، و حالت $^{-}(15/2)$ نیز بدانها افزوده شده است.

که با برانگیزش ذرهٔ منفرد با پاریتهٔ فرد به‌حالت $p_{3/2}$ متناظراست. هسته‌هایی که ۳ یا ۵ ذره در تراز $f_{7/2}$ دارند، طیف حالتهایشان خیلی غنیتراست، ومخصوصاً باید توجه داشت که حالتهای خیلی کم‌انرژی با پاریتهٔ منفی را نمی‌توان به کمك مدل پوسته‌ای تك‌ذره‌ای توضیح داد. برای نمونه اگرحالت $^{-}(5/2)$ از برانگیختگی یك ذرهٔ منفرد و انتقال آن به‌پوستهٔ $f_{5/2}$ حاصل‌شود، چون تراز $f_{5/2}$ بالاتر از تراز $p_{3/2}$ قرار می‌گیرد (شکل۶.۵) انتظار داریم که این حالت باانرژی بیش‌ازMeV ۲ ظاهر شود. پایینترین تراز $^{-}(5/2)$ در هسته‌های تك‌ذره در انرژی MeV ۲٫۶ (در مورد ^{41}Ca) و MeV ۳٫۳ (درمورد ^{55}Co) دیده می‌شود.

دراینجا برای نشان دادن پیکربندی nذره‌ای پوستهٔ $f_{7/2}$ از نمادگذاری اختصاری $(f_{7/2})^n$ استفاده می‌کنیم، و مقادیر برایند ممکن I را برای پیکربندی $(f_{7/2})^3$ مورد بررسی قرار می‌دهیم. (به‌خاطرتقارن بین ذرات وحفره‌ها، ترازهای مربوط به‌سه حفره یا پنج‌ذره در پوستهٔ $f_{7/2}$ با ترازهای سه ذره یکسان خواهد بود.) نوکلئونها چون اسپین نیم‌درست دارند، باید از اصل پاؤلی پیروی کنند، و در نتیجه هیچ دو ذره‌ای نمی‌توانند مجموعهٔ اعداد کوانتومی یکسان داشته باشند. تکانهٔ زاویه‌ای هر ذره در مدل پوسته‌ای

به صورت $j = ۷/۲$ توصیف می‌شود که تصاویر آن (m) در راستای z دارای مقادیر $\pm ۱/۲$، $\pm ۳/۲$، $\pm ۵/۲$، و $\pm ۷/۲$ است. بنابر اصل پاؤلی، مقادیر m برای این سه ذره با هم متفاوت است. در این صورت، فوراً معلوم می‌شود که حداکثر بزرگی تصویر برایند برای این سه ذره $(M = m_۱ + m_۲ + m_۳)$ برابر است با $+(۱۵/۲) = +(۳/۲) + (۵/۲) + (۷/۲)$ [اگر اصل پاؤلی را در نظر نگیریم، حداکثر بزرگی تصویر برایند برابر ۲۱/۲ خواهد شد]. بنابراین، انتظار می‌رود که در پیکربندی $(f_{۷/۲})^۳$ مقدار I متناظر به‌هیچ حالتی بزرگتر از ۱۵/۲ نباشد. بیشینهٔ تکانهٔ زاویه‌ای برایند در این مورد برابر $I = ۱۵/۲$ است که می‌تواند تمام مقادیر ممکن M را از $+۱۵/۲$ تا $-۱۵/۲$ به خود بگیرد. مقدار بعد از حداکثر M برابر ۱۳/۲ است که فقط از مجموع $+۷/۲ + ۳/۲ + ۳/۲$ و $+۷/۲ + ۵/۲ + ۱/۲$ قابل حصول است (مجموعه‌های $+۷/۲ + ۷/۲ - ۱/۲$ مجاز نیستند). این حالت منفرد $M = ۱۳/۲$ باید به همان M حالتی که قبلا به پیکربندی $I = ۱۵/۲$ نسبت دادیم متعلق باشد، یعنی امکان ندارد که برایندی به صورت $I = ۱۳/۲$ در این پیکربندی وجود داشته باشد. با ادامهٔ این بحث معلوم می‌شود که برای مقدار

$$M = +\frac{۱۱}{۲}\left(+\frac{۷}{۲}+\frac{۳}{۲}+\frac{۱}{۲} \text{ و } +\frac{۷}{۲}+\frac{۵}{۲}-\frac{۱}{۲}\right)$$

دوامکان وجود دارد، یعنی دوحالت ممکن برای $M = +۱۱/۲$ قابل تصور است: یکی از این دوحالت برای پیکربندی $I = ۱۵/۲$ است و دیگری حالتی است که به‌پیکربندی $I = ۱۱/۲$ نسبت می‌دهیم. با تکمیل این بحث، حالتهای ممکن برای پیکربندی $(f_{۷/۲})^۳$ یا $(f_{۷/۲})^۵$ را چنین به‌دست می‌آوریم: $I = ۱۵/۲, ۱۱/۲, ۹/۲, ۷/۲, ۵/۲, ۳/۲$. چون هر ذره از پیکربندیهای سه ذره‌ای یا پنج ذره‌ای پاریتهٔ منفی دارد، پاریتهٔ برایند به‌صورت $(-۱)^۳$ است. هسته‌هایی که در شکل ۲۵.۵ نشان داده شده‌اند، حالتهای کم‌انرژی با پاریتهٔ منفی را با اسپینهای مورد انتظار نشان می‌دهند [همچنین عدم امکان حالتهای $(۱/۲)^-$ و $(۱۳/۲)^-$ نیز چنانکه انتظار می‌رود، مشخص شده است].

این تحلیل اگرچه نسبتاً موفق است، ولی کامل نیست. در صورتی که تمام ذرات ظرفیتی را واقعاً مستقل و معادل در نظر بگیریم، انرژی هر تراز باید مستقل از سمتگیری مقادیر متفاوت m باشد. این بدان معنی است که تمامی برایندهای I باید انرژی یکسان داشته باشند. این نتیجه‌گیری حتی به‌طور تقریبی هم درست نیست. مثلا در مورد چندتایهٔ $(f_{۷/۲})^۳$، فاصلهٔ انرژی بین بالاترین و پایینترین تراز انرژی برابر ۲٫۷ MeV است که مقدار آن درهمان حدود انرژی برهم‌کنشهای زوج‌شکنی و برانگیزش ذره‌ای است. این گونه شکافتگی انرژی را با فرض برهم‌کنش باقیمانده بین ذرات ظرفیت می‌توان توضیح داد. بدین‌ترتیب، ساختار تراز انرژی این هسته‌ها وسیله‌ای برای بررسی برهم‌کنش نوکلئون-نوکلئون دریك محیط جدید دراختیار ما می‌گذارد که با آنچه در بررسی نوکلئون آزاد در فصل ۴ دیدیم متفاوت است.

به‌عنوان آخرین کلام، یکی دیگر از ویژگیهای عام پیکربندیهای n ذره‌ای یك پوسته را بدون اثبات در اینجا ذکر می‌کنیم. این نکته که با آزمون تجربی قابل تحقیق است، بدین صورت است که گشتاورمغناطیسی هر پیکربندی متناسب با تکانهٔ زاویه‌ای آن I خواهد بود. یعنی اگر دو حالت مختلف ۱ و ۲ متعلق به‌یك پیکربندی مشخص را در نظر بگیریم، داریم

$$\frac{\mu_1}{\mu_2}=\frac{I_1}{I_2} \qquad (۲۱.۵)$$

متأسفانه تعداد موارد کاملا مشخص گشتاورمغناطیسی حالت برانگیخته کمتر از آن است که این پیش‌بینی قابل تحقیق باشد. در مورد ^{51}V می‌دانیم که گشتاورمغناطیسی حالت پایه برابر $\mu=+5.1514\pm0.0001\mu_N$ و گشتاور نخستین حالت برانگیخته برابر $\mu=+3.86\pm0.33\mu_N$ است. نسبت بین این دو گشتاور برابر 1.33 ± 0.11 می‌شود که با نسبت مورد انتظار $(7/2)/(5/2)=1.4$ سازگار است. نسبت بین گشتاورها برای همان حالتها در مورد ^{53}Mn برابر

$$\frac{5.024\pm0.007\mu_N}{3.25\pm0.30\mu_N}=1.55\pm0.14$$

می‌شود. بدین گونه می‌توان گفت که شواهد حاصل از گشتاورمغناطیسی، فرض اولیهٔ ما را دربارهٔ ماهیت این حالتها تأیید می‌کند.

حالتهای تك ـ ذره‌ای در هسته‌های تغییرشکل یافته

ترازهای انرژی مدل پوسته‌ای هسته بر پایهٔ فرض کروی بودن پتانسیل هسته‌ای محاسبه می‌شوند. اما می‌دانیم که این فرض برای هسته‌های موجود در گسترهٔ $150\leqslant A\leqslant 190$ و $A>230$ درست نیست. برای این گونه هسته‌ها باید از پتانسیلی در مدل پوسته‌ای استفاده کنیم که تقریبی از شکل واقعی هسته، یعنی بیضیوار دوار، باشد. درمحاسبات معادلهٔ شرودینگر با پتانسیل غیرکروی، تکانهٔ زاویه‌ای l دیگر به‌صورت عدد کوانتومی «خوب» نیست. یعنی، حالتهای پتانسیل غیرکروی را نمی‌توان مثل مورد مدل پوسته‌ای کروی با نمادهای طیف‌نمودی (s، p، d، f، وغیره) مشخص کرد. به‌عبارت دیگر، حالتهای حاصل ازمدل غیرکروی به‌صورت مخلوطی ازمقادیرمختلف l هستند (که با درنظر گرفتن پاریته، انتظار داریم این مخلوط فقط از مقادیر زوج l یا فقط از مقادیر فرد l تشکیل شود).

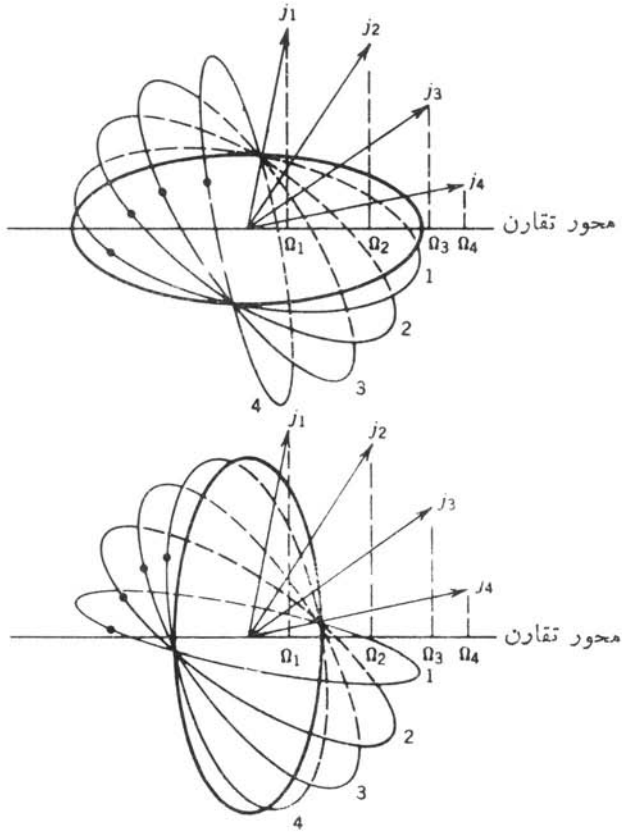
در مورد پتانسیل کروی، ترازهای انرژی هر حالت از ذرهٔ منفرد دارای واگنی $(2j+1)$ است. (این بدان معنی است که تمامی سمتگیریهای بردار $\mathbf{j}$ که تعداد آنها نسبت به‌هر محور دلخواه به $2j+1$ می‌رسد، با هم معادل هستند.) این واگنی ترازها یا هم‌ارزی سمتگیریها، دیگر برای پتانسیلی که تغییرشکل داده است معتبر نیست و ترازهای انرژی پتانسیل تغییر شکل یافته به سمتگیری فضایی مدار بستگی دارد. دقیقتر بگوییم،

انرژی هر تراز به مؤلفهٔ **j** در راستای محور تقارن قلب هسته بستگی پیدا می‌کند. برای نمونه، یك نوکلئون $f_{7/2}$ می‌تواند دارای هشت مؤلفهٔ مجاز **j** باشد که مقدار آنها از $-7/2$ تا $+7/2$ تغییر می‌کند. این مؤلفهٔ **j** در راستای محور تقارن را عموماً با Ω نشان می‌دهند. چون هسته‌ها نسبت به جهات دوگانهٔ محور تقارن دارای تقارن آینه‌ای هستند، انرژی مؤلفه‌های $+\Omega$ و $-\Omega$ با هم مساوی و در نتیجه واگنی هر تراز برابر ۲ خواهد شد. یعنی اگر پتانسیل مرکزی تغییرشکل پیدا کند، حالتی که قبلا با نماد $f_{7/2}$ مشخص شد به‌چهارحالت شکافته می‌شود که عبارت‌اند از $\Omega = 1/2, 3/2, 5/2, 7/2$ که پاریتهٔ همهٔ آنها منفی است. «مدار»های مجاز مختلف ذرهٔ فرد را برای تغییرشکلهای کشیده و پخت در شکل ۲۶.۵ نشان داده‌ایم. در تغییرشکل کشیده، مداری که کوچکترین مقدار ممکن Ω (مساوی ۱/۲) را داراست قویترین برهم‌کنش را با قلب هسته خواهد داشت، بدین ترتیب بستگی این مدار از همه بیشتر و انرژی آن از همه پایینتر است. در تغییرشکل پخت، با وضعیت متفاوتی روبه‌رو می‌شویم. در این مورد، مداری که بزرگترین مقدار Ω (مساوی j) را داراست قویترین برهم‌کنش و پایینترین انرژی ممکن را خواهد داشت. چگونگی شکافته‌شدن حالتهای $f_{7/2}$، دراثر افزایش تغییرشکل هسته، درشکل ۲۷.۵ نموده شده است.

البته باید به خاطر داشته باشیم که شکلهای ۲۶.۵ و ۲۷.۵ چندان دقتی ندارند، زیرا اعداد کوانتومی l و j که با استفاده از پتانسیل کروی برای ذرهٔ منفرد به دست آمده‌اند در مورد پتانسیل تغییرشکل‌یافته فاقد اعتبارند. برای مثال، حالت پاریته ـ منفی $\Omega = 5/2$ را نمی‌توان همان حالت $f_{7/2}$ دانست، هرچند که وقتی $\beta \to 0$ تفاوت بین این دوحالت ازمیان می‌رود. تابع‌موج حالت $\Omega = 5/2$ را می‌توان به صورت مخلوطی (یا یك ترکیب خطی) از تعداد زیادی l و j مختلف نوشت (برای آنکه مؤلفهٔ ۵/۲ حاصل شود، فقط مقادیر $j \geqslant 5/2$ را باید در نظر گرفت). معمولا تقریب را به‌صورتی درنظر می‌گیرند که پوسته‌های اصلی مختلف نوسانگر (شکلهای ۴.۵ و ۶.۵) باهم مخلوط نمی‌شوند. بنابراین، برای نمونه، حالت $\Omega = 5/2$ که در شرایط $\beta \to 0$ به‌سمت تراز $2f_{7/2}$ میل می‌کند، فقط شامل بعضی از حالتهای پوستهٔ پنجم نوسانگر ($2f_{5/2}$، $2f_{7/2}$، $1h_{9/2}$، $1h_{11/2}$) خواهد بود. پوسته‌های چهارم و ششم نوسانگر، پاریتهٔ متقابل دارند و درنتیجه قابل اختلاط نیستند. پوسته‌های پاریته ـ فرد بعدی نیزخیلی ازهم فاصله دارند و نمی‌توانند بخوبی با هم مخلوط شوند. اگر تابع‌موجهای کروی را با ψ_{Nlj} نشان دهیم، باید داشته باشیم

$$\psi'(\Omega) = \sum_{lj} a(Nlj)\psi_{Nlj} \qquad (۲۲.۵)$$

که در آن $\psi'(\Omega)$ معرف تابع‌موج حالت تغییرشکل‌یافتهٔ Ω است و $a(Nlj)$ ضرایب بسط هستند. برای حالت $\Omega = 5/2$ داریم

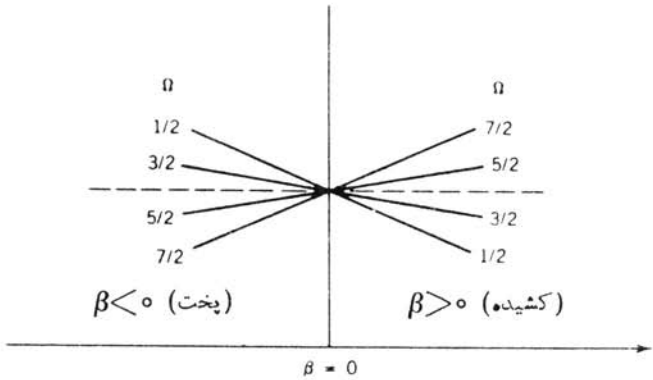


شکل ۲۶.۵ مدارهای ذرهٔ منفرد بـا $j=7/2$ و تصاویر مجاز آن در راستای محور تقارن. تغییرشکل کشیده در بالا و تغییرشکل پخت در پایین نشان داده شده‌است. تصاویرمجاز عبارت‌اند از $\Omega_1=1/2$ ، $\Omega_2=3/2$ $\Omega_3=5/2$ و $\Omega_4=7/2$. (برای وضوح شکل، فقط تصاویر مثبت را نشان داده‌ایم.) توجه داشته باشید که در مورد هستهٔ کشیده، مدار ۱ (به‌طور متوسط) از همهٔ مدارهای دیگر به‌قلب هسته نزدیکتر است واز همه قویتر با آن برهم‌کنش می‌کند، درحالی‌که درمورد هستهٔ پخت، مدار ۴ قویترین برهم‌کنش را با قلب هسته خواهد داشت.

$$\psi'(\Omega)=a\left(53\frac{5}{2}\right)\psi_{53\frac{5}{2}}+a\left(53\frac{7}{2}\right)\psi_{53\frac{7}{2}}+a\left(55\frac{9}{2}\right)\psi_{55\frac{9}{2}}$$

$$+a\left(55\frac{11}{2}\right)\psi_{55\frac{11}{2}} \qquad (23.5)$$

ضرایب $a(Nlj)$ را می‌توان از حل معادلهٔ شرودینگر با پتانسیل تغییرشکل‌یافته به‌دست آورد، کـه محاسبهٔ آن نخستین بار در سال ۱۹۵۵ توسط نیلسون انجام شد. مقدار این



شکل ۲۷.۵ نتیجهٔ سمتگیریهای مختلف مدار $f_{7/2}$ را مستقیماً در ایـن شکل نشان داده‌ایم. چنانکه درشکل۲۶.۵ دیده می‌شود، مداری که مؤلفه‌اش در راستای محور تقارن برابر $\Omega=1/2$ است قویترین برهم‌کنش را با قلب هستهٔ کشیده دارد، و درنتیجه انرژی آن از همهٔ مدارهای دیگر کمترمی‌شود. درموردقلب هستهٔ پخت، مداری که مؤلفهٔ آن برابر $\Omega=7/2$ باشد پایینترین انرژی را داراست.

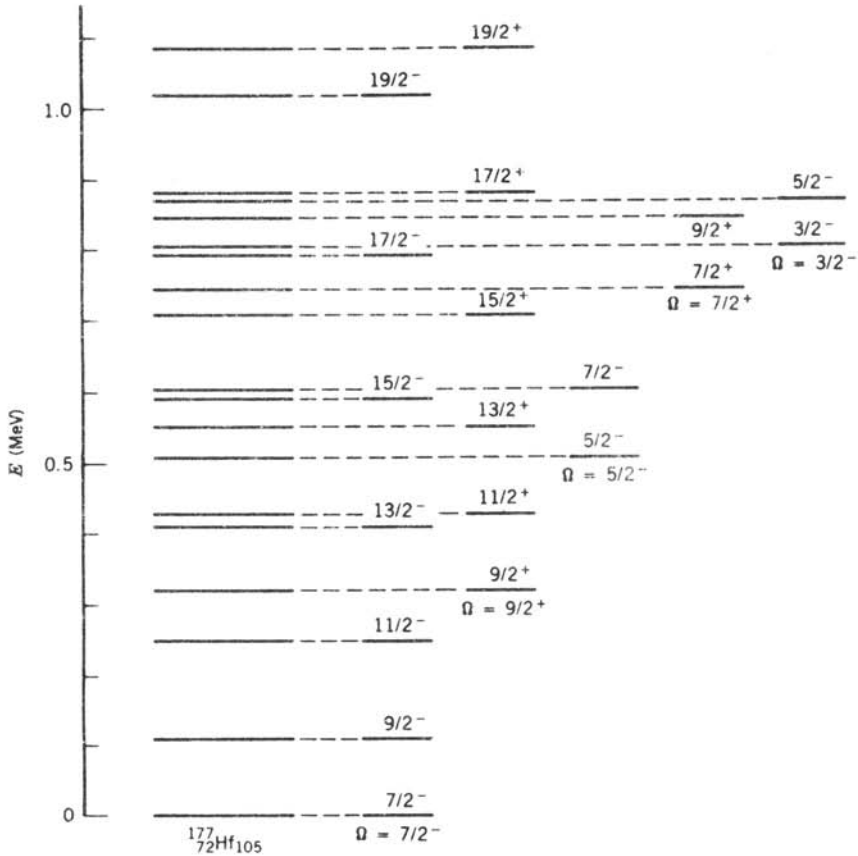
ضرایب به تبعیت از β تغییر می‌کند، و طبعاً انتظار داریم کـه به‌ازای $\beta \to ۰$ مقدار $a[۵۳(۷/۲)]$ به ۱ میل کند و ضرایب دیگر همگی صفر شوند. به‌ازای $\beta=۰٫۳$ (که معرف یك نمونه از تغییرشکل کشیده است)، نیلسون مقادیر ایـن ضرایب را برای تراز $\Omega=۵/۲$ که دراینجا مورد بحث است، به‌صورت زیر به‌دست آورد

$$a\left(۵۳\frac{۵}{۲}\right)=۰٫۲۶۷ \qquad a\left(۵۳\frac{۷}{۲}\right)=۰٫۸۳۲$$

$$a\left(۵۵\frac{۹}{۲}\right)=۰٫۴۱۵ \qquad a\left(۵۵\frac{۱۱}{۲}\right)=-۰٫۲۵۵$$

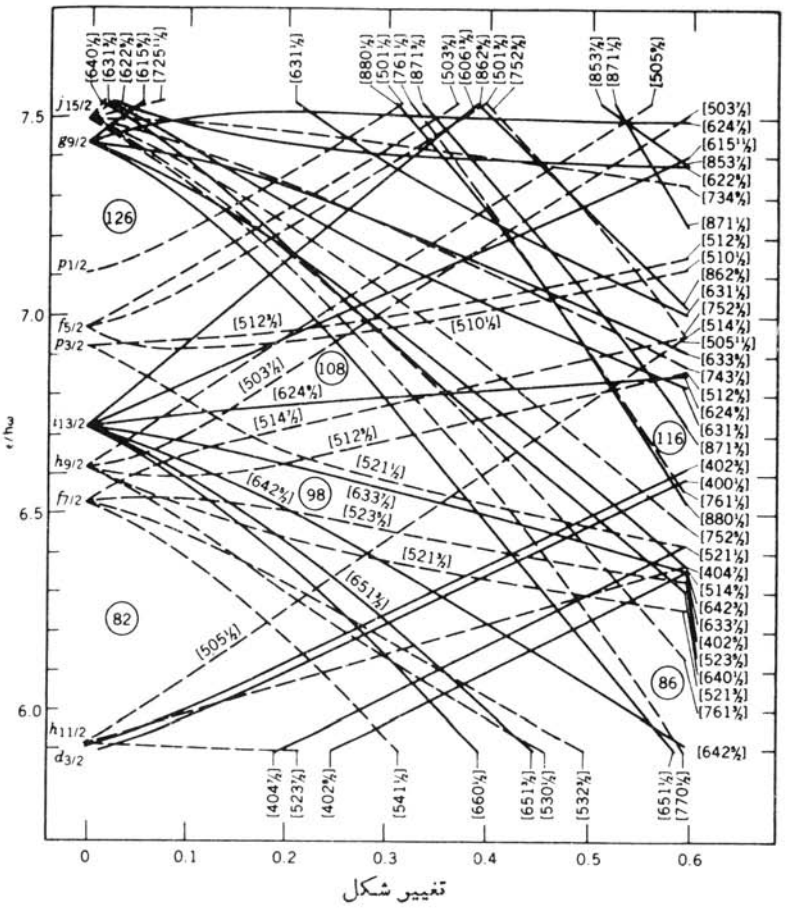
وقتی که این تابع‌موجهای حالتهای تك ـ ذرهٔ هسته‌های تغییرشکل‌یافته را دراختیار داشته باشیم، آنگاه می‌توانیم هسته‌ها را در حال دوران در نظر بگیریم. دراین صورت، برای هرحالت ذرهٔ منفرد یك سری حالتهای دورانی به دست می‌آوریم که فاصلهٔ انرژی بین آنها بـا عبارت $I(I+۱)$ متناسب است. در پایینترین حالت نوار دورانی $I=\Omega$ است، وتکانهٔ زاویه‌ای حالتهای متوالی، با افزایش انرژی دوران، به‌صورت Ω، $\Omega+۱$، $\Omega+۲$، ... افزایش می‌یابد. شکل۲۸.۵ ترازهای انرژی هستهٔ ^{۱۷۷}Hf را نشان می‌دهد. در ایـن هسته، علاوه‌بر دو نوار دورانی کاملا مشخص، چند حالت تك ـ ذره‌ای دیگر هم مشاهده شده است.

برای تعبیرترازهای تك ـ ذرهٔ مشاهده‌شده، به‌نموداری مشابه شکل ۲۷.۵ نیازمندیم که تمام حالتهای مجاز تك ـ ذره و چگونگی تغییرانرژی آنها را برحسب تغییرشکل هسته



شکل ۲۸.۵ ترازهای انرژی ^{۱۷۷}Hf. همانند مورد ^{۱۶۴}Er (در شکل ۲۳.۵)، با استفاده از وضعیت اسپین ـ پاریته می‌توان حالتها را به‌صورت نوارهای دورانی دسته‌بندی کرد. در پایینترین حالت هر نوار $I=\Omega$ است و فاصلهٔ انرژی حالتهای بالاتر از $I(I+1)$ به‌دست می‌آید.

نشان دهد. شکل ۲۹.۵ چنین نموداری را برای حالتهای نوترونی هسته‌های موجود در ناحیهٔ $۱۵۰ \leqslant A \leqslant ۱۹۰$ نشان می‌دهد. با توجه به اینکه واگنی هر یك از ترازهای ذرهٔ منفرد درهستهٔ تغییر شکل‌یافته برابر ۲ است، درست مانند آنچه درمورد مدل پوسته‌ای با پتانسیل کروی عمل کردیم، در هرحالت دونوترون قرارمی‌دهیم تا به $N=۱۰۵$ برسیم و همین‌طور درهرحالت دو پروتون می‌گذاریم تا به $Z=۷۲$ برسیم. اکنون به‌دلیل تزویج نوکلئونی ازحالتهای تك ـ ذره‌ای پروتونها صرفنظر می‌کنیم، و به بررسی ترازهای مجاز یکصد و پنجمین نوترون در هستهٔ تغییرشکل یافته‌ای با مقدار مثلا $\beta \approx ۰٫۳$ می‌پردازیم. چنانکه در نمودار می‌بینیم، ترازهای انتظاری تك ـ ذره دقیقاً با ترازهای مشاهده شده در ^{۱۷۷}Hf مطابقت دارند.



شکل ۲۹.۵ ترازهای انرژی نوترونها دریك پتانسیل تغییرشکل‌یافتهٔ کشیده. تغییرشکل را اساساً با پارامتر β براورد می‌کنند. اعداد درون قلابها نمایانگر حالتها هستند؛ در اینجا فقط اولین عدد که همان عدد کوانتومی اصلی N مربوط به پوستهٔ نوسانگر و معرف پاریتهٔ حالت $(-1)^N$ است و همچنین آخرین عدد که همان مؤلفهٔ Ω است، مورد توجه ماست. خطوط پر حالتهای با پاریتهٔ زوج، وخط‌چینها حالتهای با پاریتهٔ فرد را نشان می‌دهند. برای تغییرشکل بین ۲ر۰ و ۳ر۰ (که معرف تغییرشکل نوعی‌هسته‌های موجود دراین‌ناحیه است)، یکصدوپنجمین نوترون ^{177}Hf درحالت [۵۱۴(۷/۲)] یعنی یك‌حالت پاریته ـ فرد که درآن $\Omega=7/2$ است، قرار می‌گیرد. یك برانگیزش کوچك کافی است که این نوترون را به‌حالت [۶۲۴(۹/۲)] که یك حالت پاریته ـ زوج و $\Omega=9/2$ است، برساند. هـر دو حالت ذاتی (و نوارهـای دورانی مربوط به‌آنها) را می‌توان درشکل ۲۸.۵ مشاهده کرد. حالتهای دیگری که در ^{177}Hf مشاهده می‌شوند، ازشکست زوج نوترونی یك حالت پایینتر و برانگیختگی یکی ازآنها و تزویج آن با نوترون $-(7/2)$ حاصل می‌شوند. بدین‌گونه، مثلا، می‌توان یك نوترون منفرد در حالت [۵۱۲(۵/۲)] به‌دست آورد که نمایشگر حالت پاریته - فرد $\Omega=5/2$ در ^{177}Hf است.

بنابراین، ساختار کلی هسته‌های تغییرشکل‌یافتهٔ A فرد با نوارهای دورانی مشخص می‌شود. این نوارها را براساس حالتهای تك ـ ذره که با استفاده از پتانسیل مدل‌پوسته‌ای تغییرشکل‌یافته محاسبه می‌شوند، می‌توان تعیین کرد. حالتهای نوترون وپروتون(با استقرار دو نوکلئون در هرحالت) پر می‌شوند، و خواص هسته با استفاده از خواص ذرهٔ منفرد در مدل تك ذره قابل براورد است. این مدل که تابع‌موجهای آن توسط نیلسون محاسبه شده‌است، درتوجیه خواص هسته‌های موجود دراین ناحیه موفقیت چشمگیری داشته‌است. به‌طورکلی می‌توان گفت که محاسبات مبتنی برخواص ذرهٔ منفرد،برای ناحیهٔ تغییرشکل‌یافته بسیار موفقتر از ناحیهٔ هسته‌های کروی بوده است.

دراین فصل، نمونه‌هایی از ساختار هسته‌ای را که مبتنی برخواص ایستای هسته‌ها بوده‌اند بررسی کرده‌ایم که‌اهم آنها عبارت‌اند از: ترازهای‌انرژی، وضعیت اسپین‌ـپاریته، گشتاور دوقطبی مغناطیسی وچارقطبی الکتریکی. با استفاده از تابع‌موجهای حاصل ازحل معادلهٔ شرودینگر در مدلهای مختلف می‌توان بسیاری از ویژگیهای دیگر ساختار هسته‌ای، از جمله گذار بین حالتهای هسته‌ای متفاوت را محاسبه کرد. اغلب مشاهده می‌شود که اگر برای نمونه بخواهیم فقط بـا استفاده از ترازهای انرژی شواهدی برای ساختار جمعی فراهم آوریم ممکن است تلاشمان بی‌نتیجه بماند، در حالی که استفاده از احتمال گذار بین حالتهای برانگیخته وجود اثرات جمعی را به‌طور قطعی ثابت می‌کند. همچنین ممکن است با مواردی روبه‌رو شویم که یك حالت برانگیختهٔ خاص به‌راههای مختلف قابل‌تعبیر باشد. حالت ارتعاشی یـا جفت‌شدگی دو ذره‌ای را می‌توان به عنوان نمونه‌هایی از این موارد یادآور شد. معمولا با بررسی احتمال گذار، می‌توانیم تعبیرهای مختلف را با هم مقایسه کنیم و نقاط قوت و ضعف آنها را دریابیم. بنابراین بررسی کامل ساختار هسته‌ای مستلزم مطالعهٔ واپاشیهای رادیواکتیو و واکنشهای هسته‌ای است که اولی گذارخودبه‌خودی بین حالتها را نشان می‌دهد، و در دومی آزمایشگر می‌تواند حالتهای ابتدایی و نهایی را به میل خود انتخاب کند. در این دو زمینهٔ تحقیقی، مـا می‌توانیم احتمالهای واپاشی و واکنش را محاسبه و بـا مقادیر تجربی آنها مقایسه کنیم، و بدین‌گونه ساختار حالتهای هسته‌ای را مورد پژوهش قرار دهیم. قسمت اعظم باقیماندهٔ این کتاب، به‌مطالعهٔ روشهای متداول در هر یك از این دو شاخهٔ طیف‌نمایی هسته‌ای اختصاص خواهد داشت.

مراجع مطالعات تکمیلی

کتابهای درسی فیزیك هسته‌ای که شامل مطالب پیشرفته‌تر ومفصلتر دربارهٔ مدلهای هسته‌ای هستند، عبارت‌اند از

B. L. Cohen, *Concepts of Nuclear Physics* (New York: McGraw-Hill, 1971), ترجمهٔ فارسی این کتاب تحت عنوان مفاهیم فیزیك هسته‌ای در سال ۱۳۷۰ توسط مرکز نشر دانشگاهی منتشر شده است.ـو.

H. Frauenfelder, E. M. Henley, *Subatomic Physics* (Englewood Cliffs, NJ : Prentice - Hall, 1974),

ترجمهٔ فارسی این کتاب تحت عنوان فیزیك زیر اتمی بزودی توسط مرکز نشر دانشگاهی منتشر خواهد شد.ـو.

M. A. Preston, *Physics of Nucleus* (Reading, MA : Addison - Wesley, 1962).

دو اثر تك‌نگاری زیر به ترتیب دربارهٔ مدل پوسته‌ای و مدل جمعی نوشته شده‌اند. مؤلفان از برندگان جایزهٔ نوبل هستند که به‌خاطر کارشان درمدلهای هسته‌ای به‌دریافت این جایزه نایل شده‌اند.

M. G. Mayer, J. H. D. Jensen, *Elementary Theory of Nuclear Shell Structure* (New York : Wiley, 1955),

A. Bohr, B. R. Mottelson, *Nuclear Structure* (Reading, MA : Benjamin, 1975).

مرجع زیر یکی دیگر از کتابهای پیشرفته و جامع است

J. M. Eisenberg, W. Greiner, *Nuclear Models* (Amsterdam : North - Holland, 1970).

مسائل

۱. با استفاده از مدل پوسته‌ای، وضعیت پاریته و اسپین انتظاری حالتهای پایه را درهسته‌های زیر مشخص کنید: (الف) ^{7}Li، (ب) ^{11}B، (ج) ^{15}C، (د) ^{17}F، (ه) ^{31}P، (و) ^{141}Pr.

۲. ترازهای پایین در هستهٔ ^{13}C عبارت‌اند از: حالت پایه $(1/2)^-$، حالت $(1/2)^+$ با انرژی ۳٫۰۹ MeV ، حالت $(3/2)^-$ با انرژی ۳٫۶۸ MeV، حالت $(5/2)^+$ با انرژی ۳٫۸۵ MeV. حالتهای دیگر درحدود انرژی ۷ MeV و بالاتر هستند. تعبیر این چهار حالت را براساس مدل پوسته‌ای بیان کنید.

۳. بنابرنمودار تراز انرژی شکل ۶.۵، برای حالت پایهٔ ^{203}Tl $(Z=81)$ انتظارداریم که $I^{\pi}=(11/2)^-$ شود، ولی وضعیت مشاهده شده به صورت $(1/2)^+$ است. در مورد هسته‌های ^{207}Pb $(N=125)$ و ^{199}Hg $(N=119)$ هم با شرایط مشابهی روبه‌رو می‌شویم: وضعیت انتظاری این هسته‌ها $(13/2)^+$ و وضعیت مشاهده شده $(1/2)^-$ است. به‌فرض آنکه نیروی تزویج قویاً برحسب l افزایش یابد، پیکربندی مدل پوسته‌ای این هسته‌ها را که با وضعیت مشاهده شدهٔ اسپین ـ پاریته سازگار باشد مشخص کنید.

۴. شکل ۶.۵، متوسط حالتهای تك‌ذره‌ای مدل پوسته‌ای را فقط به‌طور کلی نشان می‌دهد. انرژی حالتها برحسب تعداد نوترونها و پروتونهای هسته تغییر می‌کند. برای نشان

دادن این اثر، حالتهای پنجاه و یکمین پروتون را در ایزوتوپهای Sb درنظر بگیرید. به‌همان شیوهٔ شکل ۲۵.۵، نموداری تهیه کنید که حالتهای $(5/2)^+$ و $(7/2)^+$ را در هسته‌های ^{113}Sb و ^{133}Sb نشان دهد. (برای کسب اطلاعات مربوط به ترازهای انرژی به‌جدول ایزوتوپها رجوع کنید.) مواضع نسبی حالتهای پروتونی $g_{7/2}$ و $d_{5/2}$ را به‌صورت تابعی از تعداد نوترون مورد بحث قرار دهید.

۵. در مدل پوسته‌ای تك ذره، حالت پایهٔ یك هسته با تعداد فرد پروتون و نوترون را از جفت‌شدگی حالتهای پروتون و نوترون در این مدل تعیین می‌کنند: $\mathbf{I}=\mathbf{j}_p+\mathbf{j}_n$. هسته‌های $^{16}N-2^-$، $^{12}B-1^+$، $^{34}P-1^+$، و $^{28}Al-3^+$ را در نظر بگیرید. با رسم نمودارهای برداری ساده این جفت‌شدگیها را نشان دهید، وسپس $\mathbf{j}_p$ و $\mathbf{j}_n$ را به‌ترتیب با $\mathbf{l}_p+\mathbf{s}_p$ و $\mathbf{l}_n+\mathbf{s}_n$ جایگزین کنید. با بررسی نمودارهای این چهار هسته، برای سمتگیری نسبی $\mathbf{s}_p$ و $\mathbf{s}_n$ در حالت پایه یك قاعدهٔ تجربی به دست آورید. سرانجام، با استفاده از قاعدهٔ تجربی به دست آمده، وضعیتهای I^π را در ^{26}Na و ^{28}Na پیش‌بینی کنید.

۶. (الف) اگر انرژی یك حالت تك‌ذره درغیاب برهم‌کنش(شکافتگی) اسپین-مدار برابر E_0 باشد، انرژی هر یك از اعضای دوتایهٔ اسپین-مدار را که اختلاف انرژیشان از معادلهٔ (۴.۵) به‌دست می‌آید پیدا کنید. (ب) نشان دهید که «گرانیگاه» این دوتایه روی E_0 قرار دارد.

۷. گشتاور چارقطبی انتظاری $^{209}Bi(9/2)^-$ را براساس مدل پوسته‌ای محاسبه کنید، و آن را با مقدار تجربی $-0.37\,b$ مقایسه کنید.

۸. مقادیر انتظاری گشتاور دوقطبی مغناطیسی هسته‌های زیر را با استفاده از مدل پوسته‌ای محاسبه و آن را با مقادیر تجربی زیر مقایسه کنید:

هسته	I^π	μ تجربی (μ_N)
^{75}Ge	$\left(\frac{1}{2}\right)^-$	$+0.510$
^{87}Sr	$\left(\frac{9}{2}\right)^+$	-1.093
^{91}Zr	$\left(\frac{5}{2}\right)^+$	-1.304
^{47}Sc	$\left(\frac{7}{2}\right)^-$	$+5.34$
^{147}Eu	$\left(\frac{11}{2}\right)^-$	$+6.06$

۹. بسامد ارتعاشی متناظر به‌نمونه‌ای از ارتعاشات چارقطبی را حساب کنید. با در نظر گرفتن مقادیر نمونهٔ طول‌عمر واپاشی حالتهای 2^+ درهسته‌های ارتعاشی (این مقادیر را می‌توان در جدول ایزوتوپها پیدا کرد)، نتیجه‌گیری کنید که واپاشیها در مقایسه با ارتعاشات هسته‌ای به‌طور کلی درزمان طولانیتر یا کوتاهتری اتفاق می‌افتند. چنانکه در معادلهٔ (۱۳.۵) دیده می‌شود، اگر α نمایشگر دامنهٔ ارتعاش باشد، آیا می‌توان کمیتهای متناسب با $\langle\alpha\rangle$ را مشاهده کرد؟ متناسب با $\langle\alpha^2\rangle$ را چطور؟

۱۰. با مشخص کردن فهرست حالتهای ممکن m برای سه فونون چارقطبی $(l=2)$ و ترکیبهای قرینهٔ آنها، نشان دهید که حالتهای برایند مجاز عبارت‌اند از: 0^+، 2^+، 3^+، 4^+، و 6^+.

۱۱. حجم هسته‌ای را که سطح آن از معادلهٔ (۱۴.۵) به‌دست می‌آید تعیین کنید.

۱۲. یك هستهٔ بیضوی با توزیع بار یکنواخت را درنظر بگیرید که سطح آن با معادلهٔ (۱۴.۵) مشخص می‌شود. نشان دهید که گشتاور چارقطبی الکتریکی این هسته که با معادلهٔ (۳۶.۳) تعریف می‌شود، به‌صورت معادلهٔ (۱۶.۵) درمی‌آید.

۱۳. ترازهای انرژی ^{174}Hf دارای دو نوار دورانی مشابه به‌صورت زیراست:

	$E(0^+)$	$E(2^+)$	$E(4^+)$	$E(6^+)$	$E(8^+)$	$E(10^+)$	$E(12^+)$
نوار۱:	۰	۰٫۰۹۱	۰٫۲۹۷	۰٫۶۰۸	۱٫۰۱۰	۱٫۴۸۶	۲٫۰۲۱
نوار۲:	۰٫۸۲۷	۰٫۹۰۰	۱٫۰۶۳	۱٫۳۰۷	۱٫۶۳۰	۲٫۰۲۶	۲٫۴۸۹

(مقادیر بالا برحسب MeV داده شده‌اند). گشتاورلختی این دونوار را باهم مقایسه کنید، و دربارهٔ اختلاف آنها اظهارنظر کنید.

۱۴. اختلاف بین ترازهای انرژی پایین درهسته‌های ^{17}O و ^{19}O به‌علت وجود حالتهای $I^\pi=(9/2)^+$ و $I^\pi=(3/2)^+$ درهستهٔ ^{19}O است. این دو حالت درهستهٔ ^{17}O دیده‌نمی‌شوند. نشان دهید که این دوحالت ممکن‌است از پیکربندی $(d_{5/2})^3$ حاصل شوند که در هستهٔ ^{17}O مورد انتظار نیستند.

۱۵. هستهٔ ^{24}Mg دارای یك‌حالت برانگیختهٔ‌اول 2^+ در انرژی ۱٫۳۶۹ MeV و یك حالت برانگیختهٔ دوم 4^+ در انرژی ۴٫۱۲۳ MeV است. گشتاور دوقطبی مغناطیسی حالت 2^+ برابر $1.02\mu_N$ و گشتاور چارقطبی الکتریکی آن برابر -0.27 b است. کدام‌یك ازمدلهای هسته‌ای می‌تواند توصیفی دقیق ازاین حالتها به‌دست دهد؟ انتخاب خود را با محاسبهٔ پارامترهای خاص مدل موردنظر توجیه کنید.

قسمت ۲

واپاشی هسته‌ای و رادیواکتیویته

٦

واپاشی رادیواکتیو

واپاشی رادیواکتیو کانیهای طبیعی حاوی اورانیم وتوریم تا حدود زیادی منشأ مطالعات اولیهٔ فیزیك هسته‌ای بوده است. این واپاشیها دارای نیمه‌عمرهایی درحدود عمرزمین‌اند، که این امر نمایانگر باقی ماندن این مواد از دوران اولیهٔ پیدایش ماده در اثر گردهمایی نوکلئونهاست. هسته‌های با عمر کوتاهتر مدتها قبل واپاشیده و ناپدید شده‌اند، و امروز ما فقط واپاشیهای باعمرطولانی را مشاهده می‌کنیم. اگر ^{۲۳۵}U و ^{۲۳۸}U دارای نیمه‌عمرهای بسیارطولانی‌نبودند، امروز دیگر اورانیمی درطبیعت وجودنداشت واحتمالا رآکتورهای هسته‌ای و سلاحهای هسته‌ای هم در کار نبودند.

علاوه‌بر رادیواکتیویتهٔ طبیعی، هسته‌های رادیواکتیو را ازطریق واکنشهای هسته‌ای درآزمایشگاه نیزمی‌توانیم تولیدکنیم. این عمل اولین‌بار درسال۱۹۳۴ توسط ایرن کوری و فردریك ژولیو، با بمباران آلومینیم به وسیلهٔ ذرات آلفای حاصل از واپاشی پولونیم رادیواکتیو، انجام شد. در این واکنش ایزوتوپ ^{۳۰}P تولید می‌شود که از طریق گسیل پوزیترون با نیمه‌عمر ۲٫۵ دقیقه واپاشیده خواهد شد. طبق گفتهٔ آنها:

> آخرین آزمایشهای ما حقیقت تکان دهنده‌ای را نشان داده است: هنگامی که یك ورقهٔ آلومینیم تحت تأثیر تابشهای یك ترکیب پولونیم قرار می‌گیرد، گسیل پوزیترون بلافاصله پس از برداشتن ترکیب رادیواکتیو متوقف نمی‌شود. ورقه همچنان رادیواکتیو می‌ماند وگسیل پرتوهای ناشی از واپاشی مانند یك عنصر رادیواکتیو معمولی به‌طور نمایی فرومی‌افتد.

برای این‌کار درزمینهٔ رادیواکتیویتهٔ مصنوعی، جایزهٔ نوبل شیمی سال ۱۹۳۵ به‌تیم ژولیو-کوری داده شد (در پی یك سنت خانوادگی-والدین ایرن، پی‌یر، و ماری‌کوری برای‌کار در زمینهٔ رادیواکتیویتهٔ طبیعی عنصر رادیم درجایزهٔ نوبل فیزیك سال ۱۹۰۳ با بکرل شریك شدند، و ماری کوری نخستین کسی است که با دریافت جایزهٔ نوبل شیمی درسال ۱۹۱۱ برای دومین بار به‌دریافت این جایزه مفتخر شد).

در این فصل قوانین فیزیکی حاکم بر تولید و واپاشی مواد پرتوزا را بررسی خواهیم‌کرد. در اینجا منظور از مواد پرتوزا موادی است که هسته‌های آنها در اثر گسیل خود به‌خود تابش تغییر حالت می‌دهد.

۱.۶ قانون واپاشی رادیواکتیو

نه سال پس‌ازکشف رادیواکتیویته درسال۱۸۹۶ ملاحظه شدکه آهنگ واپاشی یك مادهٔ پرتوزای خالص با گذشت زمان طبق یك قانون نمایی کاهش می‌یابد. تشخیص اینکه رادیواکتیویته نمایندهٔ تغییر درتك‌تك اتمها ونه‌درکل نمونه است، مستلزم سپری‌شدن‌مدت زمان بیشتری‌بود. پس ازگذشت دوسال دیگرمشخص شدکه واپاشی دارای طبیعت آماری است، یعنی پیش‌بینی زمان فروپاشی یك اتم معین غیرممکن است، و معلوم شد که این فرضیه مستقیماً به‌قانون نمایی منجر می‌شود. این موضوع عدم قابلیت پیش‌بینی رفتار یك ذره، امروزه دانشمندان را نگران نمی‌کند، ولی پذیرش آن در مراحل آغازین و قبل از گسترش نظریهٔ کوانتومی مشکل بود. تلاش فراوان همین محققان از خودگذشته بود که آنچه را که امروز حقایق مسلم به‌نظر می‌رسند، پابرجا ساخت.

اگر N هستهٔ پرتوزا در زمان t درنمونه‌ای موجود باشند و هسته‌های جدیدی وارد نمونه نشوند، تعداد dN هسته که در زمان dt واپاشیده می‌شوند با N متناسب خواهد بود، درنتیجه داریم

$$\lambda = -\frac{(dN/dt)}{N} \qquad (۱.۶)$$

که درآن λ یك مقدار ثابت است که ثابت واپاشی یا فروپاشی نامیده می‌شود. طرف راست معادلهٔ (۱.۶) احتمال واپاشی یك اتم در واحد زمان است. اینکه این احتمال بدون توجه به عمر اتمها ثابت می‌ماند، فرض اساسی نظریهٔ آماری واپاشی رادیواکتیو است. (طول عمر بشرازاین قانون پیروی نمی‌کند!)

با انتگرال‌گیری از معادلهٔ (۱.۶) به قانون نمایی واپاشی رادیواکتیو می‌رسیم

$$N(t) = N_{\circ} e^{-\lambda t} \qquad (۲.۶)$$

که درآن $N_{\circ}$، ثابت انتگرال‌گیری، تعداد اولیهٔ هسته‌های موجود در $t = \circ$ است. نیمه‌عمر

$t_{1/2}$ زمان لازم برای واپاشی نیمی از هسته‌هاست. با قرار دادن $N=N_0/2$ در معادلهٔ (۲.۶) داریم

$$t_{1/2}=\frac{0.693}{\lambda} \qquad (3.6)$$

تعیین طول عمر متوسط، τ، (که گاهی فقط طول عمر خوانده می‌شود) نیزمفید است. این زمان طبق تعریف میانگین مدت زمانی است کـه هسته قبل از واپاشی باقی می‌ماند. تعداد هسته‌هایی کـه تا زمان t باقی می‌مانند برابر $N(t)$، و تعدادی که بین t و $t+dt$ واپاشیده می‌شوند برابر $|dN/dt|\,dt$ است. بنابراین عمرمتوسط عبارت است از

$$\tau=\frac{\int_0^\infty t|dN/dt|\,dt}{\int_0^\infty |dN/dt|\,dt} \qquad (4.6)$$

که مخرج آن نشاندهندهٔ تعداد کل واپاشیهاست. پس از انتگرال‌گیری نتیجهٔ زیر به‌دست می‌آید

$$\tau=\frac{1}{\lambda} \qquad (5.6)$$

بنابراین عمرمتوسط برابرعکس ثابت واپاشی است.

با استفاده ازمعادلهٔ (۲.۶) می‌توان تعداد هسته‌های ازنوع معین راکه پس از زمان t ناواپاشیده مانده‌اند، پیش‌بینی کرد. متأسفانه، قانون به‌این‌صورت ارزش محدودی دارد، زیرا اندازه‌گیری کمیت N مشکل است. به‌جای شمارش تعداد هسته‌های ناواپاشیده در یك نمونه، بهتراست تعداد واپاشیهایی که درفاصلهٔ زمانی بین t_1 و t_2 رخ می‌دهند شمرده شوند (از طریق مشاهدهٔ تابشهای گسیل‌شده). اگر تغییرتعداد هسته‌های موجود درفاصلهٔ t و $t+\Delta t$ برابر ΔN باشد، خواهیم داشت

$$|\Delta N|=N(t)-N(t+\Delta t)=N_0e^{-\lambda t}(1-e^{-\lambda\Delta t}) \qquad (6.6)$$

اگرفاصلهٔ زمانی Δt که طی آن شمارش انجام می‌شود بسیارکوچکتراز λ^{-1} (و درنتیجه، در واقع $\Delta t \ll t_{1/2}$) باشد، می‌توان از جملـهٔ مرتبهٔ بالا در بسط دومین جملـهٔ پرانتز صرفنظرکرد و نوشت

$$|\Delta N|=\lambda N_0e^{-\lambda t}\Delta t \qquad (7.6)$$

در حد دیفرانسیلی رابطه به‌صورت زیر درمی‌آید

$$\left|\frac{dN}{dt}\right| = \lambda N_{\circ} e^{-\lambda t} \qquad (۸.۶)$$

با تعریف فعالیت یا اکتیویتهٔ $\mathcal{A}$ به‌صورت آهنگ واپاشیهایی که در نمونه رخ می‌دهند، داریم

$$\mathcal{A}(t) \equiv \lambda N(t) = \mathcal{A}_{\circ} e^{-\lambda t} \qquad (۹.۶)$$

اکتیویتهٔ اولیه در $t = \circ$ برابر $\mathcal{A}_{\circ} = \lambda N_{\circ}$ است.

در حقیقت، می‌توانستیم معادلهٔ (۸.۶) را بـا مشتق‌گیری از معادلهٔ (۲.۶) مستقیماً به‌دست آوریم، ولی با انتخاب راه طولانیتر برنکته‌ای مهم تأکید کردیم که غالباً نادیده گرفته می‌شود: اندازه‌گیری تعداد شمارشهای ΔN درفاصلهٔ زمانی Δt، درصورتی اکتیویتهٔ نمونه را به دست می‌دهد که $\Delta t \ll t_{۱/۲}$ باشد. تعداد واپاشیها در فاصلهٔ زمانی $t_۱$ تا $t_۲$ برابراست با

$$\Delta N = \int_{t_۱}^{t_۲ = t_۱ + \Delta t} \mathcal{A}\, dt \qquad (۱۰.۶)$$

که فقط درحالت $\Delta t \ll t_{۱/۲}$ برابر $\mathcal{A}\,\Delta t$ می‌شود (یك نمونهٔ نادر را درنظر بگیرید که‌در آن $t_{۱/۲} = ۱\,\mathrm{s}$ باشد، دراین‌صورت تعدادشمارش در دقیقه با شمارش‌درساعت برابراست). برای تشخیص ارتباط بیشتر بین $\mathcal{A}$ و ΔN به‌مسئلهٔ ۱ در انتهای این فصل رجوع کنید.

اکتیویتهٔ یك نمونهٔ رادیواکتیو درست برابرتعداد واپاشیهای نمونه در واحد زمان است،وتعداد واپاشی درثانیه یکای مناسبی برای اندازه‌گیری‌است. یکای دیگراندازه‌گیری اکتیویته کوری (Ci) است، که درابتدا نمایندهٔ اکتیویتهٔ یك گرم رادیم محسوب می‌شد، ولی در حال حاضر به‌صورت سادهٔ زیر تعریف می‌شود

$$۱\,\mathrm{Ci} = ۳٫۷ \times ۱۰^{۱۰} \text{ واپاشی در ثانیه}$$

اغلب چشمه‌های رادیواکتیوی که در آزمایشگاهها مـورد استفاده قرار می‌گیرند دارای اکتیویته‌ای در محـدودهٔ میکروکوری و میلی‌کوری هستند. یکای اکتیویته در دستگاه SI بکرل (Bq) نامیده می‌شود که برابر یك واپاشی در ثانیه است. بـا وجود این، کوری به‌عنوان یکای اکتیویته به اندازه‌ای جا افتاده است که بکرل هنوز به‌صورت یکای متداول درنیامده است.

توجه کنیدکه اکتیویته فقط تعداد فروپاشی در ثانیه را بدون هیچگونه اطلاعی از نوع تابشهای گسیلی و یا انرژی آنها به‌دست می‌دهد. اگر بخواهیم اثرات تابش در یك سیستم زیست‌شناختی را بررسی کنیم، اکتیویته کمیت مفیدی نیست، زیرا تابشهای مختلف ممکن است اثـرات متفاوتی داشته باشند. در بخش ۸.۶ دربـارهٔ برخی یکاهای دیگـر

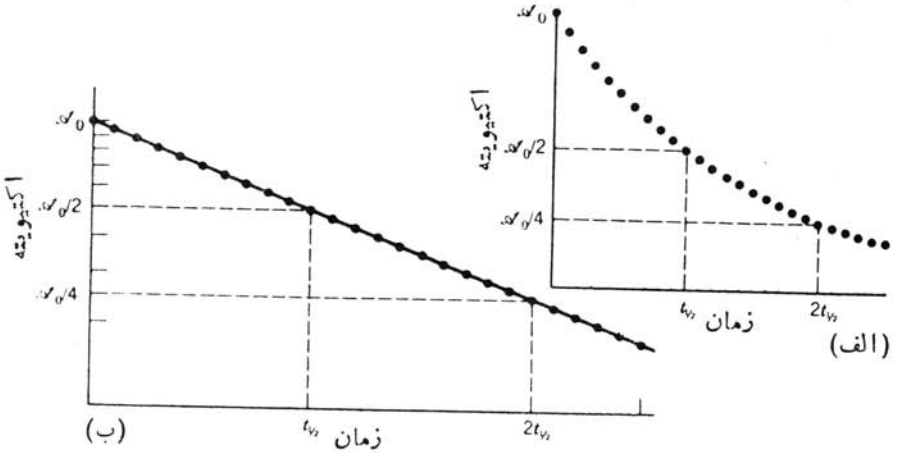
اندازه‌گیری تابش که اثرات نسبی زیست‌شناختی در آنها در نظر گرفته می‌شود، بحث خواهیم کرد.

معادلهٔ (۹.۶) نشان می‌دهد که اکتیویته با گذشت زمان به‌صورت نمایی فرومی‌افتد. بنابراین می‌توانیم تغییرات اکتیویته برحسب زمان را با شمارش تعداد واپاشیها در یك رشته فواصل زمانی کوتاه Δt اندازه بگیریم. با رسم این اطلاعات روی نمودار نیمه‌لگاریتمی، مطابق شکل ۱.۶، (یعنی نمودار $\ln \mathscr{A}$ برحسب t) خط راستی با شیب $-\lambda$ حاصل می‌شود، که از روی آن می‌توان نیمه‌عمر واپاشی رادیواکتیو را تعیین کرد.

این روش اندازه‌گیری فقط برای نیمه‌عمرهایی مفید است که بسیار کوتاه یا بسیار بلند نباشند. از یك‌سو، نیمه‌عمر باید به اندازهٔ کافی کوتاه باشد تا بتوانیم واپاشی نمونه را مشاهده کنیم ــ و از سوی دیگر برای نیمه‌عمرهای بسیار بیش از عمر انسان، قادر به مشاهدهٔ کاهش قابل ملاحظه دراکتیویتهٔ نمونه نیستیم. دراین موارد، می‌توان معادلهٔ (۱.۶) را مستقیماً با اندازه‌گیری dN/dt (که همان میزان اکتیویته دراین فرایند سادهٔ واپاشی است) وتعیین تعداد اتمها (مثلا به‌روش وزن‌کردن نمونه‌ای که ترکیب شیمیایی آن به‌دقت شناخته شده است) به‌کار برد.

برای نیمه‌عمرهای بسیار کوتاه (کوتاهتر از مثلا یك ثانیه) مشاهدهٔ آهنگ فروپاشیهای متوالی نیزسودمند نیست، زیرا اکتیویتهٔ نمونه در زمانهای لازم برای روشن وخاموش‌کردن دستگاه شمارش قابل اندازه‌گیری نیست. دراین‌صورت، از روش‌دقیقتری که درفصل۷ شرح داده شده‌است، استفاده می‌کنیم که اندازه‌گیریهای روزانهٔ نیمه‌عمرهای حدود نانوثانیه (10^{-9}s) وحتی پیکوثانیه (10^{-12}s) را ممکن می‌سازد.

این نکتهٔ مهم را باید به‌خاطر سپرد که قانون سادهٔ واپاشی نمایی رادیواکتیو فقط درشرایط محدودی به‌کارمی‌رود ــ دراین موارد، مقدارمعینی ازمادهٔ اولیه (باگسیل‌تابش)



شکل ۱.۶ واپاشی نمایی اکتیویته. (الف) نمودار خطی. (ب) نمودار نیمه‌لگاریتمی.

به یك عنصر پایدار نهایی واپاشیده می‌شود. تحت این شرایط که هستهٔ رادیواکتیو ۱ با ثابت واپاشی λ_1 به‌هستهٔ پایدار ۲ واپاشیده می‌شود، تعداد هسته‌های موجود برابر است با

$$N_1 = N_0 e^{-\lambda_1 t} \qquad (۱۱.۶ \text{ الف})$$

$$N_2 = N_0(1 - e^{-\lambda_1 t}) \qquad (۱۱.۶ \text{ ب})$$

توجه کنید که تعداد هسته‌های نوع ۲ از صفر شروع می‌شود و با افزایش $t \to \infty$ به N_0 می‌رسد (تمام هسته‌های نوع ۱ در نهایت به نوع ۲ تبدیل می‌شوند) و نیز توجه کنید که داریم $N_1 + N_2 = N_0$ (تعداد کل هسته‌ها ثابت است). اگر هسته‌های نوع ۲ نیز رادیواکتیو باشند، و یا اگر هسته‌های نوع ۱ درحال تولید هم باشند (مثلا در اثر واکنش هسته‌ای)، دراین صورت معادلات (۱۱.۶) قابل استفاده نیستند. این موارد را در بخشهای ۳.۶ و ۴.۶ بررسی می‌کنیم.

دربسیاری ازموارد، یك هستهٔ اولیه می‌تواند به‌دو طریق یا بیشتر واپاشیده شود که در این صورت حالت نهایی شامل دو هستهٔ متفاوت یا بیشتر است. اگراین دو مد واپاشی را a و b بنامیم، آهنگ واپاشی در مد a با ثابت واپاشی جزئی λ_a برابر $(dN/dt)_a$ و آهنگ واپاشی درمد b با ثابت λ_b برابر $(dN/dt)_b$ خواهد شد

$$\lambda_a = -\frac{(dN/dt)_a}{N}$$
$$\lambda_b = -\frac{(dN/dt)_b}{N} \qquad (۱۲.۶)$$

آهنگ واپاشی کل برابر است با

$$-\left(\frac{dN}{dt}\right)_t = -\left(\frac{dN}{dt}\right)_a - \left(\frac{dN}{dt}\right)_b = N(\lambda_a + \lambda_b) = N\lambda_t \qquad (۱۳.۶)$$

که در آن $\lambda_t = \lambda_a + \lambda_b$ ثابت واپاشی کل است. بنابراین هسته‌ها طبق رابطهٔ $N = N_0 e^{-\lambda_t t}$ واپاشیده می‌شوند، وفعالیت $|dN/dt|$ با ثابت واپاشی λ_t فرومی‌افتد. حال اگر تابشهایی را که منجر به حالتهای نهایی a یا b می‌شوند بشماریم، فقط ثابت واپاشی کل λ_t را مشاهده خواهیم کرد؛ و هرگز با یك واپاشی نمایی فعالیت با ثابتهای λ_a یا λ_b روبه‌رو نمی‌شویم. ثابتهای واپاشی نسبی λ_a و λ_b احتمال واپاشی در مد a یا b را نشان می‌دهند. بنابراین کسری معادل λ_a/λ_t از هسته‌ها در مد a وکسر λ_b/λ_t از هسته‌ها در مد b واپاشیده می‌شوند، به‌طوری که

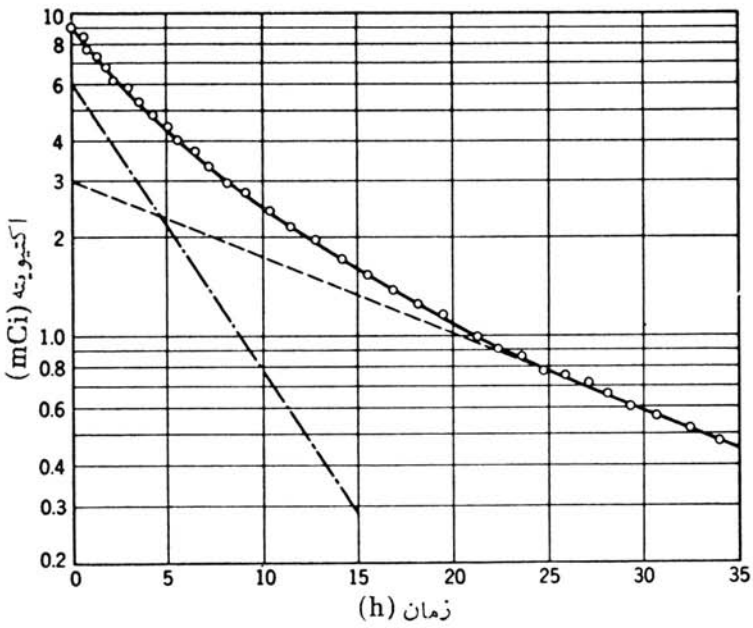
$$N_1 = N_0 e^{-\lambda_1 t'}$$

$$N_{2.a} = \left(\frac{\lambda_a}{\lambda_1}\right) N_0 (1 - e^{-\lambda_1 t'}) \qquad (۱۴.۶)$$

$$N_{2.b} = \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_1}\right) N_0 (1 - e^{-\lambda_1 t'})$$

عوامل جداگانهٔ λ_a و λ_b هرگز درهیچ جملهٔ نمایی‌ای ظاهر نمی‌شوند: یعنی ما نمی‌توانیم یك مد واپاشی را برای مشاهدهٔ واپاشی مد دیگر «متوقف کنیم».

حالت خاص دیگر، مورد یك نمونه با دو یا چند هستهٔ رادیواکتیو با طرحهای واپاشی نامرتبط‌است. مخلوط ^{64}Cu (۱۲٫۷ h) و ^{61}Cu (۳٫۴ h) را درنظر بگیرید: البته این مخلوطها را نمی‌توان به‌طور شیمیایی ازهم جداکرد. اکتیویتهٔ یك مخلوط خاص برحسب زمان، برروی کاغذ نیمه‌لگاریتمی درشکل ۲.۶ رسم شده است. فرض می‌کنیم که درانتهای سمت راست منحنی فقط یك نوع اکتیویته وجود دارد (زیرا منحنی‌خطی‌است). شیب حدی این خط نیمه‌عمر ۱۲٫۷ h را نشان می‌دهد. با (۱) امتداد دادن این خط، و (۲) به دست آوردن تفاوت بین منحنی و این خط راست در نقاط مختلف محور زمان، و (۳) رسم این‌تفاوت برهمان مبنا، خط نقطه‌چین مستقیمی راکه نشاندهندهٔ نیمه‌عمر ۳٫۴ h



شکل ۲.۶ منحنی واپاشی نمونه‌ای‌که حاوی مخلوطی‌از ^{64}Cu (۱۲٫۷ h) و ^{61}Cu (۳٫۴ h) است.

است به‌دست می‌آوریم. محل برخورد هر یك ازاین خطوط با محور قائم، شمارش اولیهٔ هرمؤلفه را به‌دست می‌دهد. این روش را درصورتی که نیمه‌عمرها تفاوت قابل ملاحظه با هم داشته باشند، می‌توان برای مخلوطهای دارای بیش از دو مؤلفه نیز تعمیم داد.

۲.۶ نظریهٔ کوانتومی واپاشیهای رادیواکتیو

ترازهای انرژیی که از حل معادلهٔ شرودینگر برای پتانسیلهای گوناگون مستقل از زمان بـه‌دست می‌آیند یك خصوصیت مشترك دارند که همان حالتهای مانا در آنهاست. یك سیستم کوانتومی که ابتدا در یك حالت مانای خاص است همواره در آن حـالت باقی می‌ماند و گذاری (یعنی‌واپاشی) به‌حالتهای دیگر نخواهدداشت. وجود یك‌سیستم کوانتومی گاه در یك حالت و گاهی در حالت دیگر با ساختن مخلوطی از دو یـا چند حالت مانند $\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2$ امکان‌پذیراست. دراین رابطه $|c_1|^2$ احتمال وجود سیستم درحالت۱ و $|c_2|^2$ احتمال وجود درحالت۲ است. برای پتانسیلهای مستقل از زمان، c_1 و c_2 مستقل از زمان‌اند که با مشاهدات مربوط به‌حالتهای واپاشنده که درآنها احتمال وجود در یك حالت برحسب زمان تغییرمی‌کند، توافق ندارد. به‌علاوه، از نظرفلسفی ناچاریم‌که پندارهٔ حالتهای ناب با توابع خوش‌تعریف را از سر بیرون‌کنیم‌که در این صورت تعبیرساختار هسته‌ای واقعاً مشکل می‌شود.

بنابراین رهیافت زیررا انتخاب می‌کنیم: پتانسیل به‌صورت $V+V'$ در نظر گرفته می‌شودکه V پتانسیل هسته‌ای است‌که حالتهای مانا را می‌دهد و V' پتانسیل اضافی بسیار ضعیفی است‌که می‌تواند سبب گذار بین حالتها شود. درحال حاضر با چشمپوشی از V'، معادلهٔ شرودینگر را برای پتانسیل V حل می‌کنیم و تابع‌موجهای ایستای هسته را به‌دست می‌آوریم، سپس ازاین توابع برای محاسبهٔ احتمال گذار بین «حالتهای مانا» در اثر V' استفاده می‌کنیم. این احتمال گذار همان ثابت واپاشی λ است که از قاعدهٔ طلایی فرمی به‌دست می‌آید و دربخش ۸.۲ بررسی شد

$$\lambda = \frac{2\pi}{\hbar}|V'_{fi}|^2\rho(E_f) \qquad (۱۵.۶)$$

که درآن داریم

$$V'_{fi} = \int \psi_f^* V' \psi_i \, dv \qquad (۱۶.۶)$$

بامعلوم‌بودن تابع‌موجهای اولیه ونهایی ψ_i و ψ_f، می‌توان «جزء ماتریس» V' و درنتیجه احتمال‌گذار را (که می‌تواند با مقدار تجربی مقایسه شود) به‌دست آورد.

احتمال‌گذار به‌چگالی حالتهای نهایی $\rho(E_f)$، درفاصلهٔ انرژی dE_f، نیز بستگی دارد. بنابراین‌تعداد حالتهای نهایی قابل‌حصول دستگاه برابر $dn_f = \rho(E_f)\,dE_f$ است.

اگـر تعداد حالات نهایی قابل حصول برای واپاشی زیـاد باشد، احتمال گذار بزرگ خواهدبود. چگالی حالات نهایی دارای دوجزء است، زیرا حالت نهایی پس از واپاشی شامل دومؤلفهٔ حالت هستهٔ نهایی وحالت ذرهٔ گسیل شده است. با شروع از حالت هسته، هریك ازاین مؤلفه‌ها را به‌ترتیب بررسی می‌کنیم.

با حل معادلهٔ شرودینگر برای پتانسیل مستقل از زمـان V حالتهای مانای $\psi_a(\mathbf{r})$ هسته به‌دست می‌آید. تابع‌موج وابسته به‌زمان برای حالت a به‌صورت زیراست

$$\Psi_a(\mathbf{r},t)=\psi_a(\mathbf{r})e^{-iE_a t/\hbar} \qquad (۱۷.۶)$$

که درآن E_a انرژی حالت است. احتمال وجود سیستم در حالت a برابر $|\Psi_a(\mathbf{r},t)|^2$ است که‌برای حالت مانا مستقل‌از زمان‌است. برای سازگاری باقانون واپاشی رادیواکتیو، علاقه‌مندیم که احتمال وجود سیستم درحالت a برحسب زمان به‌صورت e^{-t/τ_a} کاهش‌یابد

$$|\Psi_a(t)|^2=|\Psi_a(t=0)|^2e^{-t/\tau_a} \qquad (۱۸.۶)$$

که درآن $\tau_a=1/\lambda_a$ طول عمرمیانگین حالت با ثابت واپاشی λ_a است. بنابراین باید معادلهٔ (۱۷.۶) را به‌صورت زیر بنویسیم

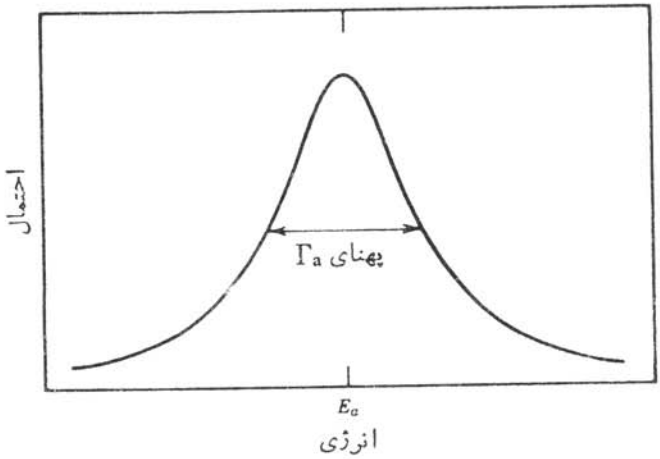
$$\Psi_a(\mathbf{r},t)=\psi_a(\mathbf{r})e^{-iE_a t/\hbar}e^{-t/2\tau_a} \qquad (۱۹.۶)$$

بهایی که برای حضورجملهٔ حقیقی درنمای Ψ_a می‌پردازیم، از دست دادن توانایی تعیین دقیق‌انرژی‌حالت‌است، زیرا دیگر حالت مانایی نداریم [رابطهٔ عدم قطعیت انرژی-زمان، معادلـهٔ (۲.۲)، را ببینید. اگـر یك حالت همواره وجود داشته باشد، داریم $\Delta t\to\infty$ که می‌توانیم انرژی آن را دقیقاً تعیین کنیم زیرا $\Delta E=0$ است. اگـرعمر متوسط یك حالت τ باشد، نمی‌توانیم انرژی آن را با دقتی بیش از $\Delta E\sim\hbar/\tau$ تعیین‌کنیم.] این بحث را می‌توانیم بـا محاسبهٔ توزیع حـالات انرژی (درحقیقت تبدیل فوریهٔ $e^{-t/2\tau_a}$) جدی‌تـر کنیم. احتمال مشاهدهٔ دستگاه در فاصلهٔ انرژی E و $E+dE$ در مجاورت E_a ازمربع توزیع زیر به‌دست می‌آید

$$P(E)\,dE=\frac{dE}{(E-E_a)^2+\Gamma_a^2/4} \qquad (۲۰.۶)$$

که درآن $\Gamma_a=\hbar/\tau_a$ پهنای حالت a است. شکل ۳.۶ تابع $P(E)$ را نشان می‌دهد. اگر انرژی این سیستم را اندازه بگیریم، ممکـن است مقدار E_a را بـه‌دست نیاوریم (اگرچه متوسط اندازه‌گیریهای متعدد مقدار E_a را می‌دهد). پهنای Γ_a معیـاری از عدم توانایی ما درتعیین دقیق انرژی حالت است (دراینجا کوتاهی ازما یاوسیلهٔ اندازه‌گیری نیست ــ طبیعت محدودیت عدم قطعیت را اعمال می‌کند، وچنانکه درشکل۳.۶ نشان داده شده است، یك حالت با انرژی «دقیق» E_a قابل مشاهده نیست).

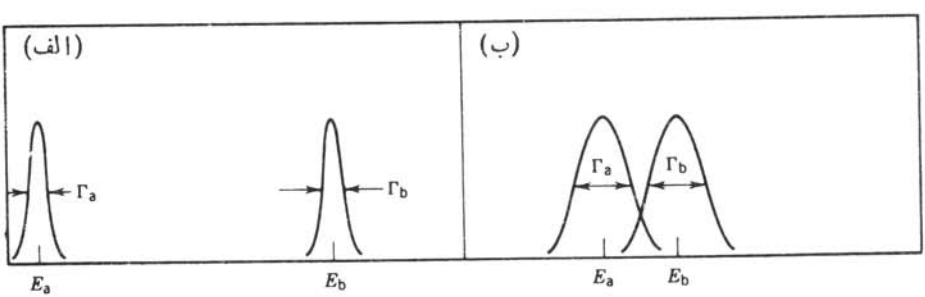
اگر حالات هسته دارای انرژی دقیق نباشند، آیا می‌توانیم از گذار بین ترازهای



شکل ۳.۶ احتمال اندازه‌گیری انرژی یك حالت ناپایدار به‌پهنای Γ_a.

مشخص صحبت کنیم؟ بلی، زیرا پهنای ترازهای هسته‌ای کم‌انرژی درمقایسه با فاصلهٔ بین آنها کوچك است. حالات هسته‌ای نوعاً دارای طول‌عمرهای بیش از 10^{-12} ثانیه هستند که‌با $\Gamma < 10^{-10}\,\mathrm{MeV}$ متناظرند. ترازهای هسته‌ای گسسته و کم‌انرژیی که در واپاشیهای عـادی (و در بسیاری از واکنشهای هسته‌ای) دیـده می‌شوند دارای فواصلی از مـرتبهٔ $10^{-3}\,\mathrm{MeV}$ وبیشترهستند. بنابراین اگر بخواهیم حالت نهایی هسته‌ای را پس ازفرایند واپاشی اندازه بگیریم (به عنوان مثال بـا اندازه‌گیری انرژی ذرهٔ گسیل‌شده) همپوشی توزیعهای انرژی دوحالت نهایی مختلف a و b وایجاد ابهام درحالت «مانای» ناشی‌از واپاشی بسیار نامحتمل است (شکل ۴.۶).

بنابراین نتیجه می‌گیریم که صحبت از حالات شبه مانای گسسته منطقی است زیرا فاصلهٔ بین آنها بسیاربیشتراز پهنایشان است، و نیزمی‌توانیم نتیجه بگیریم که این حالات



شکل ۴.۶ هنگامی‌که پهنای حالت ناپایدار درمقایسه با فاصلهٔ بین‌آنها کوچك است، مانند مورد (الف)، حالتها گسسته و قابل مشاهده‌اند. در مورد (ب) حالتهای a و b در اثرهمپوشی کاملا با هم مخلوط شده‌اند؛ این حالتها تابع‌موجهای متمایز قابل مشاهده ندارند.

هسته‌ای درچگالی حالات نهایی سهمی ندارند زیرا تنها یك حالت هسته‌ای قابل حصول در فرایند واپاشی وجود دارد.

بنابراین تنها میدان تابش در چگالی حالات سهیم است و باید خصوصیات تابش گسیلی را درمحاسبهٔ $\rho(E_f)$ در نظر بگیریم. درحال حاضر به‌اظهارنظرهای کلی درمورد $\rho(E_f)$ قناعت می‌کنیم. اگر فقط احتمال تشکیل حالت هسته‌ای E_f را مشاهده کنیم، باید کلیهٔ تابشهای با انرژی $E_i - E_f$ را درنظر بگیریم. بویژه آنکه تابشها می‌توانند در هر جهت و با هرنوع قطبش (اگرتابشها از ذرات اسپین‌دار تشکیل شده‌باشند، اسپین می‌تواند جهت‌گیریهای مختلف داشته باشد) گسیل شوند. در اینجا فرض می‌کنیم‌که جهت تابش و قطبش آنها را مشاهده نمی‌کنیم. همین فرایند شمارش تعداد حالات نهایی قابل حصول است‌که چگالی حالتها را به‌دست می‌دهد و آن را در بحث انواع خاص تابش در فصول ۸ تا ۱۰ بیشتر مورد بررسی قرار می‌دهیم.

در حل معادلهٔ دیفرانسیل (۱.۶) برای به دست آوردن قانون واپاشی رادیواکتیو، فرض‌کردیم‌که احتمال واپاشی λ اولا کوچك و ثانیاً مستقل از زمان است‌که اتفاقاً همان فرضهایی هستندکه درتعیین قاعدهٔ طلایی فرمی به‌کاربردیم. اگر V' مستقل از زمان باشد، λ که از رابطهٔ (۱۵.۶) محاسبه می‌شود نیز مستقل از زمان خواهد بود. در این شرایط، تأثیر V' برحالتهای مانای a و b ناشی از V به‌صورت زیراست

$$\psi_a \to \psi_a + \frac{V'_{ba}}{E_b - E_a}\psi_b$$

واحتمال اینکه دستگاهی‌که قبلا درحالت a بوده درحالت b دیده شود متناسب با $|V'_{ba}|^2$ است. ما این موضوع را به‌صورت «واپاشی» ازحالت a به‌حالت b مشاهده می‌کنیم.

برای‌استفاده ازقاعدهٔ طلایی فرمی نیزاحتمال واپاشی بایدکوچك‌باشد، به‌طوری‌که دامنهٔ ψ_b در رابطهٔ فوق‌کوچك‌شود. همین‌ضرورت است‌که منجر به‌فرایند واپاشی می‌شود. اگراحتمال واپاشی بزرگ بود، تابش کافی برای ایجاد گذار معکوس $b \to a$ ازطریق فرایند جذب تشدیدی وجود می‌داشت. در این صورت، سیستم مشابه یك سیستم کلاسیك متشکل از دو نوسانگر جفت‌شده بین حالات a و b نوسان می‌کرد.

ارتباط نهایی بین احتمال واپاشی مؤثر برای مجموعه‌ای ازتعداد زیادی ازهسته‌ها و احتمال واپاشی میکروسکوپیکی‌که با استفاده از مکانیك‌کوانتومی برای یك هستهٔ منفرد محاسبه می‌شود، مستلزم آن است‌که هر هسته از این مجموعه تابش خود را مستقل از همهٔ هسته‌های دیگر گسیل کند. فرض می‌کنیم که واپاشی یك هستهٔ معین، مستقل از واپاشی همسایگان آن است. بااین فرض اطمینان خواهیم یافت‌که ثابت واپاشی اندازه‌گیری‌شده درآزمایشگاه با محاسبات کوانتوم مکانیکی قابل مقایسه باشد.

۳.۶ تولید و واپاشی عناصر رادیواکتیو

در بسیاری موارد شرط اساسی قانون نمایی، یعنی عدم ورود هسته‌های جدید به نمونه، برقرار نمی‌ماند. درحل معادلهٔ (۱.۶) تعداد هسته‌های موجود در زمان $t=0$ برابر N_0 بود. اما در بسیاری از کاربردها، فعالیت رادیواکتیو را مانند مورد واکنشهای هسته‌ای به‌طور پیوسته به وجود می‌آوریم. در این صورت معادلهٔ (۲.۶) دیگر معتبرنیست و باید فرایندهای تولید و واپاشی عناصررادیواکتیو به‌تفصیل بررسی شوند.

فرض می‌کنیم که هدفی متشکل از هسته‌های پایدار را دریك رآکتور یا شتابدهنده مانند سیکلوترون قرارداده‌ایم. هسته‌های هدف باجذب نوترون یاذرات باردار،نمونه‌های رادیواکتیو تولید می‌کنند. آهنگ تولید R این هسته‌ها به تعداد N_0 اتمهای هدف، شار یا جریان I ذرات فرودی، و به‌سطح مقطع σ واکنش (که نمایندهٔ احتمال برهم‌کنش ذرهٔ فرودی با یك هستهٔ هدف است) بستگی دارد. شار ذرات دریك رآکتور یا سیکلوترون می‌تواند تا $10^{14}/s\cdot cm^2$ برسد و سطح مقطع نوعی واکنشها در حدود بارن ($10^{-24}cm^2$) است. بنابراین احتمال تبدیل یك هستهٔ هدف پایدار به هستهٔ رادیواکتیو در حدود $10^{-10}/s$ است. حتی اگر واکنش ساعتها هم ادامه داشته باشد، تعداد مطلق ذرات هدف تبدیل شده کوچك خواهد بود (مثلا کمتر از 10^{-6} برابر ذرات اولیه). بنابراین با تقریب خوب می‌توانیم تعداد هسته‌های هدف را ثابت در نظر بگیریم، وبا این تقریب آهنگ تولید R ثابت خواهد بود. (با «مصرف شدن» هسته‌های هدف، N_0 اندکی کاهش می‌یابد و در نتیجه آهنگ تولید در طی زمان کاهش می‌یابد. بدیهی است که وقتی $t\to\infty$، تعداد N_0 در نهایت به‌صفرمیل می‌کند. ولی در زمانهای معمولی واکنشها و با در نظرگرفتن سطح‌مقطعهای عادی، این اثرقابل چشمپوشی است). بنابراین، رابطهٔ

$$R=N_0\sigma I \qquad (۲۱.۶)$$

نشانگرمقدار ثابتی است که آهنگ تولید هسته‌های رادیواکتیو را به‌دست می‌دهد.

اکنون تعداد هسته‌هایی را که در اثر واکنش تولید می‌شوند با N_1 نشان می‌دهیم. این هسته‌ها با ثابت واپاشی λ_1 به هسته‌های پایداری تبدیل می‌شوند که تعداد آنها را با N_2 مشخص می‌کنیم. بنابراین تعداد هسته‌های N_1 موجود، به علت تولید با آهنگ R افزایش، و دراثر واپاشی رادیواکتیو کاهش می‌یابد

$$dN_1=R\,dt-\lambda_1 N_1\,dt \qquad (۲۲.۶)$$

حل این معادله به‌آسانی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$N_1(t)=\frac{R}{\lambda_1}(1-e^{-\lambda_1 t}) \qquad (۲۳.۶)$$

و

$$\mathcal{A}_1(t)=\lambda_1 N_1(t)=R(1-e^{-\lambda_1 t}) \qquad (۲۴.۶)$$

اگر زمان پرتودهی درمقایسه با یك نیمه‌عمر کوتاه باشد، با بسط نما وحفظ جملات خطی t رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید

$$\mathcal{A}_1(t) \cong R\lambda_1 t \qquad t \ll t_{1/2} \qquad (۲۵.۶)$$

بنابراین برای زمانهای کوتاه، اکتیویته با آهنگ ثابت افزایش می‌یابد. این‌حالت متناظر با انباشته شدن خطی (برحسب زمان) هسته‌های تولید شده است، که در اثر واپاشی رادیواکتیو از تعداد آنها هنوز به‌طور چشمگیری کاسته نشده است.

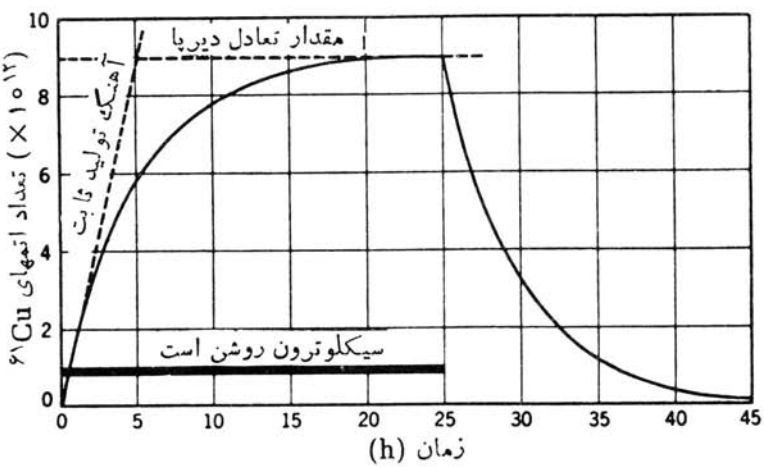
برای زمانهایی که در مقایسه با نیمه‌عمر طولانی هستند، جملهٔ نمایی به صفر میل می‌کند و اکتیویته تقریباً ثابت می‌ماند

$$\mathcal{A}_1(t) \cong R \qquad t \gg t_{1/2} \qquad (۲۶.۶)$$

دراین‌حالت آهنگ تولید عنصر رادیواکتیو جدید با آهنگ واپاشی عنصرقدیمیتر برابر است. این یك نمونه از تعادل دیرپا است که در بخش بعد به‌تفصیل بررسی می‌شود.

اگرنمونه را به‌مدت t_1 پرتودهی کنیم وسپس آن را ازشتابدهنده یا رآکتورخارج کنیم، طبق قانون سادهٔ نمایی واپاشیده می‌شود، زیرا در این حال هیچ اکتیویتهٔ جدیدی به‌وجود نمی‌آید. شکل ۵.۶ فعالیت حاصل از تولید ^{61}Cu ($t_{1/2} = ۳٫۴$ h) را در اثر بمباران ^{61}Ni توسط دوترون نشان می‌دهد.

با توجه به‌معادلهٔ (۲۴.۶) ملاحظه می‌شود که ۷۵٪ اکتیویتهٔ بیشینه در اثر پرتودهی در دونیمه‌عمر و ۸۷٫۵٪ درسه نیمه‌عمر حاصل می‌شود. ادامهٔ کار پرتودهی افزایش کمتری را در اکتیویتهٔ نمونه موجب می‌شود، به‌طوری که با پرتودهی بیشتر از ۲ تا ۳ نیمه‌عمر



شکل ۵.۶ نمودار تعداد اتمهای رادیواکتیو ^{61}Cu موجود درهدف Ni درطول مدت بمباران توسط دوترونهای یك سیکلوترون، و در زمان پس از قطع بمباران.

اکتیویتهٔ اضافی نسبتاً اندکی حاصل می‌شود. در حقیقت، چون هزینهٔ استفاده از رآکتور یا شتابدهنده معمولا با زمان پرتودهی رابطهٔ مستقیم دارد، بهترین نتیجه (حداکثر اکتیویته به‌ازای واحد هزینه) با توقف در نزدیکی ناحیهٔ خطی ($t \ll t_{1/2}$) حاصل می‌شود.

۴.۶ رشد اکتیویتهٔ دختر ـ هسته

وضعیت دیگری که اغلب با آن سروکار پیدا می‌کنیم مسئلهٔ واپاشیهای رادیواکتیوی است که منجر به‌تولید هسته‌های رادیواکتیو می‌شوند. دراین صورت، ممکن است با یك سری یا زنجیره‌ای از واپاشیهای رادیواکتیو ۱ ← ۲ ← ۳ ← ۴ ... روبه‌رو شویم که معمولا هستهٔ اولیه (نوع۱) را هستهٔ مادر و «نسلهای» بعد را دختر(نوع۲)، نوه (نوع۳)، وغیره می‌نامند.

فرض می‌کنیم که در $t=0$ تعداد هسته‌های مادر برابر N_0 است و هیچ محصول واپاشی وجود ندارد

$$N_1(t=0)=N_0$$

$$N_2(t=0)=N_3(t=0)=\ldots=0 \qquad (۲۷.۶)$$

ثابتهای واپاشی مختلف با λ_1، λ_2، λ_3، ... نشان داده می‌شوند. در این محاسبات فرض می‌کنیم که عنصر نوه، محصول نهایی واپاشی، پایدار است. تعداد هسته‌های مادر با گذشت زمان طبق معمول به‌صورت زیر کاهش می‌یابد

$$dN_1=-\lambda_1 N_1\,dt \qquad (۲۸.۶)$$

تعداد هسته‌های دختر در اثر واپاشی مادر افزایش و در نتیجه واپاشی خودش کاهش می‌یابد

$$dN_2=\lambda_1 N_1\,dt-\lambda_2 N_2\,dt \qquad (۲۹.۶)$$

تعداد هسته‌های مادر را می‌توان مستقیماً با انتگرال گیری از معادلهٔ (۲۸.۶) به دست آورد

$$N_1(t)=N_0 e^{-\lambda_1 t} \qquad (۳۰.۶)$$

برای حل معادلهٔ (۲۹.۶)، جوابی به صورت $N_2(t)=Ae^{-\lambda_1 t}+Be^{-\lambda_2 t}$ در نظر می‌گیریم که با قرار دادن آن در معادلهٔ (۲۹.۶) و استفاده از شرایط اولیهٔ $N_2(0)=0$ خواهیم داشت

$$N_2(t)=N_0\frac{\lambda_1}{\lambda_2-\lambda_1}(e^{-\lambda_1 t}-e^{-\lambda_2 t}) \qquad (۳۱.۶)$$

$$\mathcal{A}_2(t)\equiv\lambda_2 N_2(t)=N_0\frac{\lambda_2\lambda_1}{\lambda_2-\lambda_1}(e^{-\lambda_1 t}-e^{-\lambda_2 t}) \qquad (۳۲.۶)$$

توجه کنید که اگر هسته‌های نوع ۲ پایدار باشند ($\lambda_2\to 0$)، معادلهٔ (۳۱.۶) به معادلهٔ (۱۱.۶ب) تبدیل می‌شود. همچنین می‌توان نتایج قسمت قبل را به‌صورت حالت خاص معادلهٔ(۳۱.۶) درنظر گرفت. فرض می‌کنیم λ_1 بسیار کوچك‌است (ولی برابرصفر نیست)، به‌طوری که داریم $N_1\simeq N_0-N_0\lambda_1 t$. در یك واکنش هسته‌ای، تعداد هسته‌های هدف طبق رابطهٔ N_0-Rt با آهنگ R کاهش می‌یابد، و در نتیجه با یکی‌گرفتن $N_0\lambda_1$ و R وچشمپوشی از λ_1 درمقایسه با λ_2، معادلهٔ (۳۱.۶) به‌معادلهٔ (۲۴.۶) برای فعالیت نوع۲ تبدیل می‌شود.

حالت $\lambda_1\ll\lambda_2$

دراین‌مورد عمرمادر به‌اندازه‌ای طولانی است که واپاشی‌آن باآهنگ اساساً ثابتی‌صورت می‌گیرد؛ برای تمام زمانهای عملی $e^{-\lambda_1 t}\simeq 1$ است و داریم

$$N_2(t)\cong N_0\frac{\lambda_1}{\lambda_2}(1-e^{-\lambda_2 t}) \qquad (۳۳.۶)$$

کـه به همان صورت معادلهٔ (۲۴.۶) است. بنابراین اکتیویتهٔ $\mathcal{A}_2$ چنانکه در شکل ۵.۶ نشان داده شده است به‌مقدار حدی $N_0\lambda_1$ میل می‌کند.

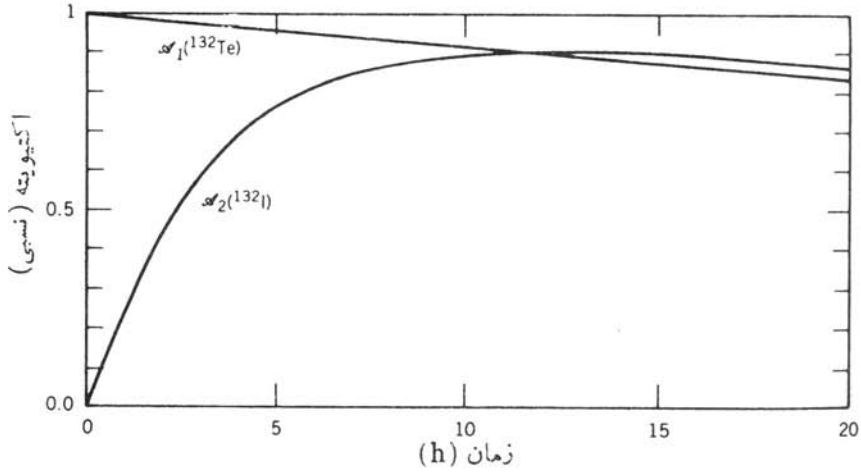
ایـن مثال دیگری از تعادل دیرپاست، **که درآن بابزرگ شدن t** آهنگ واپاشی هستهٔ نوع ۲ با آهنگ تولید آن برابر می‌شود: $\lambda_1 N_1=\lambda_2 N_2$ [توجه کنید که در این حالت طبق معادلـهٔ (۲۹.۶) داریم $dN_2/dt=0$.] شکل ۶.۶ مثالی از تعـادل دیرپای تقریبی را نشان می‌دهد.

حالت $\lambda_1<\lambda_2$

با استفاده از معادلات (۳۰.۶) و (۳۱.۶) می‌توانیم نسبت دواکتیویته را محاسبه‌کنیم

$$\frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1}=\frac{\lambda_2}{\lambda_2-\lambda_1}(1-e^{-(\lambda_2-\lambda_1)t}) \qquad (۳۴.۶)$$

با افزایش زمان، جملهٔ نمایی کوچکتر می‌شود و نسبت $\mathcal{A}_2/\mathcal{A}_1$ به مقـدار ثابت حدی



شکل ۶.۶ در واپاشی $^{۱۳۲}Xe \longleftarrow {}^{۱۳۲}I(۲٫۲۸\,h) \longleftarrow {}^{۱۳۲}Te(۷۸\,h)$ پس از تقریباً ۱۲ ساعت تعادل دیرپا حاصل می‌شود.

$\lambda_۲/(\lambda_۲-\lambda_۱)$ میل می‌کند. اکتیویته‌ها ثابت نیستند، ولی هسته‌های نوع ۲ (عملا) با ثابت واپاشی نوع ۱ واپاشیده می‌شوند. این وضعیت که در شکل ۷.۶ نشان داده شده‌است، تعادل گذرا نامیده می‌شود.

حالت $\lambda_۱ > \lambda_۲$

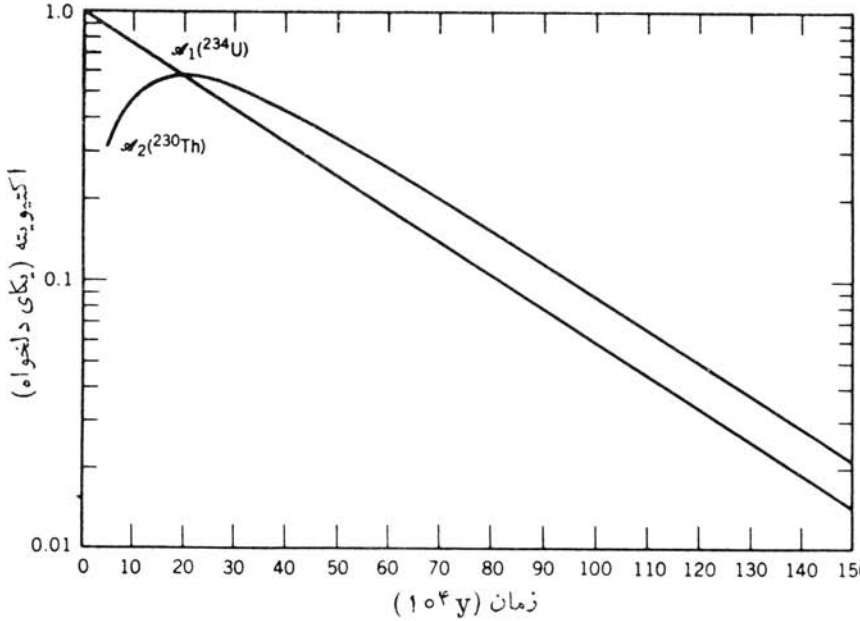
دراین‌مورد مادر به‌سرعت واپاشیده می‌شود و اکتیویتهٔ دختر پس‌از رسیدن به‌مقدار بیشینه با ثابت واپاشی خاص خودش کاهش می‌یابد. در چنین حالتی تعداد هسته‌های نوع ۱ کم و تقریباً ناچیز است. اگرزمان به‌اندازه‌ای طولانی باشدکه $e^{-\lambda_۱ t}$ به‌سمت صفر میل کند، معادلهٔ (۳۱.۶) به‌صورت زیر درمی‌آید

$$N_۲(t) \cong N_۰ \frac{\lambda_۱}{\lambda_۱-\lambda_۲} e^{-\lambda_۲ t} \qquad (۳۵.۶)$$

که نشان می‌دهد واپاشی هسته‌های نوع ۲ تقریباً طبق قانون نمایی است.

سریهای واپاشی

حال اگر فرض کنیم‌که چند نسل متوالی هسته‌های رادیواکتیو وجود داشته باشند (یعنی، اگرهسته‌های نوهٔ نوع ۴، ۵، ۶، و... نیز رادیواکتیو باشند)، چون هر نمونه ازنمونهٔ قبل از خود به‌وجود می‌آید، می‌توانیم معادلهٔ (۲۹.۶) را به‌آسانی تعمیم دهیم



شکل ۷.۶ مثالی از تعادل در واپاشی $^{234}U(2.45\times10^5\,y)$ به $^{230}Th(8.0\times10^4\,y)$. نسبت $\mathcal{A}_2/\mathcal{A}_1$ به‌سمت مقدار ثابت ۱٫۴۸ میل می‌کند.

$$dN_i=\lambda_{i-1}N_{i-1}\,dt-\lambda_i N_i\,dt \qquad (۳۶.۶)$$

یك جواب عمومی برای موردی که در ابتدا N_0 هستهٔ نوع ۱ وجود داشته باشد و هیچ هستهٔ نوع دیگر موجود نباشد، از معادلات باتمان به دست می‌آید، کـه در آن اکتیویتهٔ عنصر nام زنجیره برحسب ثابت واپاشی کلیهٔ اعضای قبل از آن داده می‌شود

$$\mathcal{A}_n=N_0\sum_{i=1}^{n}c_i e^{-\lambda_i t}$$
$$=N_0(c_1e^{-\lambda_1 t}+c_2e^{-\lambda_2 t}+\dots+c_ne^{-\lambda_n t}) \qquad (۳۷.۶)$$

که در آن داریم

$$c_m=\frac{\prod_{i=1}^{n}\lambda_i}{\prod_{i=1}^{n}{}'(\lambda_i-\lambda_m)}$$
$$=\frac{\lambda_1\lambda_2\lambda_3\dots\lambda_n}{(\lambda_1-\lambda_m)(\lambda_2-\lambda_m)\dots(\lambda_n-\lambda_m)} \qquad (۳۸.۶)$$

علامت پریم در مخرج رابطهٔ فوق (علامت حاصلضرب Π') نشان می‌دهد کـه جملات با $i=m$ حذف شده‌اند.

دراین مورد نیز می‌توان به‌تعادل دیرپا رسید، که دراین صورت داریم

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \cdots = \lambda_n N_n$$

۵.۶ انواع واپاشیها

سه نوع عمدهٔ واپاشی که در فصول ۸، ۹، و ۱۰ به تفصیل بررسی می‌شوند، واپاشیهای آلفازا، بتازا، وگامازا هستند. در فرایندهای واپـاشی آلفازا و بتازا، یك هستهٔ ناپایدار برای رسیدن به‌هستهٔ پایدارتر(یعنی برای نزدیك‌شدن به‌پایدارترین ایزوبار باعدد جرمی مـورد نظر) یك ذرهٔ α یا β گسیل می‌کنـد. در فرایندهای واپاشی گامازا، یك حالت برانگیخته‌بدون هیچگونه تغییر هسته‌ای به‌حالت پایه واپاشیده می‌شود.

واپاشی آلفازا

دراین فرایند، هسته یك ذرهٔ آلفا گسیل می‌کند (که رادرفورد و همکارانش نشان دادندکه این ذره همان هستهٔ هلیم، ${}^{4}_{2}He_2$، است). هستهٔ ${}^{4}He$ از آن رو به‌عنوان عامل این فرایند درآمده است که سیستمی با پیوند بسیار مستحکم است، و درنتیجه انرژی جنبشی آزادشده در واپاشی به حداکثر می‌رسد. این واپاشیها، چنانکه در فصل ۸ خواهیم دید، فرایندهای ترجیحی هستند. این فرایند واپاشی را به‌صورت زیر می‌توان نشان داد

$${}^{A}_{Z}X_N \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X'_{N-2} + {}^{4}_{2}He_2$$

که در آن X و X' نمایندهٔ علائم شیمیایی هسته‌های اولیه و نهایی‌اند. باید توجه داشته باشیم که در فرایند واپاشی، تعداد پروتونها ونوترونها هریك به‌تنهایی باید پایسته بماند. نمونهٔ زیرمثالی از فرایند واپاشی آلفازاست

$${}^{226}_{88}Ra_{138} \rightarrow {}^{222}_{86}Rn_{136} + \alpha$$

که درآن نیمه‌عمر برابر ۱۶۰۰ سال است و ذرهٔ α با انرژی جنبشی حدود ۴٫۸ MeV ظاهر می‌شود.

واپاشی بتازا

در اینجا هسته می‌تواند اضافه نوترون یا اضافه پروتون خود را مستقیماً با تبدیل پروترن به‌نوترون و یا نوترون به‌پروتون برطرف کند. این فرایند به سه صورت امکان‌پذیراست،

که در هریك از آنها برای پایستگی بارالکتریکی باید ذرهٔ باردار دیگری نیز گسیل شود (بعدها معلوم شد که این ذرهٔ باردار که در ابتدا ذرهٔ β خوانده می‌شد، الکترون معمولی است).

$$n \rightarrow p + e^- \qquad \beta^- \text{ واپاشی}$$

$$p \rightarrow n + e^+ \qquad \beta^+ \text{ واپاشی}$$

$$p + e^- \rightarrow n \qquad (\varepsilon) \text{ گیراندازی الکترون}$$

نخستین فرایند که به‌نام واپاشی بتای‌منفی یا واپاشی نگاترون معروف است، مستلزم آفرینش و گسیل یك الکترون معمولی است. دومین فرایند واپاشی بتای مثبت یا واپاشی پوزیترون‌زاست، که در آن یك الکترون با بار مثبت گسیل می‌شود. در سومین فرایند، یك الکترون اتمی که به هسته نزدیك است بلعیده می‌شود، و بدین ترتیب تبدیل پروتون به‌نوترون تحقق می‌یابد.

در هرسه فرایند، ذرهٔ دیگری به نام نوترینو نیز گسیل می‌شود، ولی چون نوترینو بارالکتریکی ندارد، انضمام آن درفرایند واپاشی‌هویت سایرذرات نهایی‌را تغییر نمی‌دهد.

توجه کنید که در واپاشیهای بتازای مثبت و منفی، یك ذره خلق می‌شود (با صرف انرژی واپاشی وطبق رابطهٔ $m = E/c^2$). الکترون و پوزیترون قبل از واپاشی در هسته وجودندارند. (برخلاف مورد واپاشی آلفازا، که در آن نوکلئونهای گسیلی قبل‌از واپاشی درهسته موجودند.)

چند نمونه از فرایند واپاشی بتازا به‌صورت زیراست

$$^{۱۳۱}_{۵۳}I_{۷۸} \xrightarrow[\beta^-]{} {}^{۱۳۱}_{۵۴}Xe_{۷۷} \qquad t_{۱/۲} = ۸٫۰ \text{ d}$$

$$^{۲۵}_{۱۳}Al_{۱۲} \xrightarrow[\beta^+]{} {}^{۲۵}_{۱۲}Mg_{۱۳} \qquad t_{۱/۲} = ۷٫۲ \text{ s}$$

$$^{۵۴}_{۲۵}Mn_{۲۹} \xrightarrow[\varepsilon]{} {}^{۵۴}_{۲۴}Cr_{۳۰} \qquad t_{۱/۲} = ۳۱۲ \text{ d}$$

دراین فرایند Z و N هریك به‌اندازهٔ یك واحد تغییرمی‌کنند، اما عدد جرمی کل $(Z+N)$ ثابت می‌ماند.

واپاشی گامازا

گسیل رادیواکتیو γ مشابه گسیل تابشهای اتمی، مانندگذارهای اپتیکی یا پرتو x است.

یك حالت هسته‌ای برانگیخته با گسیل یك فوتون γ با انرژی برابر با اختلاف انرژی دو حالت (منهای تصحیح قابل چشمپوشی مربوط به‌انرژی «پس‌زنی» هستهٔ گسیلنده) به‌حالت هسته‌ای پایینتر باحالت پایه تنزل می‌کند. گسیل گاما در تمام هسته‌هایی که حالت برانگیختهٔ مقید دارند ($A>۵$) مشاهده می‌شود، ومعمولا به‌دنبال واپاشیهای آلفازا و بتازا صورت می‌گیرد، زیرا در این واپاشیها معمولا هستهٔ دختر درحالت برانگیخته تشکیل می‌شود.

نیمه‌عمر گسیل γ معمولا بسیار کوتاه، عموماً کمتراز $۱۰^{-۹}$ s، است. ولی درمواردی نیمه‌عمرهای طولانیتر در حدود ساعت یا روز نیز مشاهده شده است. این گذارها را گذارهای ایزومری و حالتهای برانگیختهٔ با عمر طولانی را حالتهای ایزومری یا ایزومرها (یا گاهی حالتهای شبه پایدار) می‌نامند. معیار روشنی برای طبقه‌بندی حالتها به صورت ایزومری و غیرایزومری وجود ندارد. قبلا معیار این تقسیم بندی، قابلیت اندازه‌گیری نیمه‌عمر به‌طور مستقیم بود، ولی امروزه می‌توانیم نیمه‌عمرهای خیلی کمتراز $۱۰^{-۹}$ s را نیز اندازه بگیریم. مسلماً حالت با $t_{۱/۲}=۱۰^{-۶}$ s ایزومر است و حالت با نیمه‌عمر $t_{۱/۲}=۱۰^{-۱۲}$ s ایزومرنیست، ولی بین این دوحد باوضعیتی نسبتاً مبهم روبه‌رو می‌شویم. معمولا حالتهای شبه‌پایدار راباشاخص بالای m مشخص می‌کنیم: مانند $^{۱۱۰}Ag^{m}$ یا ^{۱۱۰m}Ag.

فرایندی که غالباً با گسیل γ رقابت می‌کند تبدیل داخلی است، که در آن هسته با انتقال مستقیم انرژی‌اش به یك الکترون اتمی واانگیخته می‌شود. این الکترون سپس در آزمایشگاه به صورت الکترون آزاد ظاهر می‌شود. (این فرایند با واپاشی بتازا خیلی تفاوت دارد، زیرا در این فرایند تغییری در N و Z رخ نمی‌دهند، هرچند که اتم در اثر واپاشی یونیده می‌شود.)

شکافت خودبه‌خود

اغلب تصور می‌کنیم که شکافت تحت شرایط غیرطبیعی و مصنوعی، مثلا در یك رآکتور هسته‌ای، رخ می‌دهد. اما بعضی هسته‌ها درطبیعت وجود دارندکه عمل‌واپاشی رادیواکتیو درآنها به‌صورت شکافت خودبه‌خود ظاهرمی‌شود. این فرایند با شکافت ایجاد شده توسط نوترون، که در رآکتورها رخ می‌دهد، مشابهت دارد ولی با این تفاوت که دراین مورد لزومی به‌گیراندازی قبلی نوترون برای شروع شکافت نیست. دراین فرایند، هستهٔ سنگینی که نوترون اضافی دارد تقریباً به‌دو نیمه تقسیم می‌شود و به‌دو هستهٔ سبکتر تبدیل می‌شود. هسته‌های نهایی، برخلاف واپاشی آلفازا و بتازا دقیقاً مشخص نیستند، بلکه به‌طورآماری در گسترهٔ هسته‌های میان وزن توزیع می‌شوند. هسته‌های $^{۲۵۶}Fm(t_{۱/۲}=۲٫۶\ h)$ و $^{۲۵۴}Cf(t_{۱/۲}=۶۰٫۵\ d)$ نمونه‌هایی هستندکه خود به‌خود شکافته می‌شوند.

گسیل نوکلئون

بادورشدن هرچه بیشتراز «درهٔ» هسته‌های پایدار، اختلاف انرژی بین ایزوبارهای مجاور

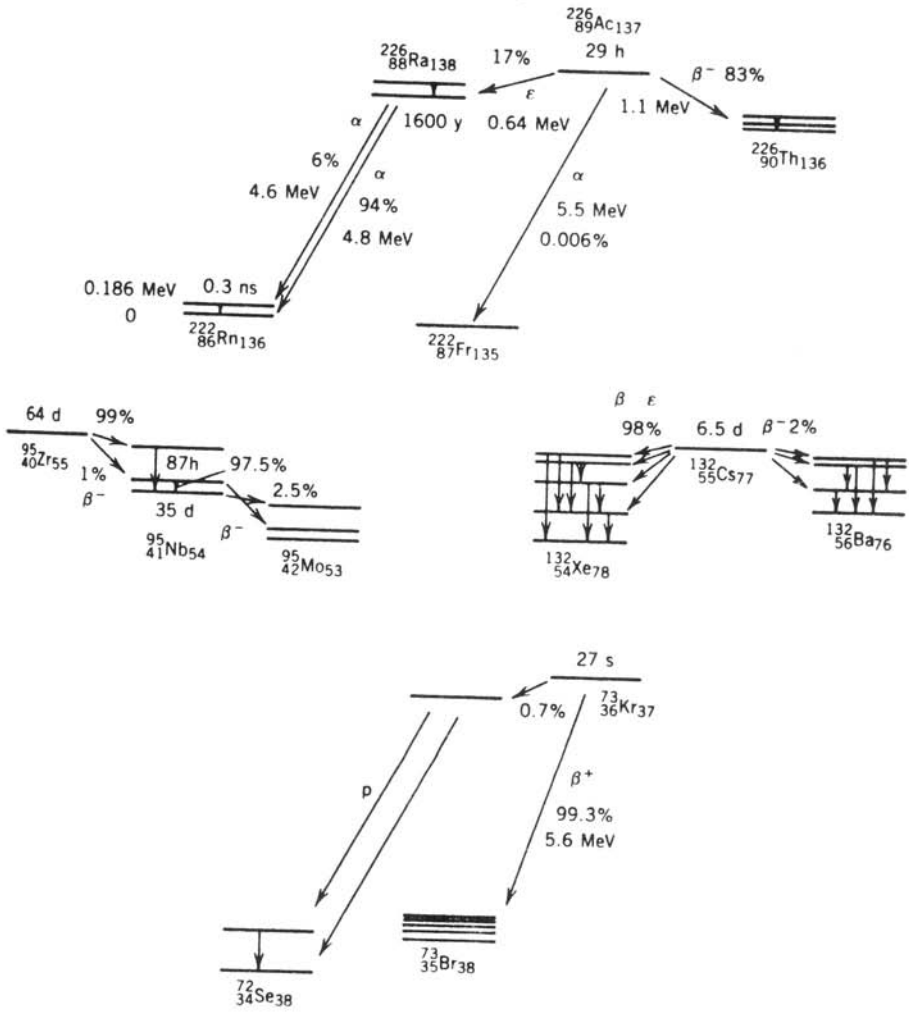
افزایش می‌یابد (سهمیهای جرمی برای هسته‌های با A ثابت در شکل ۱۸.۳). سرانجام این اختلاف انرژی از انرژی بستگی نوکلئون (که به‌طور متوسط برابر ۸ MeV است) بیشترمی‌شود و واپاشی رادیواکتیو با گسیل نوکلئون امکان‌پذیر می‌شود. این نوع واپاشی اغلب در محصولات شکافت که اضافه نوترون زیادی دارند رخ می‌دهد، و همین فرایند است که نوترونهای «تأخیری» (تأخیری درحد نیمه‌عمرواپاشی‌نوکلئونی) موردنیازکنترل رآکتورهای هسته‌ای را تأمین می‌کند. به‌عنوان مثال، ^{۱۳۸}I با تابش بتا با نیمه‌عمر ۶٫۵ s به ^{۱۳۸}Xe واپاشیده می‌شود. بیشتر این واپاشیها منجر به حالات برانگیختهٔ کم‌انرژی در ^{۱۳۸}Xe می‌شوند. ولی درحدود ۵٪ از واپاشیها در ^{۱۳۸}I به‌ترازهای برانگیختهٔ ^{۱۳۸}Xe با انرژی بیش از ۶٫۵ MeV منجر می‌شوند، که این حالات با گسیل مستقیم نوترون به ^{۱۳۷}Xe منتهی می‌شوند. به‌همین ترتیب، ۰٫۷٪ از واپاشیهای ^{۷۳}Kr از طریق گسیل β^+ ($t_{۱/۲} = ۲۷\ s$) به ترازهای ^{۷۳}Br با انرژی حدود ۵ MeV منتهی می‌شوند، که این حالات با گسیل پروتون به‌حالات ^{۷۲}Se واپاشیده می‌شوند.

نسبتهای انشعاب و نیمه‌عمرهای جزئی

انواع مختلف فرایندهای واپاشی درشکل ۸.۶ خلاصه شده‌اند، وشکل ۹.۶ بخش کوچکی ازجدول هسته‌های پایدار و رادیواکتیو (شکل ۱.۱) را نشان می‌دهدکه درآن چند فرایند واپاشی مشخص شده است. بعضی هسته‌ها فقط طی یك فرایند واپاشیده می‌شوند، ولی غالباً نمودار واپاشی بسیار پیچیده و شامل گسیل آلفا، بتا، و گاما در مدهایی است که با همدیگر در رقابت‌اند. شدت نسبی مدهای رقیب را نسبتهای انشعاب می‌نامیم. بنابراین ^{۲۲۶}Ra در واپاشی آلفازا با نسبت انشعاب ۹۴٪ به حالت پایه وبا نسبت انشعاب ۶٪ به اولین حالت برانگیختهٔ ^{۲۲۲}Rn واپاشیده می‌شود. اغلب مدهای مختلف واپاشی باهم‌قابل رقابت‌اند: واپاشی ^{۲۲۶}Ac به صورتهای گسیل α (۰٫۰۰۶٪)، گسیل β^- (۸۳٪)، و گیراندازی الکترون ε (۱۷٪) انجام می‌شود؛ واپاشی ^{۱۳۲}Cs به صورتهای گسیل β^- (۲٪)، β^+، و ε (۹۸٪) صورت می‌گیرد؛ حالت شبه‌پایدار ^{۹۵m}Nb با گسیل β^- (۲٫۵٪) و با گذار ایزومری (۹۷٫۵٪) واپاشیده می‌شود. گذار ایزومری خود شامل یك شاخهٔ ۲۷ درصدی گسیل γ و یك شاخهٔ ۷۳ درصدی تبدیل داخلی است.

معمولا نسبت انشعاب را با ثابت واپاشی جزئی یا نیمه‌عمر جزئی مشخص می‌کنیم. به عنوان مثال واپاشی ^{۲۲۶}Ac ($t_{۱/۲} = ۲۹\ h$) را در نظر می‌گیریم. ثابت واپاشی کل برابر است با

$$\lambda_t = \frac{۰٫۶۹۳}{t_{۱/۲}} = ۰٫۰۲۴\ h^{-۱} = ۶٫۶ \times ۱۰^{-۶}\ s^{-۱}$$



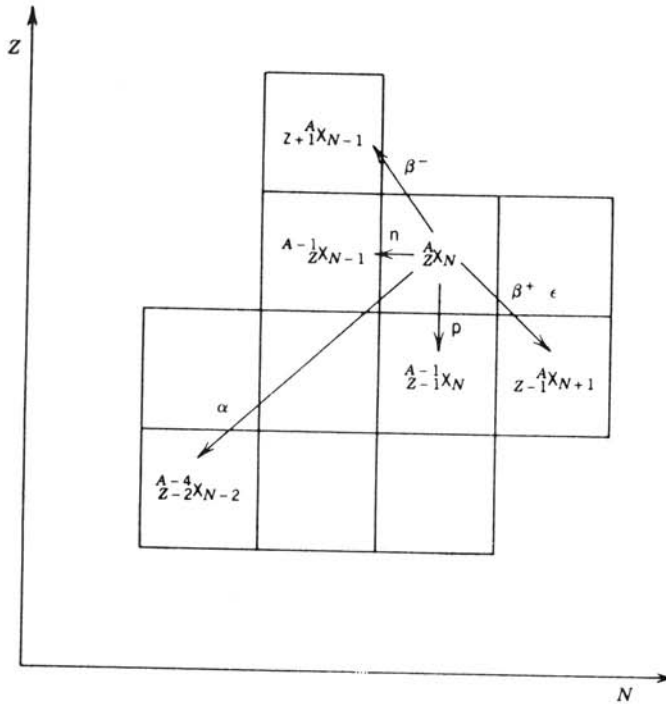
شکل ۸.۶ انواع مختلف فرایندهای واپاشی.

و ثابتهای واپاشی جزئی عبارت‌اند از

$$\lambda_\beta = ۰٫۸۳\lambda_t = ۵٫۵ \times ۱۰^{-۶}\,s^{-۱}$$

$$\lambda_\varepsilon = ۰٫۱۷\lambda_t = ۱٫۱ \times ۱۰^{-۶}\,s^{-۱}$$

$$\lambda_\alpha = ۶ \times ۱۰^{-۵}\lambda_t = ۴ \times ۱۰^{-۱۰}\,s^{-۱}$$



شکل ۹.۶ هستهٔ اولیهٔ $^{A}_{Z}X_{N}$ از طریق فرایندهای مختلف واپاشی می‌تواند به‌حالتهای نهایی متنوعی برسد.

و نیمه‌عمرهای جزئی به‌قرار زیرند

$$t_{1/2,\beta}=\frac{0.693}{\lambda_\beta}=1.3\times10^{5}\,\mathrm{s}=35\,\mathrm{h}$$

$$t_{1/2,\varepsilon}=\frac{0.693}{\lambda_\varepsilon}=6.1\times10^{5}\,\mathrm{s}=170\,\mathrm{h}$$

$$t_{1/2,\alpha}=\frac{0.693}{\lambda_\alpha}=1.7\times10^{9}\,\mathrm{s}=55\,\mathrm{y}$$

استفاده از نیمه عمرجزئی روشی آسان برای معرفی نسبتهای انشعاب است؛ نظری به‌شکلهای بالا نشان می‌دهد که برای ^{226}Ac احتمال گسیل α بسیار کمتر از β است. اما، در عمل مشاهده می‌شود که اکتیویته فقط با نیمه‌عمرکل واپاشیده می‌شود. حتی اگر واپاشی ^{226}Ac را با توجه به گسیل α مورد مشاهده قرار دهیم، اکتیویته با گذشت زمان با نیمه عمر 29 h کاهش می‌یابد. (اگر این مطلب حقیقت نداشت و دو ناظر واپاشی ^{226}Ac را یکی با مشاهدهٔ β و دیگری با مشاهدهٔ α بررسی می‌کردند. چون قانون واپاشی رادیواکتیو تعداد هسته‌های ناواپاشیده را معین می‌کند، ناظر β نتیجه می‌گرفت که نیمی از هسته‌های ^{226}Ac پس از

۳۵ساعت باقیمانده است، درحالی که ناظر α برای مشاهدهٔ واپاشی نیمی از هسته‌ها باید ۵۵ سال صبر می‌کرد! درحقیقت، نیمی از هسته‌ها در هر ۲۹ ساعت بدون توجه به‌روش مشاهدهٔ واپاشیها واپاشیده می‌شوند.)

۶.۶ رادیواکتیویتهٔ طبیعی

زمین وسایر سیارات منظومهٔ شمسی درحدود $۴٫۸ \times ۱۰^{۹}$ سال قبل ازموادی تشکیل‌شدند که از نظر آهن، کربن، اکسیژن، سیلیسیم، و سایر عناصر میان‌وزن و سنگین غنی بودند. این عناصر هم به‌نوبهٔ خود از ترکیب هیدروژن و هلیم که طی انفجار بزرگ موسوم به‌مهبانگ درحدود ۱۵×۱۰^{۹} سال قبل تولید شده بودند به‌وجودآمدند. درفاصلهٔ‌زمانی ۱۰×۱۰^{۹} سال بین مهبانگ تا تشکیل منظومهٔ شمسی، هیدروژن وهلیم درقسمتهای‌داخلی ستاره‌ها، نواخترها، و ابرنواخترها «پخته» شدند و به‌صورت عناصرسنگین‌تر درآمدند که ما زمینی‌ها هم امروز ازبقایای تغییرشکل‌یافتهٔ همان ستاره‌های نابود شده به‌شمارمی‌رویم. بیشتر عناصری که به این طریق تولید شدند رادیواکتیو بودند، اما از آن زمان تاکنون به‌هسته‌های پایدار واپاشیده‌اند. نیمه‌عمر تعداد اندکی از عناصر رادیواکتیو درمقایسه با عمر زمین طولانی است، وبنابراین هنوزهم می‌توانیم رادیواکتیویتهٔ آنها را ملاحظه‌کنیم. همین رادیواکتیویته است که بخش عمده‌ای از اکتیویتهٔ محیط‌طبیعی ما را تشکیل می‌دهد، واحتمالا گرمای درونی سیاراتی مانندزمین نیز ازهمین‌جا نشأت می‌گیرد.

اگرچه انواع زیادی عناصر رادیواکتیو طبیعی با عمر طولانی وجود دارند، ولی منشأ اغلب آنهایی که امروزه مشاهده می‌شوند به‌عناصر بسیارسنگین مربوط می‌شودکه‌هیچ ایزوتوپ پایداری ندارند. این نوکلیدها باگسیل α و β واپاشیده می‌شوند، و Z و A درآنها آن‌قدر کاهش می‌یابد تا سرانجام یك هستهٔ پایدار سبکتر حاصل می‌شود. واپاشی آلفازا A را چهارواحد تغییر می‌دهد ولی واپاشی بتازا سبب تغییر A نمی‌شود. از این‌رو، درطبیعت باچهار زنجیرهٔ واپاشی مستقل بااعداد جرمی $۴n$، $۴n+۱$، $۴n+۲$، و $۴n+۳$ روبه‌رو می‌شویم که درآنها n عددصحیح است. فرایندهای واپاشی‌باعث وفور هسته‌هایی خواهند شدکه دراز ـ عمرترین عضو زنجیره محسوب می‌شوند، واگر طول‌عمر این نوع نوکلیدها دست‌کم درحدود عمر زمین‌باشد، هنوزهم قادر به‌مشاهدهٔ اکتیویتهٔ ناشی‌ازآنها خواهیم بود. این‌چهار زنجیره درجدول ۱.۶ فهرست شده‌اند. توجه کنیدکه نیمه عمر دراز ـ عمرترین عضو نپتونیم به‌اندازه‌ای‌کوتاه بوده است که از زمان تشکیل‌زمین تاکنون دوام نیاورده است؛ به‌همین‌دلیل این‌سری را درمواد طبیعی مشاهده نمی‌کنیم.

به‌عنوان مثال، سری توریم را درنظر بگیریدکه درشکل ۱۰.۶ نشان‌داده شده است. فرض می‌کنیم که‌درمدت‌زمان‌کوتاه، انواع‌ایزوتوپهای پلوتونیم (Pu) را تولیدکرده‌ایم. ایزوتوپهای ^{۲۳۲}Pu و ^{۲۳۶}Pu به‌سرعت به ^{۲۳۲}U با نیمه عمر ۷۲ سال و سایر نمونه‌های با نیمه عمر خیلی‌کوتاهتر واپاشیده می‌شوند. بنابراین، طی زمانی‌که درمقایسه با ۷۲سال

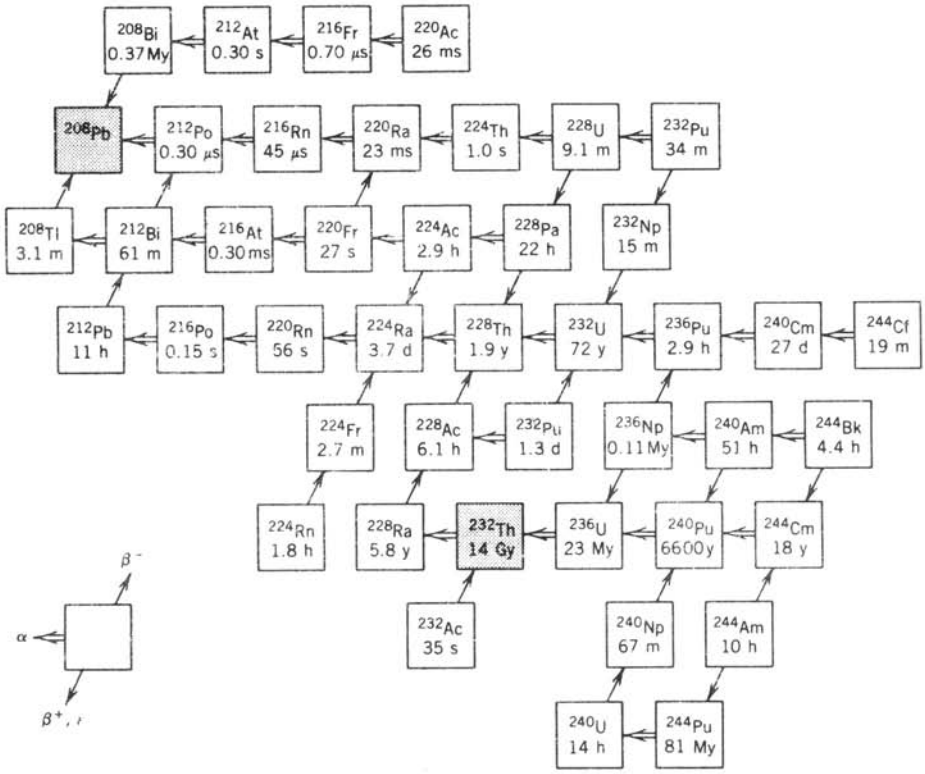
جدول ۱.۶ بعضی از مشخصات سریهای فروپاشی عناصر سنگین.

نام سری	نوع*	هستهٔ پایدار نهایی	دراز ـ عمرترین عضو	
			هسته	نیمه عمر (y)
توریم	$4n$	^{208}Pb	^{232}Th	1.41×10^{10}
نپتونیم	$4n+1$	^{209}Bi	^{237}Np	2.14×10^{6}
اورانیم	$4n+2$	^{206}Pb	^{238}U	4.47×10^{9}
اکتینیم	$4n+3$	^{207}Pb	^{235}U	7.04×10^{8}

* n همواره عدد صحیح است.

طولانی است (مثلا 10^3 سال) ردکلیهٔ این ایزوتوپها از بین می‌رود وفقط محصول پایدار نهایی ^{208}Pb بجا می‌ماند. ایزوتوپهای ^{240}Pu و ^{244}Pu بسیار کندتر به ^{236}U تبدیل می‌شوند(اولی نسبتاً سریعتر ودومی خیلی به کندی). اورانیم ۲۳۶ به‌نوبهٔ‌خود به‌دراز ـ عمرترین عضو این‌سری یعنی ^{232}Th واپاشیده می‌شود. در طی زمانی بیشتر از 81×10^6 سال وکمتر از 14×10^9 سال، ^{240}Pu و ^{244}Pu اولیه (و ^{236}U واسطه) تماماً واپاشیده‌شده و به‌صورت ^{232}Th درآمده‌اند، که واپاشی ^{232}Th هنوزهم قابل‌مشاهده است.

این ایزوتوپهای رادیواکتیو در موادی‌که در اطراف ما وجود دارند، و مخصوصاً درصخره‌ها وکانیهایی‌که 4.5×10^9 سال‌قبل‌همراه‌با زمین تشکیل‌شده‌اند، دیده‌می‌شوند. [درحقیقت، بررسی واپاشی‌آنها روش قابل اعتمادی برای تعیین زمان تشکیل صخره‌ها و درنتیجه عمرزمین به‌شمار می‌رود؛ برای بحث درمورد این روشها به‌بخش ۷.۶ وفصل ۱۹ (جلددوم. ترجمهٔ‌فارسی) رجوع کنید.] عموماً عناصر رادیواکتیو به‌صورتی‌وجود دارند که باموادمعدنی پیوند خورده‌اند و تهدیدی برای‌سلامت‌ما نیستند، ولی‌تمام سریهای‌رادیواکتیو طبیعی‌حاوی گاز رادیواکتیو رادن هستند. این عنصر، اگر دراعماق صخره‌ها تشکیل شود، معمولاً قبل‌از واپاشی‌شانس‌اندکی‌برای‌رسیدن به‌سطح‌صخره ودرنتیجه ورودبه‌هوا را خواهد داشت. اما با شکسته‌شدن صخره‌ها، گاز رادن به‌خارج از صخره فرار می‌کند (درحقیقت، درسالهای اخیر وجـود گاز رادن درهوا مقدمهٔ بروز زلـزله تشخیص داده شده است). احتمال فرار رادن از سطح‌کانیها، ومخصوصاً مصالحی‌که برای‌ساختمانها به‌کار می‌روند، نیزوجود دارد. استنشاق‌این گاز رادیواکتیو می‌تواندعلت بسیاری‌ازسرطانهای ریه‌محسوب شود، و ظن قوی می‌رود که این فرایند سرطان‌زایی دراثر سیگار کشیدن و به‌واسطهٔ تجمع این محصولات‌رادیواکتیو در ریه‌ها تشدیدشود. شایان‌ذکراست‌که تمایل اخیر به‌احداث



شکل ۱۰.۶ واپاشیهای رادیواکتیو طبیعی در سری توریم. بعضی نیمه‌عمرها با My(10^6y) و Gy(10^9y) مشخص شده‌اند. دراز ـ عمرترین اعضای رادیواکتیو این سری (که توریم نامگذاری شده‌است) وهمچنین محصول پایدار نهایی آن به‌صورت سایه‌دار نشان‌داده شده‌اند.

ساختمانهای عایق‌بندی شده وکاملا بسته برای صرفه‌جویی انرژی ممکن‌است به‌افزایش گاز رادن منجر شده باشد، و درحال حاضر پژوهشهای زیـادی در این‌زمینه انجام می‌شود که اندازه‌گیری تجمع گاز رادن درساختمانها نیز از آن‌جمله است.

سریهای‌عناصر سنگین تنهاچشمهٔ ایزوتوپهای رادیواکتیو طبیعی با نیمه‌عمر طولانی در مواد زمینی نیستند. جدول ۲.۶ فهرستی از چشمه‌های دیگر را نشان می‌دهد که برخی از آنها می‌توانند برای عمرسنجی رادیواکتیو نیز به‌کار روند.

چشمه‌های رادیواکتیو دیگر با نیمه‌عمر نسبتاً کوتاه نیز وجود دارند که باقیماندهٔ عناصر تولید شده به‌هنگام تشکیل زمین نیستند، بلکه در زمان‌معاصر وبه‌طور پیوسته‌تولید می‌شوند. این‌عناصر که شامل ^3H و ^{14}C هستند، دراثر برخورد پرتوهای کیهانی (پروتونهای پرانرژی) با اتمهای موجود در جو ووقوع واکنش‌های هسته‌ای درجو فوقانی به‌وجـود می‌آیند. ایزوتوپ ^{14}C کاربردهای مهمی درعمرسنجی رادیواکتیو دارد.

جدول ۲.۶ برخی ایزوتوپهای رادیواکتیو طبیعی.

ایزوتوپ	$t_{1/2}$(y)
^{40}K	1.28×10^{9}
^{87}Rb	4.8×10^{10}
^{113}Cd	9×10^{15}
^{115}In	4.4×10^{14}
^{138}La	1.3×10^{11}
^{176}Lu	3.6×10^{10}
^{187}Re	5×10^{10}

۷.۶ عمرسنجی رادیواکتیو

گرچه نمی‌توان زمان واپاشی یك هسته را به‌دقت تعیین کرد، ولی تعیین دقیق زمان لازم برای واپاشی نیمی از تعداد زیادی از هسته‌ها امکان‌پذیر است. ممکن است دو گفتهٔ فوق متناقض به‌نظر آیند؛ ارتباط آنها به‌واسطهٔ استنتاجهای آماری است که با مطالعهٔ فرایندهای تصادفی فراهم می‌شود. اگر اتاقی حاوی یك مولکول گاز داشته باشیم، نمی‌توانیم با اطمینان احتمال وجود آن را در نیمهٔ چپ یا راست اتاق پیش‌بینی کنیم. اما اگر با تعداد بسیار زیاد N مولکول ($N \sim 10^{24}$) در اتاق سروکار داشته باشیم، انتظار داریم که به‌طور متوسط $N/2$ مولکول در هر نیمهٔ راست وچپ وجود داشته باشد. به‌علاوه، افت وخیز تعداد موجود در هر نیمهٔ محتوی $N/2$ مولکول درحدود $\sqrt{N}$ خواهد بود؛ بنابراین افت وخیز تعداد مولکولهای موجود در هر نیمهٔ اتاق درحدود $\sqrt{N}/N \simeq 10^{-12}$ خواهد شد. کسر مولکولهای موجود در هر نیمهٔ اتاق برابر $0.500000000000 \pm 0.000000000001$ می‌شود؛ این دقت بسیار زیاد (و نامعقول) به‌علت بزرگ بودن N و کوچك بودن خطای نسبی $N^{-1/2}$ حاصل می‌شود.

برای واپاشی رادیواکتیو هم باوضعیت مشابهی روبه‌رو می‌شویم. (قوانین شمارش آماری درفصل ۷ به‌تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند.) اگر درلحظهٔ $t = 0$ مجموعه‌ای متشکل از تعداد زیاد N_0 هستهٔ رادیواکتیو در دست باشد، پس از گذشت یك نیمه‌عمر کسر باقیماندهٔ هسته‌ها برابر $1/2 \pm N_0^{-1/2}$ خواهدشد. بنابراین، به‌رغم ماهیت کاتوره‌ای

فرایند واپاشی، واپاشی هسته‌های رادیواکتیو زمان‌سنج بسیار دقیق وکاملا قابل‌اعتمادی برای ثبت گذشت زمان است. یعنی اگر ثابت واپاشی λ را بدانیم، کاهش‌نمایی اکتیویتهٔ یك نمونه می‌تواند برای اندازه‌گیری زمان به‌کار رود.

استفاده ازاین‌فرایند وقتی‌با مشکل‌روبه‌رو می‌شود که بخواهیم آن‌را در واپاشیهایی که طی زمانهای زمین‌شناختی ($\sim 10^9$y) رخ می‌دهند به‌کار ببریم، زیرا دراین مورد تغییرات اکتیویته برحسب زمان را اندازه نمی‌گیریم. درعوض، از تعداد نسبی هسته‌های مادر ودختر درزمان t_1 (زمان حال) درمقایسه‌با تعداد آنها در زمان t_0 (وقتی که«زمان‌سنج» شروع به‌کار کرده‌است، که معمولا همان‌زمان چگالش موادی مانندصخره‌های کانی است که بر اثر آن‌هسته‌های مادر درمحلهای فعلی محبوس شده‌اند) استفاده می‌کنیم. این فرایند دراصل فرایندی نسبتاً ساده است. با معلوم بودن واپاشی ایزوتوپ مادر P به‌دختر D، فقط (مثلا بااستفاده از روشهای شیمیایی) تعداد اتمهای موجود P و D یعنی $N_P(t_1)$ و $N_D(t_1)$ را را می‌شماریم

$$N_D(t_1)+N_P(t_1)=N_P(t_0) \qquad (۳۹.۶)$$

$$N_P(t_1)=N_P(t_0)e^{-\lambda(t_1-t_0)} \qquad (۴۰.۶)$$

$$\Delta t\equiv t_1-t_0=\frac{1}{\lambda}\ln\frac{N_P(t_0)}{N_P(t_1)}$$

$$\Delta t=\frac{1}{\lambda}\ln\left(1+\frac{N_D(t_1)}{N_P(t_1)}\right) \qquad (۴۱.۶)$$

بامعلوم بودن ثابت واپاشی (که می‌توان آن‌را درآزمایشگاه اندازه‌گرفت) و نسبت فعلی هسته‌های دختر به‌مادر، سن نمونه مستقیماً به‌دست می‌آید. دقت این روش به‌دقت شناخت λ و آمار شمارش N_P و N_D بستگی دارد.

معادلات (۳۹.۶) و (۴۰.۶) متضمن فرضهایی است‌که باید قبل ازکاربرد معادلهٔ (۴۱.۶) برای تعیین عمر نمونه به‌دقت بررسی شوند. درمعادلهٔ (۳۹.۶) فرض شده‌است $N_D(t_0)=0$ و این بدان معنی است‌که در لحظهٔ $t=0$ هیچ اتم دختری وجود ندارد؛ همچنین فرض شده‌است‌که تعداد کل اتمها ثابت مانده است، یعنی هیچ اتم مادر یا دختری ازمحیط اولیهٔ کانی یا جسم‌جامد فرار نمی‌کند. دربحث زیر خواهیم دیدکه می‌توان‌طرز تعیین Δt را چنان اصلاح کرد که تعداد اتمهای‌دختر درلحظهٔ t_0 را هم شامل‌شود (اگرچه درتحلیل امروز که در زمان t_1 انجام می‌شود، نمی‌توانیم بگوییم که چه اتمهای دختری ابتدا درنمونه موجود بودند وکدامیك ازآنها دراثر واپاشی در زمان Δt ناشی شده‌اند). درمعادلهٔ (۴۰.۶) فرض شده‌است‌که تغییرات N_P فقط در اثر واپاشی موردنظر حاصل می‌شود، یعنی‌هیچ‌اتم مادری به‌روشهای دیگر (مثلادراثر واپاشی‌قبلی ویا دراثرواکنشهای هسته‌ای ایجاد شده توسط پرتوهای کیهانی) تولید نمی‌شود.

اکنون محدودیت فرضها را درمعادلهٔ (۳۹.۶) کمتر می‌کنیم، و فرض می‌کنیم تعدادی هستهٔ دخترهم درلحظهٔ $t=t_0$ درنمونه وجود داشته باشند. این هسته‌های دختر می‌توانند ناشی از واپاشی هسته‌های مادر در زمان قبل از t_0 یا فرایندهایی (مانند یك انفجار ابرنواختر) باشند که هسته‌های اولیهٔ مادر را به‌وجود آورده‌اند. چگونگی تشکیل این هسته‌های دختر اولیه درمحاسبات ما حائز اهمیت نیست. بنابراین می‌توان نوشت

$$N_D(t_1)+N_P(t_1)=N_D(t_0)+N_P(t_0) \qquad (۴۲.۶)$$

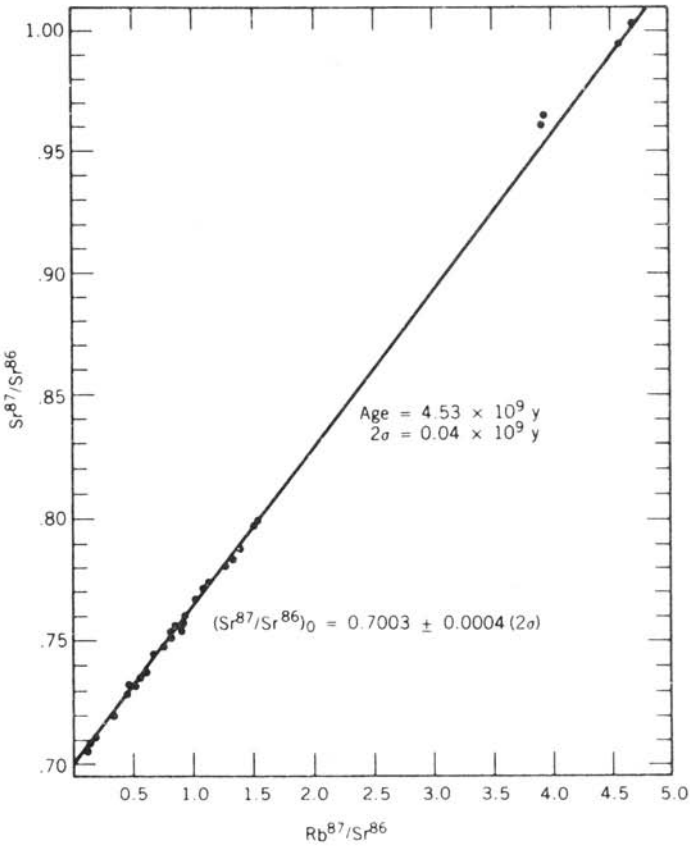
به‌علت ورود مجهول $N_D(t_0)$، نمی‌توان معادله را مستقیماً حل کرد و Δt را به‌دست آورد. اما اگر ایزوتوپ دختر دیگری مانند D' هم درنمونه وجود داشته باشد که رادیواکتیو نبوده و از واپاشی مادری باعمرطولانی نیز تشکیل نشده باشد، می‌توانیم عمر نمونه را تعیین کنیم. تعداد موجود این ایزوتوپ پایدار را با $N_{D'}$ نشان می‌دهیم که اگر D' پایدار باشد داریم $N_{D'}(t_1)=N_{D'}(t_0)$، و دراین‌صورت

$$\frac{N_D(t_1)+N_P(t_1)}{N_{D'}(t_1)}=\frac{N_D(t_0)+N_P(t_0)}{N_{D'}(t_0)} \qquad (۴۳.۶)$$

که می‌توانیم آن‌را به‌صورت زیر بنویسیم

$$\frac{N_D(t_1)}{N_{D'}(t_1)}=\frac{N_P(t_1)}{N_{D'}(t_1)}\left[e^{\lambda(t_1-t_0)}-1\right]+\frac{N_D(t_0)}{N_{D'}(t_0)} \qquad (۴۴.۶)$$

نسبتهای $N_D(t_1)/N_{D'}(t_1)$ و $N_P(t_1)/N_{D'}(t_1)$ را می‌توان در آزمایشگاه اندازه‌گیری کرد، ولی هنوزهم دومجهول عمر Δt و نسبت اولیهٔ ایزوتوپها $N_D(t_0)/N_{D'}(t_0)$ درمعادلهٔ (۴۴.۶) باقی‌می‌مانند. کانیهایی که از یك منشأ به‌صورت بلور درآمده‌اند باید سن و نسبت ایزوتوپی $N_D(t_0)/N_{D'}(t_0)$ یکسان داشته باشند، اگرچه $N_P(t_0)$ اولیه در آنها ممکن است بسیارمتفاوت باشد (مثلا به‌علت ترکیب شیمیایی متفاوت). اگر این فرضیه‌ها صحیح باشند، انتظار داریم که‌درحال‌حاضر کانیهایی را با نسبتهای مختلف $N_D(t_1)/N_{D'}(t_1)$ و $N_P(t_1)/N_{D'}(t_1)$ ومقادیر یکسان Δt و $N_D(t_0)/N_{D'}(t_0)$ مشاهده کنیم. این فرضها را می‌توان بارسم $y=N_D(t_1)/N_{D'}(t_1)$ برحسب $x=N_P(t_1)/N_{D'}(t_1)$ برای کانیهای مختلف آزمود. معادلهٔ (۴۴.۶) به‌صورت $y=mx+b$ خط‌راستی باشیب $m=e^{\lambda(t_1-t_0)}-1$ ومحل برخورد $b=N_D(t_0)/N_{D'}(t_0)$ است. شکل ۱۱.۶ نمونه‌ای ازکاربرد این روش را برای واپاشی $^{87}Rb\rightarrow{}^{87}Sr(t_{1/2}=4.8\times10^{10}y)$ نشان می‌دهد، که در آن مبنای مقایسه ^{86}Sr پایدار است. اگرچه نسبت فعلی ^{87}Rb به ^{86}Sr با بیش ازیك مرتبهٔ بزرگی تغییر می‌کند، ولی با استفاده‌ازکلیهٔ اطلاعات موجود سن‌زمین‌را برابر $\Delta t=4.5\times10^{9}y$ به‌دست می‌آوریم. دراین‌روش، برازش خطی مناسب اهمیت زیادی‌دارد، زیرا همین برازش است که فرضهای ناپدید نشدن هسته‌های مادر ودختر را توجیه می‌کند.



شکل ۱۱.۶ روش عمرسنجی Rb-Sr بادرنظر گرفتن ^{۸۷}Sr اولیه. رفتارخطی بامعادلهٔ (۴۴.۶) سازگار است.

از دیگر روشهای مشابه برای عمرسنجی کانیهای زمین، ماه و شهابسنگها هم‌سن‌مشترك $۴٫۵ \times ۱۰^۹$ سال حاصل‌می‌شود. این روشها شامل واپاشی ^{۴۰}K به ^{۴۰}Ar، واپاشی ^{۲۳۵}U و ^{۲۳۸}U به ^{۲۰۷}Pb و ^{۲۰۶}Pb، وشکافت خود به‌خود ^{۲۳۸}U و ^{۲۴۴}Pu است که بررسی آنها با جداسازی‌شیمیایی محصولات شکافت و یا بامشاهدهٔ میکروسکوپی ردهای به‌جامانده در کانیها دراثر شکافت ـ پاره‌ها انجام می‌گیرد.

برای‌عمرسنجی‌نمونه‌های نه‌چندان قدیمی موادآلی، ازروش‌عمرسنجی ^{۱۴}C استفاده می‌شود. $CO_۲$ جذب‌شده درموادآلی تقریباً به‌طورکامل‌از ^{۱۲}C پایدار (۹۸٫۸۹٪) ومقدار اندك ^{۱۳}C پایدار (۱٫۱۱٪) تشکیل شده است. ^{۱۴}C رادیواکتیو دراثر بمباران نیتروژن جو با پرتوهای‌کیهانی به‌طور پیوسته درجو فوقانی تشکیل می‌شود، وبنابراین تمام مواد زنده به‌علت وجودمقداری ^{۱۴}C دربدنشان اندکی رادیواکتیوند. چون‌آهنگ تولید ^{۱۴}C

با پرتوهای کیهانی طی هزاران سال نسبتاً ثابت بوده است، مقدار کربن موجود در مواد آلی زنده باکربن جو به تعادل می‌رسد که مقدار آن یك اتم ^{14}C به‌ازای هر 10^{12} اتم ^{12}C است. نیمه‌عمر ^{14}C برابر ۵۷۳۰ سال است، وبنابراین هر گرم کربن اکتیویته‌ای در حدود ۱۵ واپاشی در دقیقه خواهدداشت. هنگامی که موجود زنده می‌میرد، چون جذب ^{14}C جدیدمتوقف‌می‌شود ومحتوای‌قبلی طبق‌قانون واپاشی رادیواکتیو کاهش می‌یابد، تعادل‌آن باکربن‌جو برهم می‌خورد. بنابراین می توانیم عمرنمونه‌ها را بااندازه‌گیری اکتیویتهٔ‌ویژه (اکتیویتهٔ هر گرم) محتوای کربن آنها تعیین کنیم. این روش تا زمانی که شدت ^{14}C برای تعیین اکتیویته کافی باشد به‌کار می‌رود. اگر ۱۰ نیمه‌عمر یا بیشتر از مرگ موجود زنده گذشته باشد، واپاشی به‌قدری ضعیف می‌شود که روش ^{14}C قابل استفاده نیست. روشهای جدید استفاده از شتابدهنده‌ها به‌عنوان طیف‌سنج جرمی، با توانایی‌شمارش مستقیم‌اتمهای ^{14}C، این‌محدودیت را پشت سر می گذارند؛ این روشها در فصل ۲۰ مورد بررسی قرار می‌گیرند.

فرض اصلی دراین روش این است که طی‌حدود ۵۰۰۰۰ سال اخیر تولید ^{14}C توسط پرتوهای‌کیهانی با آهنگ نسبتاً ثابتی ادامه داشته است. می‌توان این فرض را با مقایسهٔ عمرهای تعیین شده به روش رادیوکربن با عمرهای شناخته شده به طرق مستقل (برای‌مثال، به‌طریق سوابق تاریخی یا شمارش حلقهٔ درخت) آزمود. این مقایسه‌ها توافق بسیارخوبی را نشان می‌دهند، وفرض نسبتاً یکنواخت بودن شار پرتوهای‌کیهانی را تأیید می‌کنند.

در هزاران‌سال بعد، ممکن‌است روش رادیوکربن دیگرقابل‌استفاده‌نباشد. طی ۱۰۰ سال اخیر، سوزاندن سوختهای فسیلی تعادل جو را با رقیق‌کردن‌آن باکربن پایدار برهم زده است (هیدروکربنهای موجود درسوختهای فسیلی به‌اندازه‌ای قدیمی‌اند که تقریباً تمام ^{14}C موجود درآنها واپاشیده وناپدید شده است). طی‌دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰، آزمایش سلاحهای هسته‌ای در جو مقداری ^{14}C اضافی وارد جوکرده است که به‌این‌ترتیب تراکم کربن ۱۴ شاید به‌دوبرابر مقدار تعادل ناشی از پرتوهای‌کیهانی رسیده است.

۸.۶ یکاهای اندازه‌گیری تابش

اکتیویتهٔ یك نمونهٔ رادیواکتیو (برحسب‌کوری یا واپاشی درثانیه) به‌نوع‌تابش یاانرژی آن بستگی‌ندارد. بنابراین اکتیویته وسیلهٔ مفیدی برای مقایسهٔ دو چشمهٔ مختلف ازیك‌نوع ایزوتوپ واپاشنده‌است (۱۰mCi از ^{60}Co از ۱mCi ازآن‌قویتر است)، ولی چگونه می‌توان واپاشیهای مختلف را با هم مقایسه‌کرد؟ به‌عنوان مثال، چگونه قدرت یك چشمهٔ ^{60}Co به‌اکتیویتهٔ ۱۰mCi با قدرت چشمهٔ ^{14}C با همان اکتیویته قابل مقایسه است، یا چگونه می‌توان یك‌چشمهٔ ۱۰μCi گاماگسیل را با یك چشمهٔ ۱۰mCi آلفاگسیل مقایسه کرد؟ ومنظور از «قدرت» چشمهٔ تابش دقیقاً چیست؟

یکی از ویژگیهای عام تابشهای هسته‌ای قابلیت یونش (جداسازی الکترونها از اتمهایی‌است که با آنها برهم کنش‌می‌کنند. (به‌این‌دلیل تابشهای هسته‌ای‌را معمولا تابشهای یونده می‌گویند.) بحث را از بررسی عبور پرتو x و پرتو γ از هوا آغاز می‌کنیم. فوتونها از طریق فرایندهای مختلف (پراکندگی‌کامپتون، اثر فوتوالکتریك و تولید زوج الکترون - پوزیترون) به‌دفعات با اتمهای هوا برهم‌کنش می‌کنند. هر یك از این فرایندها الکترون آزاد تولید می‌کند، که معمولا انرژی نسبتاً زیادی دارد، این الکترونهای ثانویه به‌سهم خود می‌توانند تولید یونش (والکترونهای اضافی) کنند. بار الکتریکی کل Q یونهای تولیدی در جرم m هوا را پرتوگیری x می‌نامند، و در صورتی که چشمه‌های γ پرتوگیری یکسانی ایجادکنند، حتی اگر انرژی پرتوهای γ واکتیویتهٔ چشمه‌ها کاملا متفاوت باشند، می‌توانیم شدت آنها را باهم برابر بگیریم. تعریف مشخص پرتوگیری به‌صورت زیر است

$$X=\frac{Q}{m} \qquad (۴۵.۶)$$

یکای آن در دستگاه SI کولن بر کیلوگرم است. اغلب به‌یکای رونتگن (R) برمی‌خوریم، که به‌صورت پرتوگیری منجر به‌ایجاد یك‌واحد الکتروستاتیکی بار (در دستگاه cgs که در آن e برابر $۴٫۸۰ \times ۱۰^{-۱۰}$ واحد الکتروستاتیك است) در ۱ سانتی‌متر مکعب‌هوا در دمای $۰°C$ و فشار $۷۶۰mm$ (یعنی در جرمی معادل $۰٫۰۰۱۲۹۳$ گرم هوا) تعریف می‌شود. بنابراین

$$۱R=\frac{۱\ esu}{۰٫۰۰۱۲۹۳g}=۲٫۵۸\times ۱۰^{-۴}\ C/kg$$

اگر به‌هریون باری معادل بار یك الکترون تخصیص‌دهیم، پرتوگیری ۱R به‌معنای‌تشکیل $۲٫۵۸\times ۱۰^{-۴}C/kg)/۱٫۶۰\times ۱۰^{-۱۹}C=۱٫۶۱\times ۱۰^{۱۵}$ یون در کیلوگرم یا $۲٫۰۸\times ۱۰^{۹}$ یون درهرسانتی‌متر مکعب است. برای تشکیل‌یك‌جفت یون درهوا به‌طور متوسط ۳۴eV لازم است. بنابراین پرتوگیری ۱ R منجر به‌جذب انرژی $۷٫۰۸\times ۱۰^{۱۰}eV/cm^{۳}$ یا $۰٫۱۱۳\ erg/cm^{۳}$ یا ۸۸erg/g درهوا می‌شود.

یونش تولیدی پرتو γ به‌انرژی آن بستگی دارد. باانرژی ۳۴eV لازم برای‌تولید هریون درهوا، انتظار می‌رود که یك پرتو γ با انرژی ۱MeV به‌طور متوسط درحدود ۳۰۰۰۰ یون تولیدکند. یك چشمهٔ رادیواکتیو با اکتیویتهٔ معین معمولا پرتوهای γ با انرژی و شدتهای‌مختلف تولید می‌کند. پرتوگیری ناشی از این چشمه به‌تعداد واپاشی، شدت وانرژی هریك از پرتوهای γ بستگی دارد و آهنگ‌پرتوگیری (پرتوگیری در واحد زمان) به‌اکتیویتهٔ چشمه بستگی پیدا می‌کند. همچنین مقدار این‌کمیت تابع فاصله ازچشمه‌است؛ اگر بخواهیم یونش تولیدی در $۱cm^{۳}$ هوا را اندازه بگیریم، بدیهی‌است

که این یونش به نزدیک یا دور بودن حجم هوا از چشمه بستگی دارد. بنابراین می‌توان نوشت

$$\frac{\Delta X}{\Delta t}=\Gamma\frac{\mathcal{A}}{d^{۲}} \qquad (۴۶.۶)$$

که در آن $\Delta X/\Delta t$ آهنگ پرتو گیری، $\mathcal{A}$ اکتیویته، d فاصله از چشمه و Γ ثابت ویژهٔ پرتو γ است که به‌جزئیات گسیل پرتو γ از هر نوکلید رادیواکتیو (کسر پرتوهای γ با انرژی معین و قابلیت یونندگی فوتونها با انرژی معین) بستگی دارد. معمولاً $d=۱\mathrm{m}$ را به عنوان فاصلهٔ استاندارد برای اندازه‌گیری رابطهٔ بین آهنگ پرتوگیری و اکتیویته درنظر می‌گیرند، که در نتیجه Γ دارای یکای $(\mathrm{R/h})/(\mathrm{Ci/m^{۲}})$ خواهد بود. بعضی مقادیر مشخص Γ در جدول ۳.۶ داده شده است.

جدول ۳.۶ ثابتهای ویژهٔ پرتوگاما برای رادیوایزوتوپهای مختلف.*

نوکلید	$t_{۱/۲}$	انرژی پرتو γ (MeV) و فراوانی آن (%)	Γ
$^{۲۲}\mathrm{Na}$	۲٫۶y	۰٫۵۱۱(۱۸۱)، ۱٫۲۷۵(۱۰۰)	۱٫۲۰
$^{۲۴}\mathrm{Na}$	۱۵٫۰۲h	۱٫۳۶۹(۱۰۰)، ۲٫۷۵۴(۱۰۰)	۱٫۸۴
$^{۵۹}\mathrm{Fe}$	۴۴٫۶d	۰٫۱۴۳(۱)، ۰٫۱۹۲(۳)، ۱٫۰۹۹(۵۶)، ۱٫۲۹۲(۴۴)	۰٫۶۰
$^{۵۷}\mathrm{Co}$	۲۷۰d	۰٫۰۱۴(۹)، ۰٫۱۲۲(۸۵)، ۰٫۱۳۶(۱۱)	۰٫۰۵۹
$^{۶۰}\mathrm{Co}$	۵٫۲۷y	۱٫۱۷۳(۱۰۰)، ۱٫۳۳۳(۱۰۰)	۱٫۲۸
$^{۱۳۱}\mathrm{I}$	۸٫۰۶d	۰٫۰۸(۲)، ۰٫۲۸۴(۶)، ۰٫۳۶۴(۸۲)، ۰٫۶۳۷(۷)، ۰٫۷۲۳(۲)	۰٫۲۲
$^{۱۳۷}\mathrm{Cs}$	۳۰٫۱y	۰٫۰۳۲(۸)، ۰٫۶۶۲(۸۵)	۰٫۳۲
$^{۱۹۸}\mathrm{Au}$	۲٫۷d	۰٫۴۱۲(۹۵)، ۰٫۶۷۶(۱)	۰٫۲۳
$^{۲۲۶}\mathrm{Ra}$ و دختران			۰٫۸۴

* یکای Γ در اینجا $\mathrm{R.m^{۲}/h.Ci}$ است. به‌رابطهٔ بین Γ و انرژی وشدت پرتوهای γ توجه کنید.

آهنگ جذب انرژی درموادی غیر از هوا که درمعرض پرتوهای یونده قرار گیرند، متفاوت خواهد بود. بنابراین، وجود یك استاندارد برای جذب انرژی پرتوهای یونده درمواد مختلف ضروری است. این کمیت دز جذب شدهٔ D درماده است که میزان انرژی جذب‌شده از تابش یونده را در واحد جرم ماده تعیین می‌کند. متداولترین یکای دزجذب شده راد (*rad*)[1] نامیده می‌شود که برابر جذب ۱۰۰ ارگ انرژی درهر گرم ماده است. (بنابراین در هوا داریم $1R = 0.88rad$) یکای دز جذب شده در دستگاه SI گری (Gy) نامیده می‌شود که برابر جذب ۱ ژول انرژی در هر کیلوگرم ماده است، درنتیجه $1\ Gy = 100rad$.

برای تعریف استانداردهای حفاظت انسان دربرابر تابش، تعیین براوردی ازاثرات زیست‌شناختی تابشهای مختلف ضروری است. یعنی، بعضی تابشها ممکن‌است انرژی‌شان را درمسیری طولانی ازدست دهند، درنتیجه درفواصل کوتاه (مثلا درحدود ابعاد سلولهای انسانی) انرژی نسبتاً کمی از خودباقی می‌گذارند. پرتوهای گاما وبتا ازاین نوع هستند. سایر انواع تابشها، مثلا ذرات آلفا، انرژی خود را به‌سرعت از دست می‌دهند و اساساً تمام انرژی خود را درمسیر بسیارکوتاهی برجای می‌گذارند. بنابراین، احتمال آسیب به‌سلول دراثر یك راد تابش α بسیار بیشتر ازیك راد تابش γ است. برای کمیت بخشیدن به‌این تفاوتها، تأثیر نسبی زیست‌شناختی (RBE) را به‌صورت نسبت دز یك‌تابش خاص به‌دز پرتوهای x که همان اثر زیست‌شناختی را به‌وجود می‌آورد، تعریف می‌کنیم. مقادیر RBE از ۱ تا ۲۰ برای‌تابش α تغییر می‌کند. ازآنجاکه‌اندازه‌گیری RBE نسبتاً مشکل است، معمولا به‌جای‌آن از عامل‌کیفیت (QF) استفاده می‌شود که برای نوع (یا انرژی) خاص تابش به‌صورت انرژی برجای مانده در واحد طول‌مسیر تعریف می‌شود. تابشهایی که انرژی‌کمی در واحد طول از دست می‌دهند (β و γ) دارای QF نزدیك به ۱ هستند، در حالی‌که برای تابشهایی‌که انرژی بیشتری در واحد طول از دست می‌دهند (ذرات α) مقدارQF تاحدود ۲۰ قابل‌افزایش‌است. جدول ۴.۶ نمونهٔ بعضی‌مقادیرQF را نشان‌می‌دهد.

جدول ۴.۶ عامل کیفیت برای تابش جذب شده.

نوع تابش	QF
پرتوهای x، β، و γ	۱
p و n کم‌انرژی (~keV)	۲–۵
p و n پرانرژی (~MeV)	۵–۱۰
α	۲۰

1. radiation absorbed dose

تـأثیر یك تابش خاص بریك اندام زیست‌شناختی به‌دز جذب‌شدهٔ D وعامل کیفیت آن QF بستگی دارد. حاصلضرب این دو کمیت را دز معادل می‌گویند

$$DE = D \cdot QF \qquad (۴۷.۶)$$

اگر از راد به عنوان یکای دز استفاده شود، دزمعادل‌برحسب یکای رم (*rem*)[1] به دست می‌آید. اگر از یکای گری در دستگاه SI استفاده شود، دز معادل برحسب سیورت (Sv) خواهد بود. دیدیم که ۱ Gy = ۱۰۰rad است، و بنابراین داریم ۰.۱ Sv = ۱۰۰rem

ملاحظه می‌شود که «شدت» تابش برحسب اینکه آهنگ واپاشی (اکتیویته) موردنظر باشد یا تأثیر آن برروی اندامهای زنده (دز معادل)، به‌طرق مختلف قـابل تعریف است. خلاصه‌ای از کمیتهای مختلف ویکاهای سنتی و بین‌المللی (SI) این کمیتها در جدول ۵.۶ داده شده است.

استانداردهای پرتوگیری تابشی افراد اجتماع وکارکنان حرفه‌ای تابش را برحسب رم در دوره‌هـای خاصی از زمـان (به‌طور فصلی یا سالیانه) تعـریف می‌کنند. انسان از چشمه‌های زمینهٔ طبیعی (پرتوهای کیهانی و ایزوتوپهای رادیواکتیو طبیعی مانند سریهای اورانیم وتوریم و ^{۴۰}K) سالیانه در حدود ۱ر۰ تـا ۲ر۰ رم دریـافت می‌کند. کمیسیون بین‌المللی حفاظت دربرابر تابش (ICRP) حد سالیانهٔ دز جذب شده درتمام بـدن را به ۵ر۰rem برای افراد عادی اجتماع و ۵ rem برای‌کارکنان حرفه‌ای تابش محدودکرده است. اما حد سالیانهٔ دز جذب شده در نواحی فوق‌العاده‌حساس‌بدن، مانند مغز استخوان، در عکسبرداری پرتو x قفسهٔ سینه در حدود ۰۵ر۰ rem و در عکسبرداری از دنـدان درحدود ۰۰۲ر۰ rem تعیین‌شده‌است.متأسفانه،محاسبه واندازه‌گیری‌اثرات زیست‌شناختی پرتوگیری مشکل است، و بنابراین رهنمود باید درجهتی باشدکه پرتوگیری را تاحدامکان

جدول ۵.۶ کمیتها ویکاهای‌اندازه‌گیری تابش.

کمیت	ماهیت فیزیکی	یکای سنتی	یکای SI
اکتیویته (A)	آهنگ واپاشی	کوری (Ci)	بکرل (Bq)
پرتوگیری (X)	یونش در هوا	رونتگن (R)	کولن برکیلوگرم (C/kg)
دزجذب‌شده(D)	جذب انرژی	راد (rad)	گری (Gy)
دز معادل (DE)	تأثیر زیست‌شناختی	رم (rem)	سیورت (Sv)

1. *r*ontgen *e*quivalent *m*an

پایین نگه‌دارد. به‌همین‌دلیل، بسیاری‌از پزشکان دیگرعکسبرداری ازقفسهٔ‌سینه‌را بااستفاده‌از پرتو x درمعاینه‌های سالیانهٔ‌پزشکی‌توصیه‌نمی‌کنند و دندانپزشکان‌معمولا هنگام‌عکسبرداری از دهان یك پیش‌بند سربی روی قسمتهای حساس‌بدن بیمار قرار می‌دهند.) اگرچه‌شواهد موجود قاطعیت ندارد، ولی دلایلی برخطر سرطان‌زایی تابش وآسیب ژنتیکی آن‌حتی در دزهای‌خیلی‌پایین دردست‌است، درحالی که آثار دیگر مانندتولیدآب‌مروارید وعقیم‌سازی آستانه‌ای دارند که درکمتر ازآن خطری وجود ندارد. بسیاری ازمعلومات ما دراین زمینه درنتیجهٔ مطالعات انجام‌شده در مورد بازماندگان انفجار هسته‌ای هیروشیما و ناکازاکی‌در جنگ دوم جهانی است، که طبق‌آن می‌دانیم خطر مرگ پس از جذب ۱۰۰ رم درفاصلهٔ زمانی کوتاه‌قطعی‌است، ولی شواهد واضحی دال‌بر رابطهٔ خطی‌بین دز وخطر وجودندارد. مباحثات مربوط به‌جذب دزهای کم درفواصل‌زمانی طولانی هنوز هم درجریان است، که برای استانداردهای حفاظت در برابر تابش و سلامت افراد اجتماع نتایجی جدی دربر خواهد داشت.

مراجع مطالعات تکمیلی

برای مطالعهٔ تفصیلی‌تر مکانیك‌کوانتومی فرایندهای واپاشی می‌توانید به‌کتاب زیر رجوع کنید

M. G. Bowler, *Nuclear Physics* (Oxford: Pergamon, 1973).

برای بررسی‌کاملترسریهای واپاشی رادیواکتیو می‌توانید به‌کتاب زیر رجوع‌کنید

R. D. Evans, *The Atomic Nucleus* (New York: McGraw-Hill, 1955).

روشهای عمرسنجی رادیواکتیو منظومهٔ شمسی در مراجع زیر مرور شده است

L. T. Aldrich and G. W. Wetherill, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* 8, 257(1958),
G. W. Wetherill, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* 25, 283 (1975).

برای‌کسب اطلاعات بیشتر دربارهٔ رادیواکتیویتهٔ جوواقیانوسها به‌مقالهٔ زیررجوع کنید

D. Lal and H. E. Suess, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* 18, 407 (1968).

اطلاعات مشروحتر دربارهٔ پرتوگیری تابشی را می‌توان در مراجع‌مختلف فیزیك بهداشت، ازجمله‌کتاب زیر، یافت

E. Pochin, *Nuclear Radiation: Risks and Benefits* (Oxford: Clarendon, 1983).

مسائل

۱. سه‌چشمهٔ رادیواکتیو که‌اکتیویتهٔ هر یك‌ازآنهادر زمان $t=0$ برابر $0.1\ \mu Ci$ است،

مفروض‌اند. نیمه‌عمر آنها به‌ترتیب برابر ۱٫۰s، ۱٫۰h، و ۱٫۰d است. (الف) چند هستهٔ رادیواکتیو در $t = 0$ در هر چشمه وجود دارد؟ (ب) چند هسته بین $t = 0$ و $t = 1\,s$ درهرچشمه واپاشیده می‌شود؟ (ج) تعداد واپاشی هر چشمه در فاصلهٔ $t = 0$ و $t = 1\,h$ چقدر است؟

۲. ساماریم طبیعی شامل ۱۵٫۱٪ ایزوتوپ رادیواکتیو ^{147}Sm است که با گسیل α واپاشیده می‌شود. یك گرم ساماریم طبیعی درهر ثانیه تعداد (۵ ± ۸۹) ذرهٔ آلفا گسیل می‌کند. با استفاده‌از این‌اطلاعات، نیمه‌عمر ^{147}Sm وخطای‌اندازه‌گیری آن‌را محاسبه کنید.

۳. از جمله محصولات رادیواکتیو گسیل شده درحادثهٔ رآکتور چرنوبیل درسال ۱۹۸۶، ایزوتوپهای $^{131}I(t_{1/2} = 8.0\,d)$ و $^{137}Cs(t_{1/2} = 30\,y)$ بودند. تعداد اتمهای ^{137}Cs تولید شده درفرایند شکافت درحدود پنج برابر ^{131}I است. (الف) کدام ایزوتوپ سهم بیشتری در اکتیویتهٔ ابر تابش رادیواکتیو دارد؟ فرض کنید که رآکتور قبل از آزاد شدن تابش چندین‌روز به‌طور پیوسته کار کرده است، (ب) چه‌مدت پس‌از وقوع حادثه اکتیویته‌های این دو ایزوتوپ باهم برابر می‌شوند؟ (ج) درحدود ۱٪ از شکافتها منجر به‌تولید ^{131}I می‌شوند و در هر شکافت درحدود ۲۰۰MeV انرژی آزاد می‌شود. با درنظر گرفتن‌اندازهٔ رآکتورچرنوبیل(۱۰۰۰MW)،اکتیویتهٔ ^{131}I را برحسب کوری پس از ۲۴ ساعت‌کار محاسبه کنید.

۴. زنجیرهٔ واپاشیهای‌رادیواکتیو $3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ را درنظر بگیرید که درآن‌هستهٔ نوع ۳ پایدار است. (الف) نشان دهید که معادلهٔ (۳۱.۶) از حل معادلهٔ (۲۹.۶) به دست می‌آید. (ب) معادلهٔ دیفرانسیلی برای تعدادهسته‌های نوع۳ بنویسید، وآن‌را برحسب $N_3(t)$ حل کنید. (ج)مقدار $N_1(t)+N_2(t)+N_3(t)$ رابه‌دست‌آورید وتعبیرفیزیکی آن‌رابیان کنید. (د) N_1، N_2، و N_3 را به‌ازای‌مقادیرکوچك t، یعنی‌فقط بادرنظر گرفتن جملات‌خطی آنها، مورد بررسی قرار دهید وتعبیر فیزیکی نتایج را بیان کنید. (ه) حد مقادیر N_1، N_2، و N_3 را در حالت $t \rightarrow \infty$ بیابید و تعبیر فیزیکی آنها را بیان کنید.

۵. بدن انسان به‌طور متوسط حاوی ۱۸٪ کربن و۰٫۲٪ پتاسیم است. اکتیویتهٔ ذاتی‌ناشی از ^{14}C و ^{40}K را برای یك فرد متوسط محاسبه کنید.

۶. ایزوتوپ رادیواکتیوی را بااستفاده از یك واکنش هسته‌ای دریك سیکلوترون تولید می‌کنیم. درپایان پرتودهی که در مقایسه با نیمه‌عمر واپاشی خیلی کوتاه است، از یك روش شیمیایی برای استخراج ایزوتوپ رادیواکتیو استفاده می‌کنیم. زمان انجام این کار برابر ۱ h وکارآیی بازیافت مادهٔ رادیواکتیو ۱۰۰٪ است. پس از جداسازی شیمیایی، اکتیویتهٔ نمونه را در فواصل‌زمانی ۱ min مورد شمارش قرار دادیم که نتایج زیر به‌دست آمده‌اند (زمان پایان پرتودهی را $t = 0$ درنظر گرفته‌ایم):

زمان t (دقیقه)	واپاشی درهردقیقه	زمان t (دقیقه)	واپاشی درهر دقیقه
۶۲٫۰	۵۹۲	۱۲۵٫۰	۲۱۵
۶۸٫۰	۵۲۷	۱۳۰٫۰	۲۰۸
۷۳٫۰	۵۱۰	۱۳۸٫۰	۱۸۷
۸۵٫۰	۴۳۱	۱۴۴٫۰	۱۷۷
۹۰٫۰	۳۸۰	۱۴۹٫۰	۱۵۸
۹۷٫۰	۳۵۳	۱۵۶٫۰	۱۴۲
۱۰۱٫۰	۳۱۸	۱۶۳٫۰	۱۲۵
۱۰۵٫۰	۳۱۰	۱۷۰٫۰	۱۱۰
۱۱۲٫۰	۲۹۰	۱۷۵٫۰	۱۰۹
۱۲۰٫۰	۲۴۲	۱۸۰٫۰	۱۰۰

(الف) این اطلاعات را روی کاغذ نیمه‌لگاریتمی رسم کنید و با استفاده از آن نیمه‌عمر و اکتیویتهٔ اولیه را (در لحظهٔ $t = 0$) به‌دست آورید. گسترهٔ خطای هر یك از نقاط اطلاعاتی را نشان دهید، وخطای حاصل را در نیمه عمر براورد کنید. (ب) با استفاده‌از یك روش تحلیلی، برازش خطی حداقل مربعات را درمورد این اطلاعات انجام‌دهید (به‌صورت $\log N$ برحسب t) ونیمه عمر وخطای آن‌را تعیین کنید.

۷. نمونه‌ای از یك‌عنصر متشکل‌از دو ایزوتوپ طبیعی را بااستفاده ازگیراندازی‌نوترون رادیواکتیو می‌کنیم. پس‌از یك‌ساعت پرتودهی در رآکتور، نمونه‌را به‌اتاق شمارش منتقل و تعدادکل واپاشیها را در فواصل یك‌ساعته به‌طور روزانه ثبت می‌کنیم. خلاصهٔ اطلاعات ثبت‌شده به‌قرار زیر است:

زمان (d)	تعداد واپاشی	زمان (d)	تعداد واپاشی
۰	۱۰۲۵۱۵	۲۰	۲۳۷۲
۱	۷۹۲۰۵	۴۰	۱۴۲۱
۲	۶۱۹۰۳	۶۰	۱۱۳۵
۳	۴۸۲۱۳	۸۰	۸۶۲
۴	۳۷۴۳۱	۱۰۰	۷۲۵
۵	۲۹۳۶۷	۱۲۰	۵۵۱
۶	۲۳۵۱۱	۱۴۰	۴۶۲
۷	۱۸۴۹۵	۱۶۰	۳۵۹
۸	۱۴۸۲۹	۱۸۰	۲۶۵
۹	۱۱۸۵۳	۲۰۰	۲۲۵
۱۰	۹۵۹۵		

با استفاده از این اطلاعات، نیمه‌عمر و اکتیویتهٔ اولیهٔ هردو ایزوتوپ را به‌دست آورید. عنصر مورد آزمایش چیست؟

۸. یك فرایند واپاشی ساده را درنظر بگیرید که در آن تعداد N_0 هستهٔ رادیواکتیو اولیهٔ نوع A به‌هستهٔ پایدار نوع B تبدیل می‌شود. چند واپاشی در فاصلهٔ زمانی t_1 تا $t_1+\Delta t$ رخ می‌دهد؟ این مسئله را به‌دو طریق حل کنید: (۱) با استفاده از معادلهٔ (۶.۱۰)، و (۲) با استفاده از تفاوت بین $N(t_1)$ و $N(t_1+\Delta t)$. گوشزد: درحالت کلی فقط روش اول صحیح است؛ مسئلهٔ بعد را ببینید.

۹. فرایند واپاشی $A \rightarrow B \rightarrow C$ را درنظر بگیرید که در آن $N_A(t=0)=N_0$، و $N_B(t=0)=N_C(t=0)=0$. تعداد واپاشیهای هستهٔ نوع B در فاصلهٔ بین t_1 و $t_1+\Delta t$ چقدر است؟ (راهنمایی: با مراجعه به مسئلهٔ قبل بگویید چرا روش (۲) در این مورد عملی نیست. شکلهای ۶.۶ و ۷.۶ هم ممکن است شواهد قانع کننده‌ای در اختیار بگذارند.)

۱۰. هسته‌های نوع A که با آهنگ ثابت R در یك رآکتور هسته‌ای تولید می‌شوند، در اثر واپاشی به‌هستهٔ نوع B تبدیل می‌شوند که آن‌هم به‌نوبهٔ خود به‌هستهٔ نوع C واپاشیده می‌شود. (الف) معادلات دیفرانسیل N_A، N_B، و N_C را برحسب زمان بنویسید و آنها را حل کنید. (ب) حاصل جمع $N_A+N_B+N_C$ را به‌دست آورید و تعبیر فیزیکی آن را بیان کنید.

۱۱. ایزوتوپ رادیواکتیو ^{233}Pa ($t_{1/2}=27.0\ d$) در اثر گیراندازی نوترون در ^{232}Th تولید می‌شود. ایزوتوپ تولیدشدهٔ ^{233}Th با نیمه‌عمر $22.3\ min$ واپاشیده می‌شود و به‌صورت ^{233}Pa درمی‌آید. گیراندازی نوترون در ۱ گرم ^{232}Th، در شار نوترونی یك رآکتور، با آهنگ $2.0 \times 10^{11}\ s^{-1}$ تولید ^{233}Th می‌کند. (الف) در پایان یك ساعت پرتودهی نوترونی، اکتیویتهٔ ^{233}Th و ^{233}Pa چقدر است؟ (ب) پس از یك ساعت پرتودهی، نمونه انبار می‌شود تا اکتیویتهٔ ^{233}Th بتواند ناپدید شود. اکتیویته‌های ^{233}Th و ^{233}Pa پس از گذشت ۲۴ ساعت و ۴۸ ساعت از انبارسازی چقدر است؟ (ج) واپاشی ^{233}Pa منجر به‌تولید ^{233}U می‌شود که آن‌هم به‌نوبهٔ خود رادیواکتیو است ($t_{1/2}=1.6 \times 10^5\ y$). اکتیویتهٔ ^{233}U یك سال پس از انبار کردن نمونه چقدر است؟ (راهنمایی: برای به‌دست آوردن اکتیویتهٔ ^{233}U ضرورتی ندارد که معادلهٔ دیفرانسیل دیگری نوشته شود.)

۱۲. اکتیویته‌ای از هسته‌های A به B و سپس هستهٔ B به‌هستهٔ پایدار C واپاشیده می‌شود. (الف) با بحث کیفی نشان دهید که چرا در زمانهای کوتاه باید $\mathcal{A}_A > \mathcal{A}_B$ باشد، در حالی که در زمانهای طولانی $\mathcal{A}_B > \mathcal{A}_A$ خواهد شد. (ب) بنابراین زمانی مانند T باید وجود داشته باشد که در آن $\mathcal{A}_A = \mathcal{A}_B$ است. زمان T را برحسب ثابتهای واپاشی λ_A و λ_B محاسبه کنید.

۱۳. زنجیرهٔ واپاشی $^{139}La \rightarrow {}^{139}Ba \rightarrow {}^{139}Cs$ در یك نمونهٔ بدواً خالص ^{139}Cs با اکتیویتهٔ اولیهٔ ۱ mCi مشاهده شده است. نیمه‌عمر ^{139}Cs برابر $9.5\ min$،

نیمه‌عمر ^{139}Ba برابر ۸۲٫۹min، و ^{139}La پایدار است. اکتیویتهٔ بیشینهٔ ^{139}Ba چقدر است ودرچه زمانی حاصل می‌شود؟

۱۴. در فرایند واپاشی $^{235}U \rightarrow {}^{231}Th \rightarrow {}^{231}Pa$ ($t_{1/2} = ۷٫۰۴ \times ۱۰^{۸}y$ برای ^{235}U؛ $t_{1/2} = ۲۵٫۵h$ برای ^{231}Th) اکتیویته‌های ^{235}U و ^{231}Th را برحسب‌زمان از $t = ۰$ تا $t = ۱۰۰h$ رسم کنید. فرض کنید اکتیویتهٔ‌اولیهٔ ^{235}U درنمونه ۱٫۰mCi است. دربارهٔ شرط تعادل دیرپا دراین فرایند واپاشی بحث کنید.

۱۵. واپاشی آلفازای ^{238}U ($t_{1/2} = ۴٫۴۷ \times ۱۰^{۹}y$) منجر به‌تولید ^{234}Th با نیمه‌عمر ۲۴٫۱d می‌شود. هرنمونه‌ای از سنگ‌معدن اورانیم باید اکتیویتهٔ ^{234}Th را در تعادل دیرپا با مادر هستهٔ ^{238}U نشان‌دهد، اکتیویتهٔ ^{234}Th درهر گرم اورانیم چقدر است؟

۱۶. نموداری مشابه شکل ۱۰.۶ تهیه کنید که سری رادیواکتیو $۴n+۲$ را نشان‌دهد.

۱۷. واپاشی رادیواکتیو ^{232}Th درنهایت به‌تولید ^{208}Pb پایدار منجر می‌شود. در یك نمونهٔ سنگ‌معدن، مقدار ۳٫۶۵ گرم ^{232}Th و ۰٫۷۵ گرم ^{208}Pb دیده شده است. (الف) عمر این‌نمونه را با استفاده از نسبت Th/Pb محاسبه کنید. (ب) اگر نمونهٔ سنگی بزرگ باشد، ذرات آلفای گسیل شده در فرایندهای واپاشی به‌دام می‌افتند. اگر چنین‌سنگی را خرد کنیم، ذرات آلفای آن‌را می‌توان به‌صورت گازهلیم گردآوری کرد. در فشار ۷۶۰mm و دمای ۰°C حجم گاز گردآوری شده از این صخره چقدر است؟

۱۸. می‌خواهیم عمر یك تیرچوبی را که در ساختمان یك‌کلبهٔ باستانی مورد استفاده قرار گرفته است، تعیین‌کنیم. با بررسی نمونه‌ای از این‌چوب برای تعیین محتوای ^{14}C، تعداد ۲٫۱ واپاشی در دقیقه مشاهده شده است. نمونهٔ دیگری با همان‌اندازه وهمان نوع چوب که از یك‌درخت تازه بریده‌گرفته‌ایم، تعداد ۵٫۳ واپاشی دردقیقه‌به‌دست داده است. عمر نمونهٔ باستانی چقدر است؟

۱۹. نشان‌دهید که محتوای کنونی ^{14}C دریك مادهٔ آلی، اکتیویته‌ای درحدود ۱۵ واپاشی در دقیقه درهر گرم کربن دارد.

۲۰. احتمال وقوع یك واپاشی ^{14}C در ریه‌ها طی یك تنفس چقدر است؟ مقدار CO_2 جو درحدود ۰٫۰۳% است، ودریك تنفس متوسط درحدود ۰٫۵ لیترهوا را به‌ریه‌ها وارد و ۳٫۵s بعد آن‌را خارج می‌کنیم.

۲۱. (الف) شار پرتوگاما (تعداد γ در هر واحد سطح) در فاصلهٔ ۱٫۰m از یك چشمهٔ ^{60}Co بااکتیویتهٔ ۷٫۵mCi چقدراست؟ (ب) در این فاصله، چند یون در دقیقه در هر سانتی‌مترمکعب هوا تولید می‌شود؟

۷

آشکارسازی تابشهای هسته‌ای

اصول اساسی کار اغلب آشکارسازهای تابش هسته‌ای مشابه است. تابش وارد آشکارساز می‌شود، با اتمهای مادهٔ آشکارساز برهم‌کنش می‌کند (بخشی از انرژی خود را ازدست می‌دهد)، و تعداد زیادی الکترون کم‌انرژی را از مدارهای اتمی خود آزاد می‌کند. این الکترونها سپس گردآوری می‌شوند و جهت تحلیل توسط مدار الکترونیکی به‌صورت یك تپ ولتاژ یاجریان درمی‌آیند. انتخاب مادهٔ مناسب برای آشکارسازهای تابش به‌نوع تابش مورد آشکارسازی و اطلاعات موردنظر بستگی دارد. برای ذرات α حاصل از واپاشیهای رادیواکتیو ویا ذرات باردار حاصل از واکنشهای هسته‌ای در انرژیهای کم (MeV)، آشکارسازهای بسیار نازك کفایت می‌کند، زیرا بیشینهٔ برد این ذرات دراغلب جامدات نوعاً کمتراز μm ۱۰۰ است. برای الکترونها، مشابه آنچه درتابش β گسیل می‌شوند، آشکارسازی به‌ضخامت ۱ر۰ تا mm ۱ لازم است، در حالی که به‌علت برد زیاد پرتوهای γ، حتی آشکارسازی به‌ضخامت cm ۵ ممکن است برای تبدیل فوتونهای پرانرژی (MeV یا بیشتر) به تپ الکترونیکی کافی نباشد. صدای تیك آشنای شمارگر گایگر ممکن است برای نشان‌دادن حضور تابش کافی باشد؛ در این‌مورد تمامی انواع تابشهای فرودی، خروجی یکسانی تولید می‌کنند. برای اندازه‌گیری انرژی تابش، باید آشکارسازی را انتخاب کنیم که دامنهٔ تپ خروجی آن متناسب با انرژی باشد. دراینجا باید ماده‌ای را برگزینیم که تعداد الکترونهای آزاد شده درآن زیاد باشد، بدین‌ترتیب با افت‌وخیز آماری یا با از دست‌دادن شمارش چند ذره، توانایی تعیین انرژی به‌طور قابل‌ملاحظه تغییر نمی‌کند. برای تعیین زمان گسیل تابش، باید ماده‌ای را انتخاب کنیم که درآن الکترونها به‌سرعت تبدیل

به‌تپ شوند؛ دراین مورد تعداد الکترونهای گردآوری‌شده حائز اهمیت کمتری‌است. برای تعیین نوع ذره (مانند مورد یك واکنش هسته‌ای که در آن انواع مختلفی از ذرات تولید می‌شوند)، باید ماده‌ای را انتخاب کنیم که در آن جرم یا بار ذره اثر مشخصی ایجاد کند. برای اندازه‌گیری‌اسپین یا قطبش ذرات تابشی، باید از آشکارسازی استفاده کنیم که بتواند حالات‌مختلف‌اسپین یاقطبش را تفکیك کند. درمواردی که انتظار آهنگ شمارش فوق‌العاده زیادی را داریم، باید از آشکارسازی استفاده کنیم که بتواند به‌سرعت پس از هر شمارش به حالت عادی بازگردد؛ و برای آهنگ شمارش خیلی کند باید همّ خود را مصروف آشکارسازی هرواقعه وتقلیل اثر تابش زمینه کنیم. بالاخره، اگر به‌بازسازی مسیر تابشهای آشکارشده علاقه‌مندیم، باید آشکارسازی داشته باشیم که نسبت به محل ورود تابش به‌آشکارساز حساس باشد.

دراین‌فصل انواع مختلف آشکارسازها را مورد بررسی قرار می‌دهیم. البته تمام شرایط فوق هرگز دریك آشکارساز جمع نمی‌شوند، بلکه هرآشکارسازی فقط از یکی از این‌خصوصیتها برخوردار است. بحث ما محدود به‌تابشهایی است که دراغلب واپاشیهای هسته‌ای یا مطالعهٔ واکنشها باآنها روبه‌رو می‌شویم: یعنی ذرات باردارسنگین (پروتونها، آلفاها) باانرژی نانسبیتی، الکترونهای‌نسبیتی (باانرژی حدود MeV)، وفوتونهادرناحیهٔ پرتو x وپرتو گاما. آشکارسازهای نوترون جداگانه درفصل ۱۲ (جلد دوم، ترجمهٔ‌فارسی) مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱.۷ برهم‌کنشهای تابش با ماده

ذرات باردار سنگین

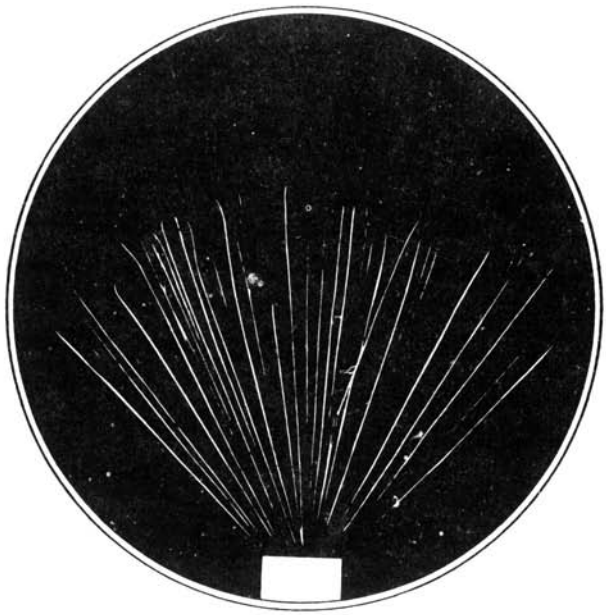
اگرچه پراکندگی کولنی ذرات باردار توسط هسته‌ها (که پراکندگی رادرفورد خوانده می‌شود) فرایندی مهم درفیزیك هسته‌ای‌است، تأثیر آن برکاهش انرژی‌ذرهٔ باردار درطی عبور از مادهٔ‌آشکارساز اندك‌است. ازآنجاکه هسته‌های‌آشکارساز فقط‌کسر بسیارکوچکی درحدود 10^{-15} ازحجم اتمها را اشغال می‌کنند، احتمال‌برخورد ذره باالکترون (تقریباً 10^{15} بار بیش از احتمال برخورد با هسته است. بنابراین سازوکار غالب درکاهش‌انرژی ذرات باردار، پراکندگی کولنی آنها در رویارویی با الکترونهای اتمی‌آشکارساز است.

باتوجه به‌پایستگی‌انرژی وتکانه‌دربرخوردالاستیك سربه‌سر بین‌یك‌ذرهٔ‌سنگین به‌جرم M ویك الکترون به‌جرم m (که برای سهولت‌آن‌را ساکن فرض می‌کنیم)، کاهش انرژی جنبشی ذره به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$\Delta T = T\left(\frac{4m}{M}\right) \qquad (۱.۷)$$

برای‌ذرهٔ α به‌انرژی ۵ MeV (نمونهٔ ذرات گسیل‌شده در واپاشی رادیواکتیو)، این‌مقدار برابر ۲٫۷ keV است. بلافاصله می‌توان به‌چهارنتیجهٔ زیر رسید:

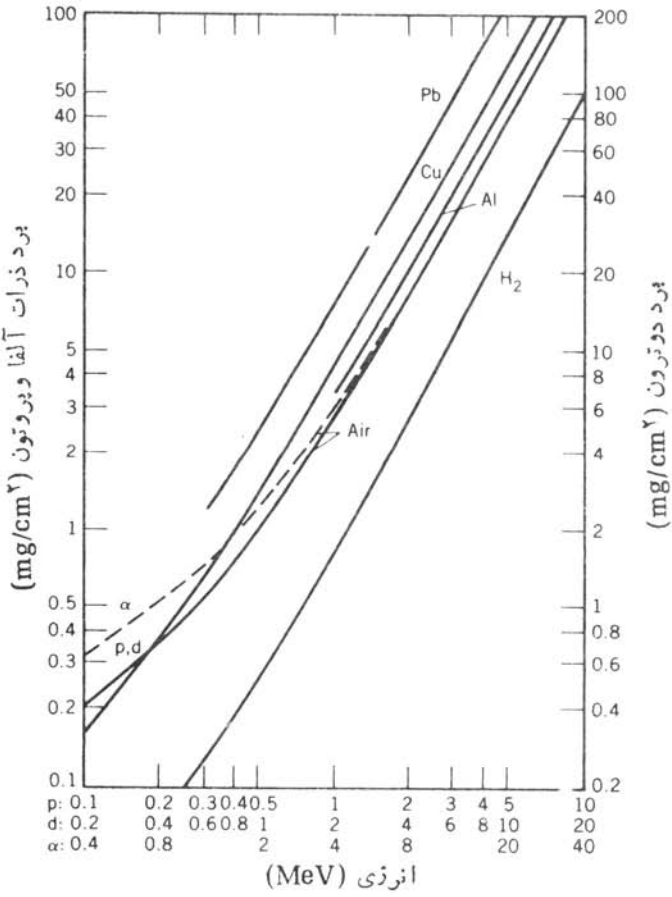
۱. برای اینکه ذره تمام انرژی خود را از دست بدهد، چندین‌هزار واقعه‌از این‌نوع‌لازم است (بیشترین مقدار انرژی‌انتقالی در برخورد سربه‌سر به‌الکترون منتقل می‌شود؛ در اغلب برخوردها، کاهش انرژی خیلی کمتر از این مقدار است).
۲. در یك برخورد خراشان بین الکترون وذرهٔ سنگین، زاویهٔ انحراف ذرهٔ سنگین بسیار کوچك است وبنابراین ذره تقریباً مسیر مستقیمی‌را می‌پیماید.
۳. به‌علت برد نامتناهی نیروی‌کولنی، ذره‌به‌طورهمزمان باالکترونهای زیادی برهم‌کنش می‌کند وبنابراین‌انرژی‌خود را به‌تدریج وبه‌طورپیوسته درطول مسیر ازدست‌می‌دهد. پس از طی مسافتی معین، ذره تمام انرژی‌اش را از دست می‌دهد؛ که این فاصله را برد ذره می‌نامند. برد با درنظر گرفتن نوع ذره، نوع مادهٔ موردگذار، وانرژی ذره تعیین می‌شود. رد ذرات آلفا را دراتاقك ابر درشکل۱.۷ نشان‌داده‌ایم، دراین‌مسیرها پس از یك فاصلهٔ نسبتاً مشخص دیگر اثری از ذرات دیده نمی‌شود. ما معمولا با برد میانگین سروکار داریم‌که طوری تعریف می‌شودکه برد نیمی از ذرات از آن بلندتر و نیم دیگر کوتاهتر است؛ تغییرات حول مقدار میانگین بسیارکوچك است و حداکثر به‌چند درصد می‌رسد وبدین‌ترتیب می‌توان‌برد میانگین را کمیتی دقیق ومفید دانست.
۴. انرژی لازم برای یونش یك اتم (یعنی جداساختن یك الکترون) درحدود ۱۰ eV است؛ بنابراین بسیاری از برخوردها می‌توانند انرژی لازم جهت یونش را به اتم



شکل ۱.۷ رد ذرات‌آلفای حاصل از واپاشی ^{۲۱۰}Po در اتاقك ابر.

منتقل کنند. (اگر انرژی کافی برای تولید یون به‌الکترون داده نشود، اتم به‌یك حالت برانگیخته‌می‌رود وسپس به‌سرعت به‌حالت پایه‌واانگیخته‌می‌شود.) به‌علاوه، الکترونهای با انرژی حدود keV (که به‌نام پرتوهای دلتا معروف‌اند) می‌توانند دراثر برخورد تولید یون کنند، که منجر به‌الکترونهای ثانویهٔ بیشتر می‌شود. برای تعیین‌کاهش‌انرژی ذره، باید الکترونهای اولیه وثانویه وبرانگیختگی اتمی را درنظر بگیریم.

رابطهٔ بین برد وانرژی برای هوا و سایر مواد متداول درشکل ۲.۷ نشان‌داده شده است. برای موادی‌که نشان‌داده‌نشده‌اند، بااستفاده از رابطهٔ نیمه‌تجربی زیرکه به‌نام‌قانون براگ ـ کلیمان معروف است، می‌توان برد را براوردکرد



شکل ۲.۷ رابطهٔ برد ـ انرژی در مواد مختلف. به‌علت کاهش‌انرژی ذره دراثر پراکندگی‌توسط الکترونهای اتمی، برد با چگالی نسبت معکوس دارد. بنابراین برای سهولت حاصلضرب‌برد درچگالی را برحسب mg/cm^2 درنظرمی‌گیرند. متأسفانه این حاصلضرب نیز درنشریات‌علمی «برد» نامیده می‌شود.

$$\frac{R_1}{R_0} \simeq \frac{\rho_0 \sqrt{A_1}}{\rho_1 \sqrt{A_0}} \qquad (۲.۷)$$

که در آن R برد، ρ چگالی، و A وزن اتمی است. شاخصهای ۰ و ۱ به ترتیب نشانه‌های مربوط به‌مادهٔ شناخته شده و ناشناخته‌اند.

رابطهٔ نظری بین برد و انرژی را می‌توان از یك محاسبهٔ کوانتوم مکانیکی فرایند برخورد، که برای اولین‌بار درسال ۱۹۳۰ توسط هانس‌بته انجام شد، به‌دست آورد. این محاسبه، مقدار افت انرژی در واحد طول را (که‌گاهی توان ایستانندگی نامیده‌می‌شود) به‌صورت زیر به‌دست می‌دهد

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \frac{4\pi z^2 N_0 Z\rho}{mc^2\beta^2 A}\left[\ln\left(\frac{2mc^2\beta^2}{I}\right) - \ln(1-\beta^2) - \beta^2\right] \qquad (۳.۷)$$

که در آن $v = \beta c$ سرعت ذره، ze بارالکتریکی ذره، Z، A، و ρ به‌ترتیب عدد اتمی، وزن اتمی، و چگالی مادهٔ موردگذار، N_0 عدد آووگادرو، و m جرم الکترون است. پارامتر I انرژی برانگیزش متوسط الکترونهای اتمی است که می‌توان آن‌را با متوسط‌گیری برروی‌کلیهٔ فرایندهای یونش و برانگیختگی محاسبه‌کرد. درعمل I را به‌عنوان یك ثابت تجربی درنظر می‌گیرند، که مقدار آن برحسب eV درحدود $10Z$ است. برای مثال، در هوا $I = 86\ \mathrm{eV}$ ودر آلومینیم $I = 163\ \mathrm{eV}$ است.

برد را می‌توان باانتگرال‌گیری ازمعادلهٔ (۳.۷) در گسترهٔ انرژی ذره به‌دست آورد

$$R = \int_T^0 \left(-\frac{dE}{dx}\right)^{-1} dE \qquad (۴.۷)$$

اما، معادلهٔ (۳.۷) در قسمت‌کم انرژی نزدیك به‌انتهای برد معتبر نیست، واین‌عمدتاً بدان سبب است‌که دراین‌معادله‌گیراندازی الکترونها توسط ذرات‌کند درنظر گرفته شده است. می‌توان معادلهٔ (۴.۷) را به‌صورت زیر نوشت

$$R = Mz^{-2}\int f(v)dv \qquad (۵.۷)$$

که در آن $f(v)$ تابع سرعت ذره ومستقل از جرم و بار آن است. بنابراین می‌توانیم برد ذرات مختلف با سرعت اولیهٔ یکسان را در محیط‌گذار با هم مقایسه‌کنیم

$$\frac{R_1}{R_0} = \frac{M_1 z_0^2}{M_0 z_1^2} \qquad (۶.۷)$$

الکترونها

الکترونها (مثبت‌ومنفی) همانندذرات باردار سنگین‌از طریق پراکندگی کولنی باالکترونهای

اتمی برهم‌کنش می‌کنند. اما، در اینجا چند تفاوت اساسی وجود دارد: (۱) الکترونها به‌خصوص آنها که در واپاشی بتا زا گسیل می‌شوند، سرعتهای نسبیتی دارند. (۲) الکترونها در برخورد با دیگر الکترونها به میزان زیادی منحرف می‌شوند، و در نتیجه مسیرهای درهم برهمی دارند. بنا براین برد (که به‌صورت فاصلهٔ خطی نفوذ درماده تعریف می‌شود) با طول مسیری که الکترون طی می‌کند، بسیار متفاوت است. (۳) در برخوردهای سربه‌سر یك الکترون با الکترون دیگر، کسر بزرگی از انرژی اولیه ممکن است به الکترون مورد برخورد منتقل شود (درحقیقت، در برخوردهای الکترون ـ الکترون باید هویت دو ذره‌را درنظر بگیریم؛ بعد از برخورد نمی‌توانیم بگوییم که کدام الکترون فرودی و کدامیك هدف بوده است). (۴) به‌علت امکان تغییرات سریع جهت و اندازهٔ سرعت الکترون، شتابهای بزرگی حاصل می‌شوند، و ذرات باردار شتابان باید انرژی الکترومغناطیسی تابش کنند. این تابش را برمشترالونگ یا تابش ترمزی می‌نامند.

رابطهٔ افت انرژی در واحد طول مسیر برای الکترونها نیز توسط بته به‌دست آمده است، ومی‌توان آن‌را مشابه معادلهٔ (۳.۷) به‌صورت زیر نوشت

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_c=\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2\frac{2\pi N_0 Z\rho}{mc^2\beta^2 A}\left[\ln\frac{T(T+mc^2)^2\beta^2}{2I^2mc^2}+(1-\beta^2)\right.$$

$$\left.-(2\sqrt{1-\beta^2}-1+\beta^2)\ln 2+\frac{1}{8}(1-\sqrt{1-\beta^2})^2\right] \qquad (7.7)$$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_r=\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2\frac{Z^2N_0(T+mc^2)}{137m^2c^4A}\left[4\ln\frac{2(T+mc^2)}{mc^2}-\frac{4}{3}\right] \qquad (8.7)$$

که در آن T انرژی جنبشی الکترون است. شاخصهای c و r به‌ترتیب نمایندهٔ افت انرژی به‌علت برخورد و تابش است. رابطهٔ افت تابشی فقط برای انرژیهای نسبیتی معتبر است؛ در انرژی کمتر از 1MeV می‌توان از افت تابشی صرفنظر کرد.

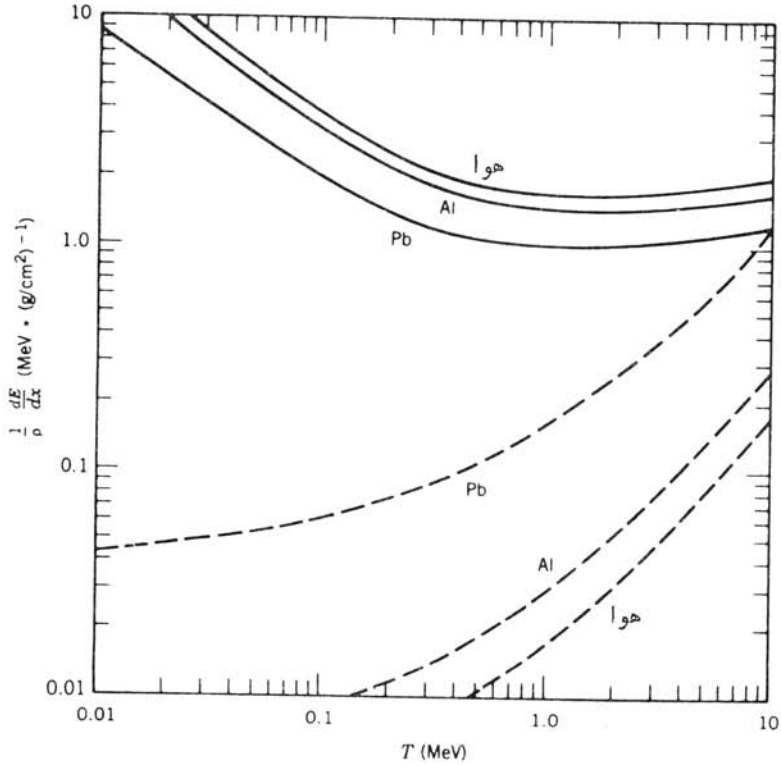
افت انرژی کل مجموع این‌دو مقدار است

$$\frac{dE}{dx}=\left(\frac{dE}{dx}\right)_c+\left(\frac{dE}{dx}\right)_r \qquad (9.7)$$

برای براورد سهم نسبی این دوجمله می‌توان نسبت آنها را تشکیل داد، که درناحیهٔ نسبیتی تقریباً برابر است با

$$\frac{(dE/dx)_r}{(dE/dx)_c}\approx\frac{T+mc^2}{mc^2}\cdot\frac{Z}{1600} \qquad (10.7)$$

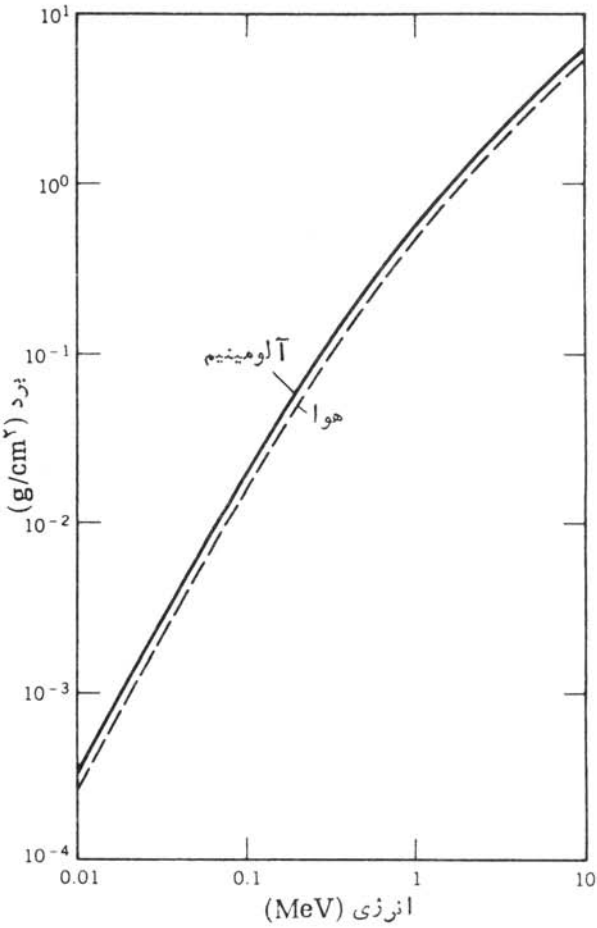
بدین‌سان، جملهٔ تابشی فقط در انرژیهای زیاد و در مواد سنگین قابل ملاحظه است. در



شکل ۳.۷ افت انرژی الکترونها درهوا، Al، و Pb. برای اجتناب از تغییرات زیاد dE/dx ناشی‌ازتعداد الکترونهای ماده، تغییرات کمیت $\rho^{-1}(dE/dx)$ رسم شده‌است. خطوط پر برای نمایش افت برخوردی و خطچینها برای نمایش افت تابشی به‌کار رفته‌اند.

شکل ۳.۷ سهم نسبی افت انرژی برای هوا، آلومینیم وسرب نشان‌داده شده است. برای بیشتر موادی‌که به‌عنوان آشکارسازهای الکترون به‌کار می‌روند، سهم تابشی کوچك است. به‌علاوه، تغییرات افت انرژی ناشی از برخورد برحسب انرژی الکترون بسیارکم است.

محاسبهٔ برد الکترونها را می‌توان با انتگـرال‌گیری از معادلات (۷.۷) و (۸.۷) روی مسیر الکترونها انجام‌داد؛ اما، به‌علت طبیعت‌کاتوره‌ای مسیر، انجام‌آن کار دشواری است. درعوض، از اطلاعات تجربی جذب باریکه‌های الکترون تك‌انرژی برای به‌دست آوردن‌رابطهٔ برد ـ انرژی‌الکترونها استفاده می‌شود. شکل ۴.۷ مثالی از این رابطه است. با مقایسهٔ این اطلاعات با مقادیر $\rho^{-1}(dE/dx)$ حاصل از شکل ۳.۷، نتیجه می‌گیریم که تغییرات برحسب نوع جذب‌کننده کـوچك است، و بنابراین می‌توانیم شکل ۴.۷ را برای براورد برد (برحسب mg/cm^2 که درحقیقت حاصلضرب بـرد درچگالی است) در سایر مواد نیز به‌کار بریم.



شکل ۴.۷ ارتباط بین برد وانرژی برای الکترونها در هوا وآلومینیم.

تابش الکترومغناطیسی

برهم‌کنش پرتوهای گاما و ایکس با ماده ازطریق سه‌فرایند صورت می‌گیردکه عبارت‌اند از جذب فوتوالکتریك، پراکندگی کامپتون، وتولید زوج. دراثر فوتوالکتریك، یك فوتون جذب‌اتم می‌شود ویکی‌از الکترونهای اتمی، که دراین‌مورد فوتوالکترون خوانده‌می‌شود، آزاد می‌گردد. (الکترونهای‌آزاد نمی‌توانند فوتون‌را جذب‌کنند وپس‌زده شوند. انرژی وتکانه توأماً در چنین فرایندی پایسته نخواهند بود؛ برای جذب تکانه یك اتم سنگین لازم است‌که دراین‌حال انرژی منتقل‌شده به‌اتم نیز اندك خواهد بود.) انرژی جنبشی الکترون برابر انرژی فوتون منهای انرژی بستگی الکترون است:

$$T_e = E_\gamma - B_e \qquad (۱۱\cdot۷)$$

محاسبهٔ احتمال جذب فوتوالکتریك دشوار است، ولی با توجه به مطالعات تجربی برخی از ویژگیهای آن شناخته شده است: این پدیده برای فوتونهای کم‌انرژی ($\sim$۱۰۰ keV) بارزتر است، مقدار آن به‌سرعت با افزایش عدد اتمی Z اتمهای جذب کننده (تقریباً به‌صورت $Z^۴$) افزایش و با افزایش انرژی فوتون به‌سرعت (تقریباً به‌صورت $E_\gamma^{-۳}$) کاهش می‌یابد به‌علاوه، در احتمال جذب فوتوالکتریك جهشهای ناپیوسته‌ای در انرژیهای متناظر با انرژی بستگی پوسته‌های الکترونی خاص وجود دارد. یعنی، انرژی بستگی یك الکترون از پوستهٔ K در سرب برابر ۸۸ keV است. فوتونهای فرودی با انرژی کمتر از ۸۸ keV نمی‌توانند فوتوالکترونهای پوستهٔ K را آزاد کنند (اگرچه می‌توانند الکترونهای با انرژی بستگی کمتر مربوط به پوسته‌های بالاتر را آزاد کنند). با افزایش انرژی فوتون به بیش از ۸۸ keV، آمادگی الکترونهای پوستهٔ K برای شرکت در فرایند جذب فوتوالکتریك سبب افزایش ناگهانی احتمال جذب می‌شود، که به‌نام لبهٔ جذب K یا لبهٔ K معروف است. شکل ۵.۷ نمونه‌ای از سطح مقطع جذب فوتوالکتریك را نشان می‌دهد.

پراکندگی کامپتون فرایندی است که در اثر آن فوتون از یك الکترون آزاد پراکنده می‌شود، و سبب تولید یك فوتون کم‌انرژی‌تر و پراکندگی الکترون می‌شود که انرژی آن برابر کاهش انرژی فوتون است. شکل ۶.۷ طرح ساده‌ای از این فرایند را نشان می‌دهد. اگر الکترون مورد برخورد را آزاد و ساکن درنظر بگیریم (تقریبی مناسب، زیرا انرژی فوتون معمولاً درمقایسه با انرژی مداری الکترونهای پوسته‌های سست خارجی در اتم زیاد است). اصل پایستگی تکانهٔ خطی و انرژی (با استفاده از دینامیك نسبیتی) روابط زیر را می‌دهد

$$\frac{E_\gamma}{c} = \frac{E'_\gamma}{c}\cos\theta + \frac{mc\beta\cos\phi}{\sqrt{۱-\beta^۲}} \qquad (۱۲\cdot۷)$$

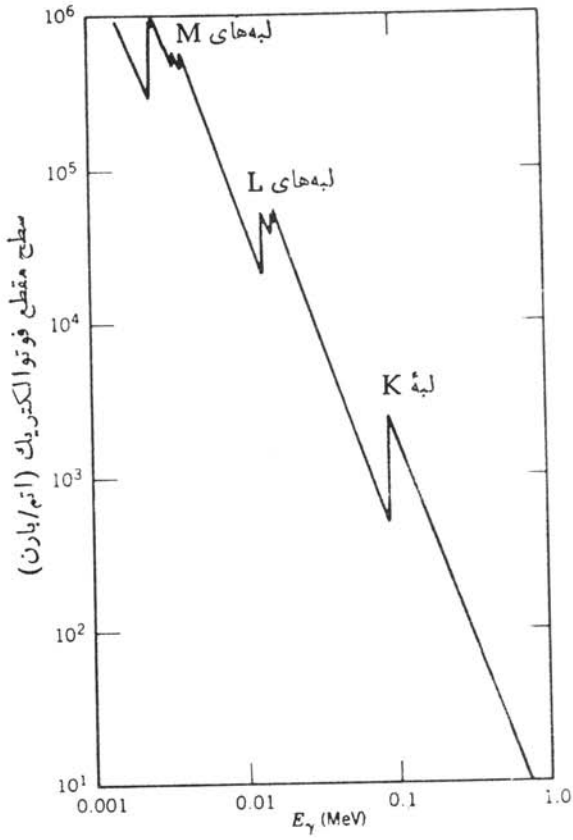
$$\circ = \frac{E'_\gamma}{c}\sin\theta - \frac{mc\beta\sin\phi}{\sqrt{۱-\beta^۲}} \qquad (۱۳\cdot۷)$$

$$E_\gamma + mc^۲ = E'_\gamma + \frac{mc^۲}{\sqrt{۱-\beta^۲}} \qquad (۱۴\cdot۷)$$

اگر موضوع تحت‌بررسی مشاهدهٔ فوتون پراکنده باشد، می‌توان با حذف متغیرهای خارج از مشاهدهٔ β و ϕ فرمول پراکندگی کامپتون را به‌دست آورد

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{۱+(E_\gamma/mc^۲)(۱-\cos\theta)} \qquad (۱۵\cdot۷)$$

گسترهٔ انرژی فوتونهای پراکنده از E_γ برای $\theta = \circ^\circ$ (پراکندگی به‌جلو که‌متناظر با عدم

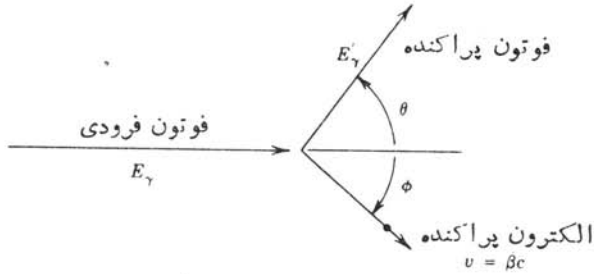


شکل۵۰۷ سطح مقطع فوتو الکتریك در Pb. جهشهای گسسته متناظر با انرژی بستگی پوسته‌های مختلف الکترونی است. برای مثال، انرژی بستگی الکترون K برابر ۸۸ keV است. برای تبدیل سطح مقطع به‌ضریب جذب خطی τ برحسب cm^{-1}، آن‌را در ۰٫۰۳۳ ضرب کنید.

برهم‌کنش است) تا کمینه‌ای تقریباً برابر $mc^2/2 \approx 0.25$ MeV تحت زاویهٔ $\theta = 180°$ برای فوتون پرانرژی تغییر می‌کند.

احتمال پراکندگی کامپتون در زاویهٔ θ را می‌توان با محاسبات کوانتوم مکانیکی این پدیده به‌دست آورد. حاصل این محاسبه فرمول کلاین - نیشینا برای سطح مقطع دیفرانسیلی هر الکترون است

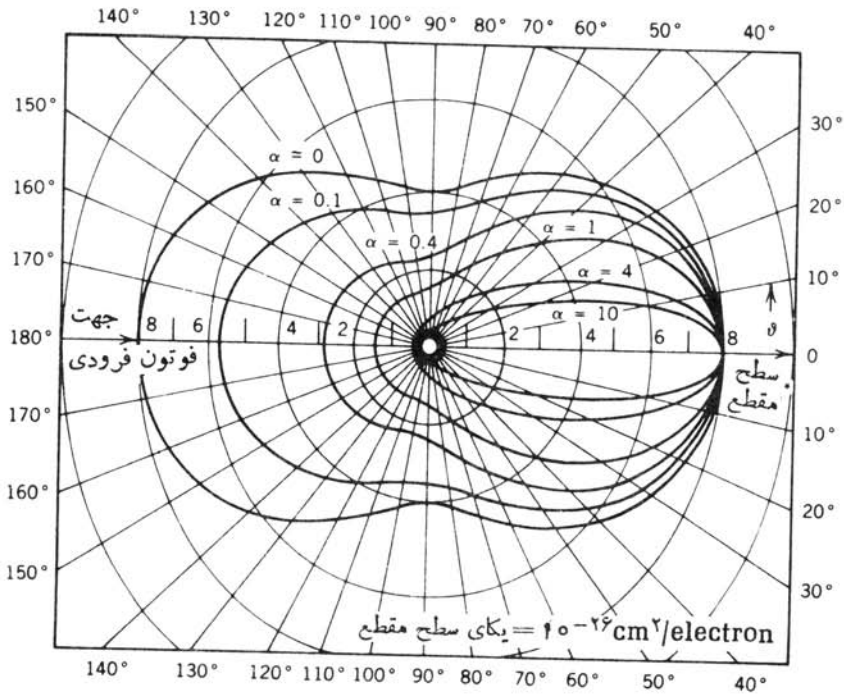
$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega} = r_0^2 \left[\frac{1}{1+\alpha(1-\cos\theta)}\right]^2 \left[\frac{1+\cos\theta}{2}\right] \times \left[1+\frac{\alpha^2(1-\cos\theta)^2}{(1+\cos^2\theta)[1+\alpha(1-\cos\theta)]}\right] \qquad (16.7)$$



شکل ۶.۷ نمودار هندسی پراکندگی کامپتون.

که در آن α انرژی‌فوتون برحسب‌انرژی سکون الکترون ($\alpha = E_\gamma / mc^2$) و r_0 پارامتری به‌نام شعاع کلاسیك الکترون است، $r_0 = e^2 / 4\pi\varepsilon_0 mc^2 = 2.818\ \mathrm{fm}$. (این پارامتر فقط برای سهولت در نظر گرفته می‌شود و ارتباطی با «اندازهٔ» الکترون ندارد.) نمودار قطبی سطح مقطع کامپتون درشکل ۷.۷ نشان‌داده شده است.

اگر به‌جذب فوتونها (یعنی‌حذف آنها از باریکهٔ فوتونهای فرودی) علاقه‌مندباشیم، باید ازمعادلهٔ (۱۶.۷) درتمام زوایا انتگرال بگیریم زیرا دراین‌حالت فوتونهای‌پراکنده را مشاهده‌نمی‌کنیم. نتیجه برای هرالکترون موجود درمحیط پراکننده به‌صورت زیراست



شکل ۷.۷ سطح مقطع پراکندگی کامپتون برای انرژیهای فرودی مختلف.این نمودار قطبی نمایانگر شدت تابش پراکنده برحسب زاویهٔ پراکندگی θ است.

$$\sigma_c=\frac{\pi r_0^2}{\alpha}\left\{\left[1-\frac{2(\alpha+1)}{\alpha^2}\right]\ln(2\alpha+1)+\frac{1}{2}+\frac{4}{\alpha}-\frac{1}{2(2\alpha+1)^2}\right\} \quad (۱۷.۷)$$

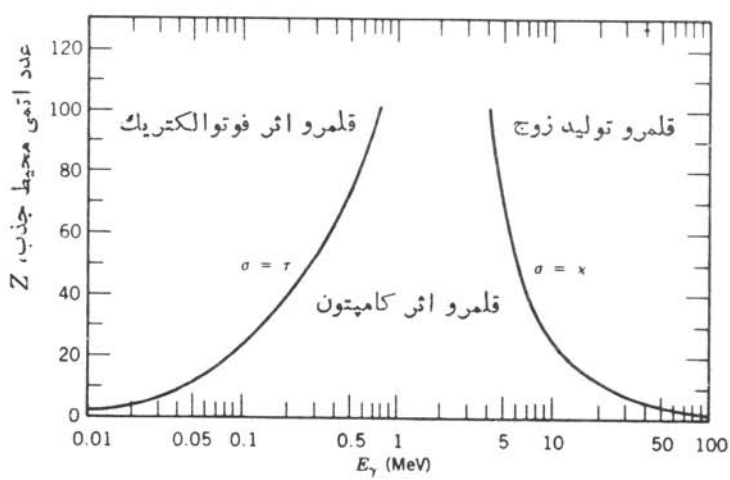
سومین فرایند برهم‌کنش تولید زوج است، کـه درآن با ناپدیدشدن فوتون، یك زوج الکترون - پوزیترون به‌وجود می‌آید. در این فرایند، بنابر پایستگی انرژی داریم

$$E_\gamma=T_++mc^2+T_-+mc^2 \quad (۱۸.۷)$$

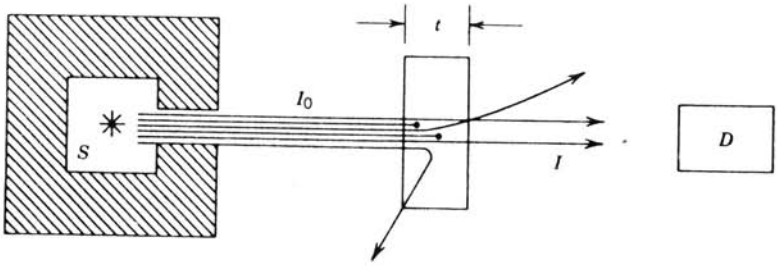
که درآن T_+ و T_- انرژیهای پوزیترون والکترون است. مانندجذب فوتوالکتریك، این فرایند برای پایستگی تکانه محتاج حضور یك اتم‌سنگین در نزدیکی محل تحقق آن است، ولی انرژی پس‌زنی اتم درمقایسه با سایر جملات معادلهٔ (۱۸.۷) ناچیز است.

بدیهی است که انرژی آستانهٔ $2mc^2$ ویا ۱٫۰۲۲ MeV برای این فرایندضروری است، و به‌طورکلی تولید زوج فقط برای فوتونهای پرانرژی حایزاهمیت است. اهمیت تولید زوج نسبت به‌دو فرایند دیگر درشکل ۸.۷ نشان‌داده شده است؛ تـولید زوج فقط در انرژیهای بیش از ۵ MeV غالب می‌شود.

باریکهٔ کاملا همسوشده‌ای از فوتونهای تك انرژی را درنظر بگیریدکه برتیغه‌ای از ماده به‌ضخامت t فرود می‌آید (شکل ۹.۷). فوتون ممکن‌است دراثرجذب‌فوتوالکتریك یاتولید زوج ناپدید شود، ویا دراثر پراکندگی‌کامپتون منحرف شود وبه‌آشکارسازنرسد. فوتونهایی به‌آشکارساز می‌رسندکه هیچگونه برهم‌کنشی نداشته‌انـد؛ البته تعداد اینها از فوتونهای موجود درباریکهٔ فرودی‌کمتر است. (برخلاف مورد ذرات باردار سنگین، که اگر t کوچکتر از برد باشد، تعداد تغییر نمی‌کند ولی انرژی‌کم می‌شود.) احتمال کـل حذف یك‌فوتون در واحد طول μ را ضریب تضعیف خطی‌کل می‌نامند؛ این‌ضریب مجموع احتمالات نسبی‌جذب فوتوالکتریك (τ)، پراکندگی‌کامپتون (σ)، و تولید زوج (κ) است



شکل ۸.۷ سه‌فرایند برهم‌کنش پرتوگاما ومنطقهٔ غلبهٔ آنها.



شکل ۹.۷ آزمایشی برای اندازه‌گیری جذب تابش درتیغه‌ای ازماده به‌ضخامت t. باریکهٔ تابشی به‌طور موازی از چشمهٔ S خارج و توسط ماده جذب یا پراکنده می‌شود. شدت باقیماندهٔ I به‌آشکارساز D می‌رسد.

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \qquad (۱۹.۷)$$

ارتباط بین ضریب جذب خطی کامپتون σ و سطح مقطع محاسبه شدهٔ هر الکترون σ_e، در معادلهٔ (۱۷.۷)، به‌صورت زیر است

$$\sigma = \sigma_e N Z \qquad (۲۰.۷)$$

که در آن Z و N مجدداً نمایندهٔ عدد اتمی مادهٔ پراکننده و تعداد اتمها در واحدحجم است. کلیهٔ کمیتهای معادلهٔ (۱۹.۷) دارای بعد $^{-1}$(طول) هستند.

کاهش نسبی شدت درعبور از ضخامت dx ماده برابر است با

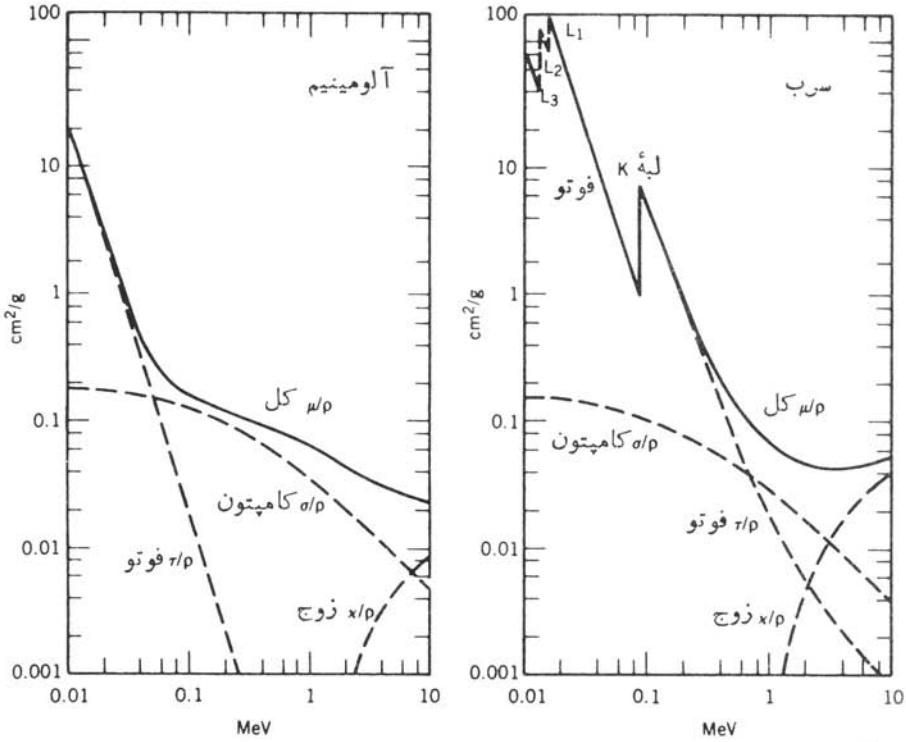
$$\frac{dI}{I} = -\mu\, dx \qquad (۲۱.۷)$$

و بنابراین، شدت خروجی از ضخامت t عبارت است از

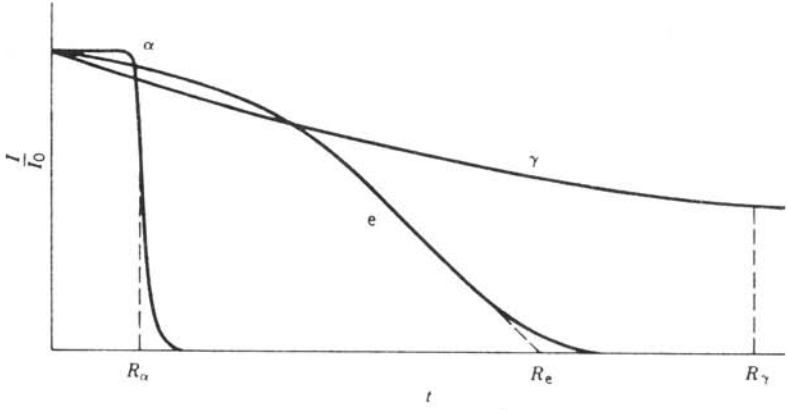
$$I = I_0 e^{-\mu t} \qquad (۲۲.۷)$$

شکل ۱۰.۷ نمونه‌هایی از مقادیر ضرایب تضعیف و بستگی آنها را به‌انرژی نشان می‌دهد.

اگر افت‌شدت باریکه‌های تك انرژی ذرات آلفا باانرژی ۱MeV، الکترونها، و تابش گاما با همان انرژی وباآرایش هندسی‌شکل ۹.۷ را بررسی کنیم، نتایج‌ممکن است مانند شکل۱۱.۷ به‌نظر برسند. شدت α تا ضخامت نزدیك به‌برد میانگین بدون تغییراست وسپس به‌سرعت به‌صفر می‌رسد؛ بردα باانرژی۱MeV درآلومینیم درحدود۰٫۰۰۰۳cm است. شدت الکترونها حتی در ضخامتهای خیلی‌کمتر از برد هم به‌کندی شروع به‌کاهش می‌کند، زیرا الکترونها دراثر پراکندگی از باریکه خارج می‌شوند. برد برون‌یابی شدهٔ الکترونها درحدود ۰٫۱۸cm است. شدت گاما به‌طور نمایی کاهش می‌یابد؛ بردمیانگین (یعنی‌ضخامتی‌که درآن $I = ۰٫۵ I_0$ می‌شود) برای‌گامای با انرژی۱ MeV درآلومینیم درحدود ۴٫۳ cm است.



شکل ۱۰.۷ ضرایب تضعیف جرمی فوتون در طی فرایندهای سه‌گانه در Al و Pb. این مقادیر از تقسیم ضرایب تضعیف خطی برچگالی به‌دست می‌آیند (تا اثرات ناشی از تعداد الکترونها درماده خنثی شود).



شکل ۱۱.۷ شدت تابش عبوری درآزمایشی مشابه شکل۹.۷. برای ذرات آلفا ضخامتی ازماده را که به‌ازای آن $I/I_0 = 0.5$ شود، برد میانگین می‌گویند. برای فوتونها، با توجه به‌بستگی نمایی‌ساده، می‌توان برد میانگین را به‌طریق مشابه تعریف کرد. برای الکترونها، معمولا برد برون‌یابی شده را با امتداد قسمت خطی منحنی جذب مطابق شکل تعریف می‌کنند. مقیاس افقی هرگز خطی نیست، مقدار برد γ ممکن است 10^4 برابر α باشد.

به‌کاربردهای تاحدودی مختلف مفهوم برد در این موارد توجه کنید، ونسبت به‌درك این‌مطلب که انرژی هریك از ذرات مشاهده شدهٔ α و β ونه‌پرتوهای γ درآرایش هندسی شکل ۹.۷ درطی عبور باریکه از ماده‌کاهش می‌یابد نیز توجه داشته باشید.

۲.۷ شمارگرهای گازی

کارکرد بسیاری از آشکارسازهای تابش هسته‌ای مبتنی‌بر استفاده از یك میدان الکتریکی برای جداسازی وشمارش یونهای (یا الکترونهای) تشکیل شده دراثـر عبور تـابش از آشکارساز است. ساده‌ترین آشکارسازی که این‌عمل را انجام می‌دهد اتاقك یونش است، که می‌توانیم آن‌را خازنی باصفحات موازی تلقی‌کنیم که ناحیهٔ بین‌صفحات آن از گازی، که معمولا هواست، پرشده‌است. میدان الکتریکی دراین‌ناحیه مانع ازترکیب مجددیونها والکترونها می‌شود، و برای درك بهتر وضعیت درون اتاقك بایدگفت درحالی‌که‌ابری از الکترونها به‌سوی صفحهٔ متصل به‌پتانسیل مثبت رانده می‌شود یونهای مثبت به‌طرف‌صفحهٔ دیگرخازن سوق‌داده‌می‌شوند. انرژی‌متوسط لازم برای‌تولید یك‌یون درهوا برابر ۳۴ eV است؛ بنابراین تابش بـاانرژی ۱ MeV حـداکثر تعداد ۳×۱۰^{۴} زوج یون ـ الکترون تولید می‌کند. برای این اتاقك متوسط، درحدود ۱۰×۱۰ cm که فاصلهٔ بین صفحات آن برابر ۱ cm باشد، ظرفیت برابر $۸٫۹ \times ۱۰^{-۱۲}$F وتپ ولتاژ حاصل درحدود

$$\frac{(۳ \times ۱۰^{۴}\text{ions})(۱٫۶ \times ۱۰^{-۱۹}\text{C/ion})}{۸٫۹ \times ۱۰^{-۱۲}\text{F}} \cong ۰٫۵\ \text{mV}$$

می‌شود، که علامتی نسبتاً کوچك‌است وقبل از اینکه بتوانیم آن‌را بااستفاده از دستگاههای الکترونیکی استاندارد تجزیه و تحلیل‌کنیم باید به طور قابـل‌ملاحظه‌ای تقویت شود (با ضریب تقریباً $۱۰^{۴}$).

دامنهٔ این علامت متناسب با تعداد یونهای تولیدی (و درنتیجه انرژی‌به‌جا مانده در آشکارساز) ومستقل‌از ولتاژ بین صفحات است. ولتاژ مورد استفاده سرعت سوق ابرهای الکترونی ویونی را به‌سوی الکترودها تعیین می‌کند. برای ولتاژ تقریباً ۱۰۰V، سرعت یونها درحدود ۱ m/s است و زمان عبور از اتاقك ۱ سانتی‌متری تقریباً برابر ۰٫۰۱ s می‌شود. (الکترونها تحرك بیشتری دارند ودرحدود ۱۰۰۰ بار سریعتر حرکت می‌کنند.) این‌زمان درمقیاس شمارش هسته‌ای بسیار طولانی است (دریك چشمهٔ ضعیف رادیواکتیو به‌فعالیت ۱ μCi به‌طور متوسط در هـر ۳۰ μs یك‌واپاشی صورت می‌گیرد)، درنتیجه اتاقك یونش‌کاربردی درشمارش تپهای مستقل‌ندارد. ولی‌کاربرد زیادی در دیدبانی‌تابش دارد، وبسیاری از دیدبانهای تجارتی تابش درحقیقت به‌صورت اتـاقك یونش هستند. شدت‌تابش به‌صورت جریانی ثبت می‌شودکه معرف برهم‌کنش‌تعداد زیادی از تابشها در خلال زمان پاسخ اتاقك است. جریان خروجی، هم بااکتیویتهٔ چشمه وهم با انرژی تابش

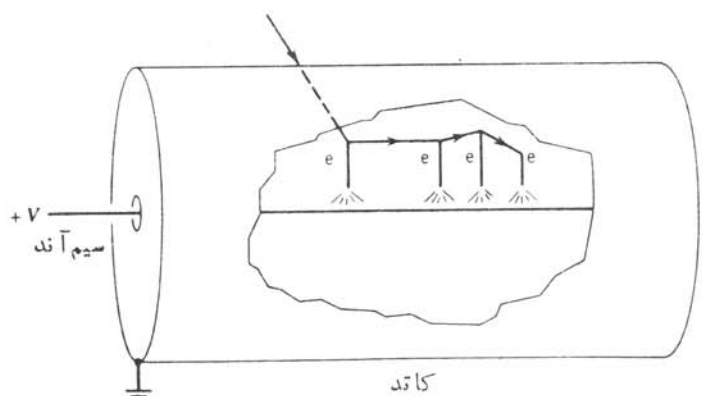
متناسب است ــ تابشهای با انرژی بالاتر یونش بیشتر و در نتیجه پاسخ بزرگتری تولید می کنند.

برای استفاده از یك شمارگر گازی جهت مشاهدهٔ تپهای منفرد، تقویت قابل ملاحظه‌ای لازم است. یك راه رسیدن به این هدف، افزایش ولتاژ به مقادیر معمولا بیش از ۱۰۰۰V است. میدان الکتریکی بزرگتر می تواند الکترونهای حاصل از یونش را، به‌جای آنکه به‌کندی به‌سوی آند سوق داده شوند و برخوردهای الاستیك اتفاقی با اتمهای گاز داشته باشند، شتاب دهد. الکترونهای شتاب گرفته می‌توانند انرژی لازم را جهت برخوردهای ناالاستیك به دست آورند وحتی اتمهای جدیدی را یونیده کنند (و الکترونهای بیشتری تولید کنند که می‌توانند به‌نوبهٔ خود شتاب بگیرند). این تقویت سریع ازطریق یونشهای ثانویه را بهمن تاونزند می‌نامند. اگرچه تعداد وقایع ثانویه به‌ازای هر یون اولیه زیاد است (شاید 10^3 تا 10^5)، کار اتاقك به‌گونه‌ای است که همواره تعداد وقایع ثانویه با تعداد وقایع اولیه متناسب است، ودراین‌صورت این وسیله‌را یك شمارگر تناسبی می گویند.

شکل هندسی شمارگر تناسبی معمولا مطابق شکل ۱۲.۷ به صورت استوانه است. میدان الکتریکی دراین آرایش هندسی درفاصلهٔ r برابر است با

$$E(r)=\frac{V}{r\ln(b/a)} \qquad (۲۳.۷)$$

که در آن b شعاع داخلی کاتد و a شعاع خارجی سیم آند است. بدیهی است که بهمن در ناحیهٔ میدان شدید نزدیك سیم آند ایجاد می‌شود. اما، این ناحیه کسر بسیار کوچکی از حجم اتاقك را تشکیل می‌دهد. اکثریت بزرگی ازیونهای اولیه دور از این ناحیهٔ مرکزی تولید می‌شوند، وسوق الکترونها قبل از شروع فرایند بهمن به‌کندی صورت می گیرد.



شکل ۱۲.۷ شکل هندسی یك شمارگر تناسبی استوانه‌ای. تابش ورودی تعداد زیادی زوج الکترون ـ یون تولید می‌کند. سرعت سوق الکترونها، قبل از رسیدن به‌حوالی سیم آند که در آنجا شتاب می گیرند ویونهای ثانویهٔ بسیاری تولید می کنند، نسبتاً کم است.

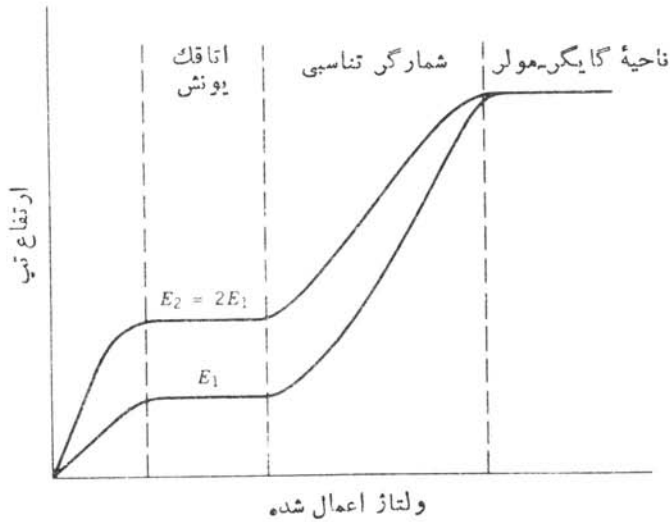
(واقعهٔ اولیه‌ای که در ناحیهٔ میدان شدید ایجاد شده باشد ضریب تقویت کوچکتری دارد زیرا فرصت کافی برای برخورد زیاد را نخواهد داشت.)

از آنجا که علامت خروجی شمارگر تناسبی عمدتاً ناشی از فرایند بهمن است، که به‌سرعت تحقق می‌یابد، تعیین زمان با استفاده از زمان سوق الکترونهای اولیه از نقطهٔ تولید یون اولیه تا حوالی سیم آند یعنی محل ایجاد بهمن انجام می‌شود. این زمان در حدود میکروثانیه است، و در نتیجه این شمارگر می‌تواند تا آهنگ شمارش 10^6/s به صورت تپ‌شمار مورد استفاده قرار گیرد.

اگر میدان الکتریکی بازهم افزایش یابد، بهمنهای ثانویه ایجاد می‌شوند. نقطهٔ شروع این بهمنها ممکن است گسیل فوتونهای ناشی از اتمهای برانگیخته در بهمن اولیه (یا بهمنهای بعدی) باشد. این فوتونها می‌توانند به‌نواحی نسبتاً دور از بهمن اولیه برسند، وبنابراین تمام حجم لوله درفرایند شرکت می‌کند. ضریب تقویت می‌تواند تا 10^{10} برسد. به‌علت شرکت تمام حجم لوله در هر واقعهٔ اتفاقی، هیچ اطلاعی از انرژی تابش اولیه حاصل نمی‌شود ـ کلیهٔ تابشهای فرودی تپهای خروجی یکسانی ایجاد می‌کنند. این ناحیهٔ کار شمارگر گازی را ناحیهٔ گایگر ـ مولر وشمارگرهایی را که براین اساس کار می‌کنند معمولا شمارگرهای گایگر می‌نامند. شمارگرهای گایگر در دستگاههای دیدبانی قابل حمل تابش نیز کاربرد دارند.

علامت خروجی شمارگر گایگر از الکترونهای گردآوری شده از بهمنهای بسیار زیادی تشکیل می‌شود، که بزرگی آن درحدود آن ۱V است، وبنابراین معمولا احتیاج به‌تقویت بیشتر ندارد. زمان گردآوری درحدود 10^{-6}s است که طی آن یونهای مثبت از ناحیهٔ بهمن چندان دور نمی‌شدند. بنابراین، درحوالی سیم آند ابری از یونهای مثبت به‌وجود می‌آید که باکاستن از شدت میدان الکتریکی سبب پایان‌یافتن فرایند بهمن می‌شود.

این چرخه با رسیدن یونهای مثبت به‌کاتد وخنثی شدن آنها (در طی 10^{-4} تا 10^{-3} ثانیه) کامل می‌شود، اما این یونها درطول مسیر خود می‌توانند شتاب بگیرند وبا انرژی کافی برای آزادکردن الکترون (ازکاتد) با آن برخورد کنند که دراین‌صورت فرایندمجدداً آغاز می‌شود (وبه‌علت ماهیت فرایند بهمن چندگانه درشمارگر گایگر، برای آفرینش یك تپ خروجی فقط یك الکترون کافی است). برای جلوگیری از تحقق این واقعه، گازدومی به‌نام گاز فرونشانی به‌شمارگر افزوده می‌شود. گاز فرونشانی معمولا گازی با مولکولهای آلی پیچیده مانند اتانول است. گاز اصلی معمولا از مولکولهای ساده تشکیل شده است ومخلوط می‌تواند نوعاً ۹۰٪ آرگون و۱۰٪ اتانول باشد. وقتی که فضای بارکه‌عمدتاً از یونهای آرگون تشکیل شده‌است به‌سوی کاتد به‌حرکت درمی‌آید، برخوردهایی باگاز فرونشانی صورت می‌گیرد که طی آن به احتمال زیاد یك الکترون از مولکول اتانول به‌یون آرگون‌منتقل وآرگون‌خنثی می‌شود، ودراین‌حال اتانول یونیده به‌سوی کاتد به‌حرکت درمی‌آید. با رسیدن آن به‌کاتد وخنثی شدنش، انرژیی که قبلا صرف آزاد شدن الکترون شده‌بود، می‌تواند جذب وسبب تجزیهٔ مولکول شود (فرایندی که برای اتم سادهٔ آرگون امکان‌پذیر نیست). به‌این‌ترتیب، گاز فرونشانی به‌تدریج مصرف می‌شود وشمارگر گایگر



شکل۱۳.۷ ارتفاع تپهای ایجادشده توسط شمارگرهای گازی مختلف برحسب ولتاژ مورداستفاده، برای دو دسته ذرات تابشی که انرژی آنها باضریب۲ باهم متفاوت است. درناحیهٔ گایگر-مولر، برای کلیهٔ تابشها تپ خروجی باارتفاع یکسان تولید می‌شود؛ درسایر نواحی، ارتفاع تپ خروجی با انرژیی که تابش از طریق یونش اولیه ازدست می‌دهد متناسب است.

باید به‌طور دوره‌ای تعویض شود. درطرحهای دیگر شمارگر گایگر از هالوژنها به‌عنوان گاز فرونشانی استفاده شده است. دراین نوع شمارگر، ترکیب مجدد مولکول تجزیه‌شده، ضرورت تعویض شمارگر را از میان می‌برد.

نواحی مختلف کار شمارگرهای گازی درشکل۱۳.۷ نشان‌داده شده‌اند. در ولتاژهای کم، ترکیب مجدد الکترونها و یونهای اولیه صورت می‌گیرد. با افزایش V به‌ناحیهٔ اتاقك یونش می‌رسیم که در آن تپ خروجی با یونش اولیهٔ تولید شده دراثر تابش و درنتیجه با انرژی آن متناسب، ولی‌از ولتاژ دوسر شمارگر مستقل است. درناحیهٔ تناسبی، دامنهٔ تپ با افزایش V زیاد می‌شود که این‌امرکار تجزیه وتحلیل را آسانتر می‌کند، ولی تپ خروجی هنوز هم از طریق یونش ایجاد شده باانرژی تابش متناسب است. بالاخره، به‌ناحیهٔ پلاتوی گایگر می‌رسیم که درآن کلیهٔ تابشها، بدون‌توجه به‌مقدار یونش‌اولیه و یا انرژی تابش، خروجی‌یکسانی تولید می‌کنند.

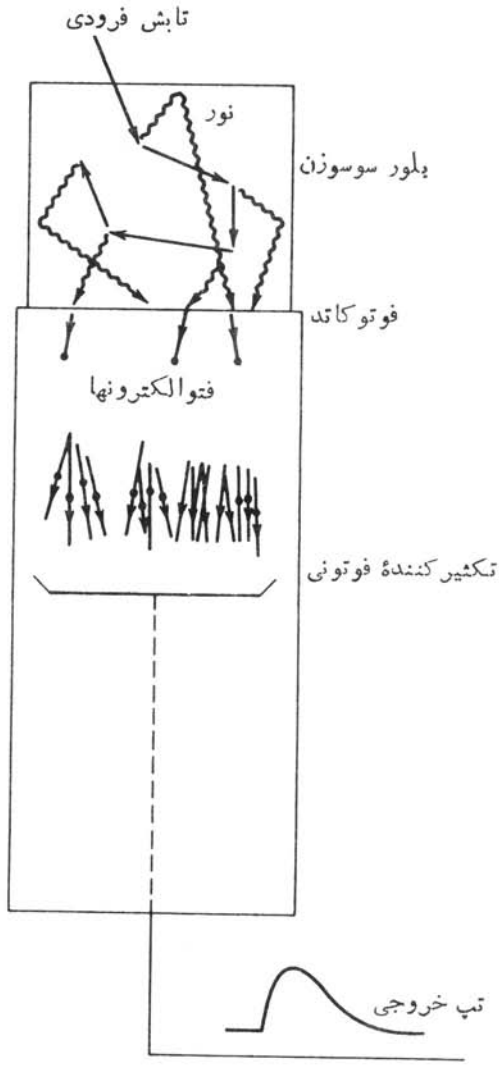
۳.۷ آشکارسازهای سوسوزن (سنتیلاسیون)

نقطهٔ ضعف شمارگرهای گازی بازدهٔ کم آنها برای بسیاری از تابشهای موردتوجه در فیزیك هسته‌ای است. دلیل اصلی آن‌هم برای این است که برد یك‌فوتون گامای ۱ MeV

درهوا درحدود ۱۰۰ m می‌شود. آشکارسازهای حالت جامد با چگالیهای بیشتر از گاز، احتمال جذب درآشکارسازی بااندازهٔ معقول‌را افزایش‌می‌دهند. اما برای ساختن آشکارساز جامدی‌که عملا قابل‌استفاده باشد، تحقق دوشرط متضاد ضروری است: (۱) مادهٔ آشکارساز باید بتواند میدان الکتریکی قوی را تحمل کند تا الکترونها و یونها قابل گردآوری و تبدیل به تپ الکترونیکی باشند، و درغیاب تابش جریان الکتریکی درآن باید بسیار کوچك یا صفر باشد تا نوفهٔ زمینه قابل‌توجه نباشد. (۲) الکترونهای زیادی باید در اثر تابش به‌آسانی از اتمها قابل جداشدن باشند، و الکترونها و اتمهای یونیده باید بتوانند به‌سهولت درماده حرکت کنند. (درحقیقت، خود یونها درجسم جامد حرکت‌نمی‌کنند، بلکه جای خالی الکترون یا «حفره» دراثر انتقالهای متوالی الکترون از یك اتم به‌اتم بعدی‌پر می‌شود، به‌طوری‌که به‌نظر می‌رسدکه «حفره» حرکت می‌کند.) با توجه به‌شرط اول باید از یك جسم نارسانا به‌این منظور استفاده‌کرد، درحالی‌که برای تحقق‌شرط دوم به‌یك‌جسم رسانا نیاز داریم. بدیهی است‌که برای مصالحه باید ازجسم نیمرسانا استفاده‌کنیم، که‌در بخش‌بعدی‌آن را بررسی خواهیم‌کرد. مواد نیمرسانای‌کپه‌ای دراندازه‌های مناسب برای آشکارسازی تابش (چندده سانتی‌متر مکعب) تا اواخر دههٔ ۱۹۶۰ در دسترس نبودند، و برای پاسخگویی به‌نیاز وسایل‌طیف‌سنجی هسته‌ای با بازدهٔ‌زیاد وتوان‌تفکیك قابل‌قبول‌بود که شمارگرهای سوسوزن درسالهای دههٔ ۱۹۵۰ ساخته شدند و مورد استفاده قرار گرفتند.

شمارگرهای سوسوزن مشکل ما را درانتخاب مواد مورد نیاز به‌صورت زیرکانه‌ای حل می‌کنند: الکترونهای تولید شده در فرایند یونش همان الکترونهایی نیستندکه تپ الکترونیکی‌را به‌وجود می‌آورند. رابط میان الکترونهای یونش و الکترونهای‌مولدتپ، نور معمولی است. کل فرایند را می‌توان با توجه به‌شکل ۱۴.۷ به‌طریق زیر درك کرد: (۱) تابش فرودی واردآشکارساز می‌شود وطی برهم‌کنشهای بسیار متعدد سبب برانگیزش اتمها به‌حالات برانگیخته می‌شود. (۲) حالات برانگیخته به‌سرعت نور مرئی (یانزدیك مرئی) گسیل می‌کنند؛ چنین ماده‌ای را فلوئورسان می‌نامند. (۳) نور به سطحی‌که نسبت به‌فوتونها حساسیت دارد می‌تابد و حداکثر یك فوتوالکترون به‌ازای هرفوتون تولید می‌شود. (۴) این الکترونهای ثانویه تکثیر می‌شوند، شتاب می‌گیرند، ودرلولهٔ تکثیرکنندهٔ فوتونی (PM) به‌صورت تپ خروجی درمی‌آیند.

تعداد زیادی از انواع مختلف‌سوسوزنها ولوله‌های PM برای‌کاربردهای‌گوناگون ساخته‌شده‌اند. خواصی که‌معمولا درانتخاب‌سادهٔ‌آشکارسازموردنظرقرارمی‌گیرند عبارت‌اند از: نور خروجی (کسری ازانرژی‌فرودی‌که به‌صورت نور ظاهر می‌شود)، بازده(احتمال جذب‌تابش)، مسئلهٔ‌زمان، وتفکیك‌انرژی. ضوابط‌دیگر به‌سهولت‌کار بامواد مربوط‌می‌شود. خواص نوری یك‌نوع سوسوزن متداول، NaI بلورین، دراثر رطوبت‌تغییر می‌کند؛بخار آب بلور شفاف را به‌گردکدر تبدیل می‌کند و از این‌رو NaI باید همیشه سربسته باقی بماند. ازطرف دیگر، بسیاری از سوسوزنهای پلاستیکی را می‌توان با اره‌های معمولی برید و به‌شکل و اندازهٔ دلخواه درآورد.



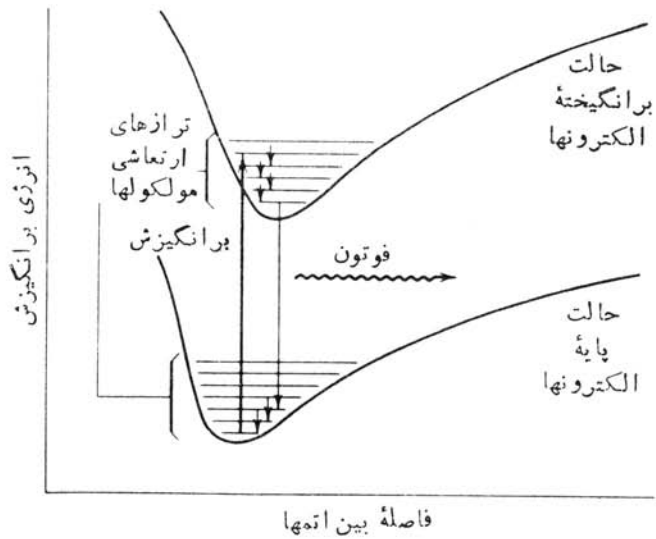
شکل ۱۴.۷ فرایندهای اساسی دریك آشکارسازی سوسوزن.

برای درك طرزکار یك سوسوزن، باید مکانیسم جذب‌انرژی و برانگیزش الکترونها را به‌حالات برانگیخته بررسی کنیم. آشکارسازهای موجود اساساً بردو نوع‌اند، یك‌دسته ازآنها از موادآلی ودستهٔ دیگر از مواد معدنی ساخته می‌شوند.

در سوسوزنهای آلی (که ممکن است به‌صورت مایع یا جامد باشند)، برهم‌کنش بین مولکولها نسبتاً ضعیف است، ومی‌توانیم‌خصوصیات آنها را برحسب حالات برانگیختهٔ گسستهٔ مولکولها بررسی کنیم. یك‌مولکول می‌تواند به‌دوطریق انرژی‌جذب کند: الکترونها

می‌توانند به‌حالات برانگیختهٔ بالاتر بروند، واتمهای هرمولکول می‌تواند نسبت به‌یکدیگر ارتعاش کنند. فاصلهٔ نوعی انرژیهای ارتعاشی درحدود ۰٫۱eV است، درحالی‌که انرژی برانگیزش الکترونها در حدود چند eV است. ساختار حاصل می‌تواند به صورت شکل ۱۵.۷ باشد. الکترونهای برانگیخته معمولا الکترونهایی‌هستندکه درپیوند ماده شرکت‌فعال ندارند. درهیدروکربنهای معطر، مانند مولکولهایی کـه با ساختار حلقوی بنزن مشخص می‌شوند، سه الکترون ازچهار الکترون ظرفیت کربن درمدارواره‌ها (اوربیتالها)ی‌مختلطی هستندکه مدارواره σ خوانده می‌شوند؛ این الکترونها قویاً درفاصلهٔ بین‌هرکربن و دوکربن طرفین آن و یك‌هیدروژن جایگزین شده‌اند. چهارمین الکترون که درمدارواره‌به‌اصطلاح π قرار دارد، به‌این شدت جایگزین نشده است و به‌اندازهٔ الکترونهای σ در فرایند پیوند سهیم نیست. همین الکترون π است که در فرایند سوسوزنی نقش اصلی را بازی می‌کند.

تابش فرودی باتعداد زیادی از مولکولها برهم‌کنش می‌کند، ودرهر برهم‌کنش با برانگیزش مولکول چند الکترون ولت از دست می‌دهد. حالات ارتعاشی بسیاری ممکن است برانگیخته‌شوند (همین‌طور تعداد حالات برانگیختهٔ الکترونی نیز بسیار زیاد است که برای‌سهولت فقط پایین‌ترین‌حالتهای الکترونی‌نشان‌داده‌شده‌اند). این‌حالات به‌سرعت (۱ ps ~) به‌پایین‌ترین حالت ارتعاشی حالت برانگیختهٔ الکترون واپاشیده می‌شوندکـه



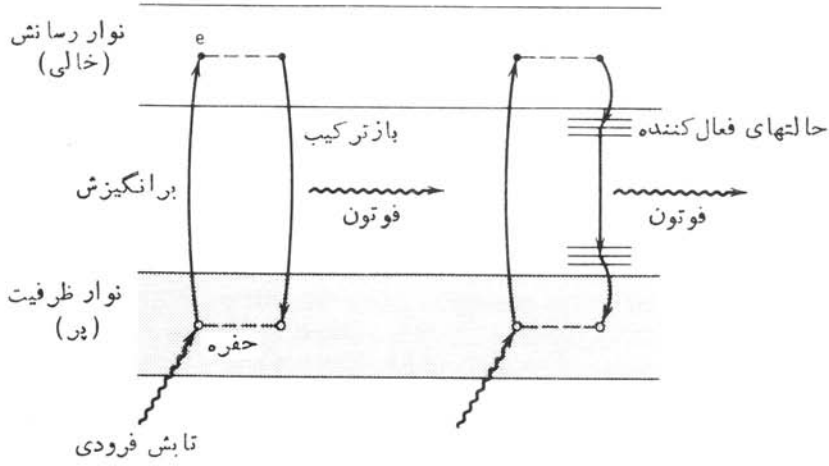
شکل ۱۵.۷ ساختار الکتـرونی یك سوسوزن‌آلی. حالات الکترونی به‌صورت‌کمینهٔ پتانسیل حاصل از ترکیب اثرات جاذبهٔ مولکولی‌که مانع جداسازی اتمها می‌شود ودافعه‌ای کـه مانع نزدیکی اتمها می‌شود (زیرا اصل پاؤلی‌مـانع از همپوشی تابع‌موجهاست) نشان داده شده‌اند. در داخل کمینهٔ پتانسیل الکترون، تعدادی تراز ناشی از ارتعاش اتمهای مولکول درکنار هم قرارگرفته‌اند.

آنگاه این‌حالت (در زمانی حدود ۱۰ ns) به‌یکی ازحالات ارتعاشی حالت پایهٔ‌الکترون واپاشیده می‌شود. اینها هم‌به‌نوبهٔ خود به‌حالت پایهٔ ارتعاشی واپاشیده خواهند شد.

در شرایط متعارفی، در دمای اتاق تمام مولکولهای یك سوسوزن در پایین‌ترین حالت ارتعاشی حالت پایهٔ الکترونی هستند. انرژی گرمایی kT در دمای اتاق برابر ۰٫۰۲۵ eV است، ودرنتیجه طبق توزیع‌جمعیت بولتزمن $e^{-E/kT}$، وجود هرگونه‌جمعیت حالات ارتعاشی در ورای حالت پایهٔ‌الکترون غیرمحتمل است. بنابراین، فقط برای یکی ازفوتونهای گسیل‌شده دراثرگذار احتمال‌جذب وجود دارد. این‌نکته یکی ازخصوصیات مهم سوسوزن را نشان می‌دهد: سوسوزن باید برای تابش خودش شفاف باشد.

متداولترین نوع سوسوزنهای معدنی تك‌بلورهای هالوژن قلیایی هستندکه در میان آنها NaI بیشترین‌مصرف را دارد. برای حصول به‌شفافیت باید باتك‌بلور سروکار داشته باشیم، زیرا وجود بازتاب وجذب در سطوح بلور، سوسوزن چند بلوری را بی‌مصرف می‌کند. برهم‌کنشهای دسته‌جمعی اتمها در یك بلور سبب می‌شوندکه ترازهای انرژی به‌صورت یك‌رشته نوارهای انرژی درآیند. بالاترین نوارها نوار ظرفیت و نوار رسانش هستند (شکل ۱۶.۷). دریك‌مادهٔ عایق‌مانند NaI، حالتهای‌نوار ظرفیت‌معمولا پر وحالتهای نوار رسانش خالی هستند. تابش ورودی می‌تواند سبب عبور الکترون از گاف انرژی (بیش از ۴ eV) و ورود به‌نوار رسانش شود. بالاخره، الکترون انرژی خود را با گسیل یك فوتون ازدست می‌دهد وبه‌نوار ظرفیت برمی‌گردد.

برای افزایش احتمال گسیل فوتون وکاهش خودجذبی نور، مقادیر اندك ناخالصی به نام فعال‌کننده به‌بلور افزوده می‌شود. از عنصر تالیم به‌عنوان یك فعال‌کنندهٔ متداول



شکل ۱۶.۷ نوارهای انرژی دریك بلور. فرایندهای مشخصهٔ یك بلور خالص مانند NaI در طرف چپ نشان‌داده شده است. درسمت راست فرایندها در حضور یك فعال‌کننده مانند Tl در NaI(Tl) نشان‌داده شده است.

استفاده می‌شود، ودراین‌صورت آشکارساز را مثلا به‌صورت NaI(Tl) نشان می‌دهند. فعال‌کننده سبب ایجاد حالتهای جدیدی درگاف انرژی می‌شود وگسیل نور بین‌این‌حالات فعال‌کننده صورت می‌گیرد. درمورد NaI، طول موج بیشینهٔ گسیل از ۳۰۳ nm درNaI خالص به ۴۱۰ nm در NaI(Tl) منتقل می‌شود. این انرژی نمی‌تواند در NaI(Tl) جذب شود، زیرا حالات پایهٔ فعال‌کننده الکترون ندارند، وتغییر طول‌موج از فرابنفش به‌مرئی سبب بهترشدن همپوشی با بیشترین حساسیت دراغلب لوله‌های تکثیرکنندهٔ فوتونی می‌شود.

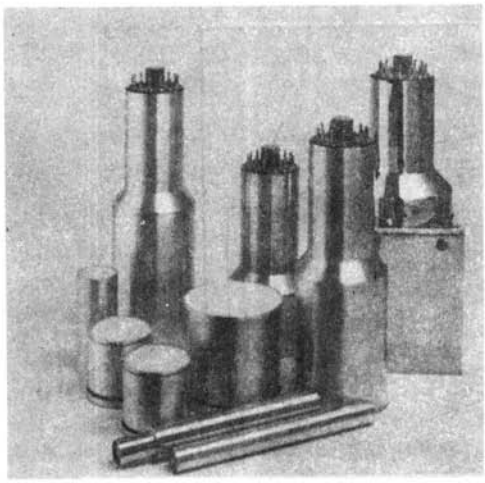
جدول ۱.۷ برخی خصوصیات آشکارسازهای سوسوزن متداول را نشان می‌دهد. انتخاب‌سوسوزن درعمل به‌نوع آزمایش مورد نظر بستگی دارد. برای مثال، درآنجاکه بازدهٔ بالای پرتوهای γ مورد نظر باشد معمولا NaI(Tl) انتخاب می‌شود، مقدار بزرگ Z در I(۵۳) احتمال جذب فوتون را زیاد می‌کند. اما ازنظر زمانی، NaI(Tl) خیلی مناسب نیست و سوسوزن پلاستیك با بازدهٔ کمتر می‌تواند انتخاب مناسبتری باشد.

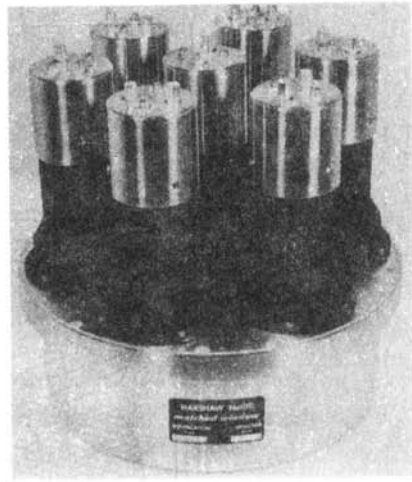
اتصال سوسوزن به‌لولهٔ تکثیرکنندهٔ فوتونی به‌راههای مختلف انجام می‌گیرد. در بعضی از موارد، ترکیب آشکارساز ـ لوله به‌عنوان یك واحد سربسته خریداری می‌شود. آشکارسازهای NaI(Tl) را می‌توان با استفاده از یك «روغن‌اپتیکی» شفاف مستقیماً

جدول ۱.۷ خصوصیات برخی از سوسوزنهای متداول.

نام	نوع	چگالی (g/cm^3)	ضریب شکست	طول‌موج گسیل بیشینه (nm)	خروجی نسبی[1]	ثابت زمانی (ns)
آنتراسن	جامدآلی	۱٫۲۵	۱٫۶۲	۴۴۷	۰٫۴۳	۳۰
پایلوتB	پلاستیك (جامدآلی)	۱٫۰۳	۱٫۵۸	۴۰۸	۰٫۳۰	۱٫۸
NE ۲۱۳	مایع آلی	۰٫۸۷	۱٫۵۰۸	۴۲۵	۰٫۳۴	۳٫۷
NaI(Tl)	بلور معدنی	۳٫۶۷	۱٫۸۵	۴۱۰	۱٫۰۰	۲۳۰
CsF	بلور معدنی	۴٫۱۱	۱٫۴۸	۳۹۰	۰٫۰۵	۵

۱. خروجی نسبی شامل بازدهٔ نوعی جذب فوتون ونور خروجی حاصل است.

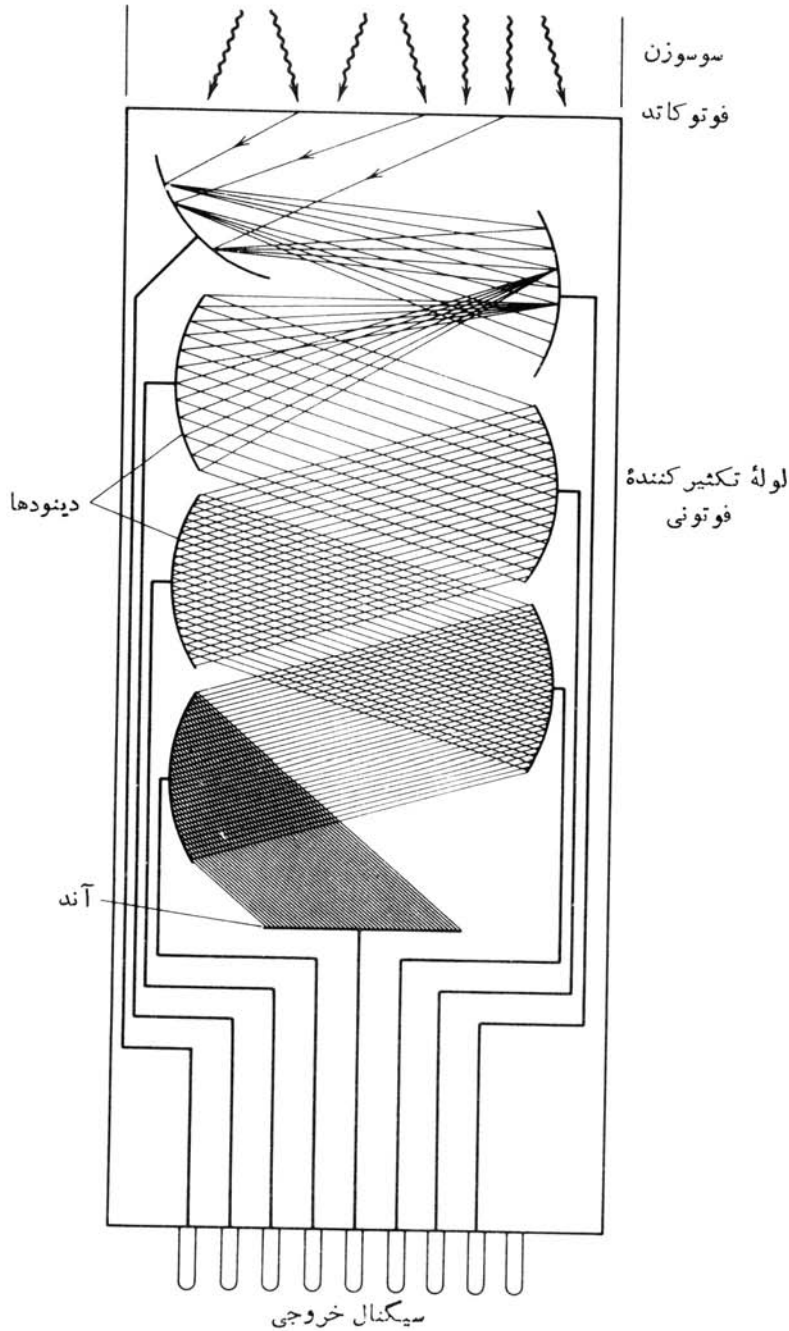




شکل ۱۷.۷ (چپ) تعدادی سوسوزن NaI که در بعضی از آنها تکثیر کنندهٔ فوتونی هم نشان‌داده شده‌است. (راست) یك آشکارساز بزرگ NaI که به‌هفت‌لولهٔ تکثیر کنندهٔ فوتونی وصل شده‌است.

به‌لولهٔ PM وصل کرد، تا تغییر ضریب شکست تقریباً یکنواخت و بازتاب داخلی به‌حداقل برسد. در بعضی موارد شکل‌هندسی تکثیر کننده با شکل هندسی‌سوسوزن بسیار متفاوت‌است ویا (مثلا به‌منظور حذف اثرات میدانهای‌مغناطیسی) باید آن‌را دور ازسوسوزن قرار داد. در این گونه موارد، ازیك «لولهٔ نوری» استفاده می‌شود. لوله‌های نوری را می‌توان به‌هر اندازه برید و آن را از هرمادهٔ شفاف معمولی همچون لوسیت ساخت. برای بهبود بازدهٔ گردآوری نور، سوسوزن و لولهٔ نوری را باید با مواد بازتابنده پوشانید. مجموعه‌ای‌از آشکارسازهای سوسوزن و لوله‌های نوری وPM را درشکل ۱۷.۷ نشان داده‌ایم.

نمودار ساده‌ای از یك لولهٔ PM درشکل ۱۸.۷ نشان‌داده شده است. تعدادکمی الکترون (کمتر ازتعداد فوتونهای‌فرودی) در فوتوکاتدآزاد می‌شود، سپس این‌الکترونها توسط‌الکترودهایی به‌نام دینود تکثیر وکانونی‌می‌شوند. دینودها به‌زنجیرهٔ ولتاژی که‌توسط یك‌منبع تغذیه وتعدادی‌تقسیم کنندهٔ ولتاژ تأمین می‌شود متصل‌اند. اختلاف‌پتانسیل دو دینود مجاور در حدود V ۱۰۰ است، و از این‌رو اختلاف انرژی الکترونهایی که به‌دینودهای متوالی برخورد می‌کنند درحدود eV ۱۰۰ است. دینودهـا از موادی ساخته می‌شوندکه احتمال گسیل الکترون ثانویه درآنها زیاد است؛ برای رها شدن یك الکترون ۲ تا eV ۳ انرژی لازم‌است وبنابراین افزایش تعداد الکترونها با ضریب ۳۰ تا ۵۰ صورت‌می‌گیرد. اما، به‌علت آزادشدن الکترونها درجهات کاتوره‌ای، تعدادکمی ازآنها واقعاً از سطح دینود رها می‌شوند ومعمولا بهره‌ای درحدود ۵ برای هر دینود حاصل می‌شود. با وجوداین، در لوله‌ای‌که ۱۰ دینود داشته باشد، بهرهٔ کلی برابر $۵^{۱۰}$ (درحدود $۱۰^{۷}$) خواهد بود. برای طیف‌سنجهای انرژی، دو مشخصهٔ مهم خطی‌بودن و پایداری را باید موردتوجه قرار داد.



شکل ۱۸۰۷ نمودار طرزکار تکثیرکنندهٔ فوتونی. الکترونهای رهاشده ازکاتد در اولین دینود جذب وچندبرابر می‌شوند. هر دینود در پتانسیلی بالاتر از دینود قبلی قرار دارد، یك لوله می‌تواند ۱۰ تا ۱۴ دینود داشته باشد. در هرمرحله، تعداد الکترونها با ضریبی از مرتبهٔ ۵ افزایش می‌یابد.

خطی بودن به‌معنی تناسب مستقیم دامنهٔ تپ نهایی خروجی با تعداد وقـایع سوسوزنی، و درنتیجه تناسب بین دامنهٔ تپ و انرژی به‌جا مانده در آشکارساز دراثر تابش است. چون بهرهٔ هر مرحلهٔ دینود به‌اختلاف ولتاژ بستگی دارد، هـر تغییری در ولتاژ سبب تغییر تپ خروجی می‌شود؛ بنابراین پایا ساختن منبع تغذیه ضرورت پیدا می‌کند.

انواع مختلفی از لوله‌های تکثیر کننده دردسترس‌اند، ودرانتخاب آنها پارامترهایی مانندانداز‌هٔ فیزیکی، پاسخ فوتوکاتد به‌طول موجهای فرودی مختلف، حساسیت فوتوکاتد، بهره، میزان نوفه، وخصوصیات زمانی دخالت دارند.

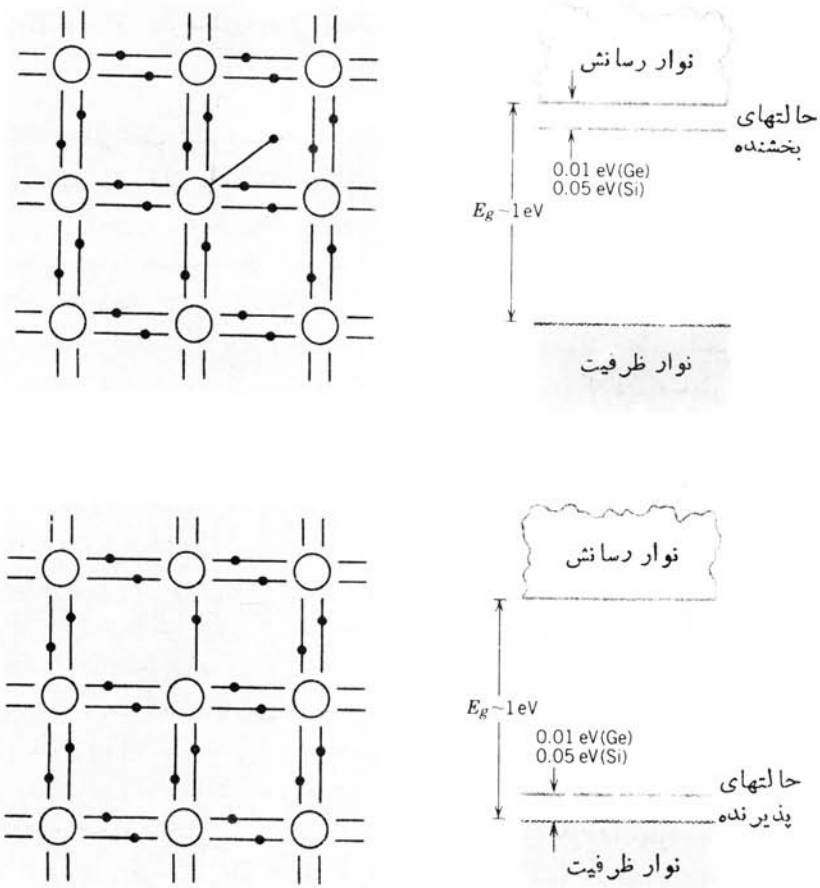
۴.۷ آشکارسازهای نیمرسانا

همان‌طور که در بخش قبلی بحث شد، مواد نیمرسانای جامد (مانند ژرمانیم و سیلیسیم) را می‌توان به‌جـای سوسوزنهـا برای آشکارسازی تابش به‌کار برد. عناصر Ge و Si هردو به‌صورت بلور جامد هستندکه درآنها اتمهای چهارظرفیتی چهارپیوندکووالان بااتمهای مجاور تشکیل می‌دهند. بنابراین تمام الکترونهای ظرفیت در پیوندهای‌کـووالان شرکت دارند وساختار نواری شامل یك نوار ظرفیت پر و یك نوار رسانش خالی است. تفاوت میان یك جسم عایق ویك نیمرسانا در اندازهٔ گاف انرژی است، که در عـایق در حدود ۵ eV و در نیمرسانا در حدود ۱ eV است. در دمـای اتاق تعداد اندکی از الکترونها (شاید یکی‌از هر $۱۰^۹$ الکترون)دراثر برانگیختگی ازگاف عبورمی‌کنند وبه‌نوار رسانش می‌روند و ازخود جای‌خالی به‌نام «حفره» درنوار ظرفیت برجای می‌گذارند. با پرشدن این‌جای‌خالی توسط الکترون اتم مجاور (وتولید یك حفرهٔ جدید) به‌نظر می‌رسد که حفره در بلور مهاجرت می‌کند (ولی البته اتمهای با بار مثبت حرکت نمی‌کنند).

برای کنترل رسانش الکتریکی در نیمرساناها، مقادیرکمی از مواد ناخالصی به‌نام آلاینده به‌آنها اضافه می‌شوند. در فرایند آلاییدن، اتمهای ۳ یا ۵ ظرفیتی در شبکهٔ بلور وارد می‌شوند. درمـورد اتمهای ۵ ظـرفیتی (P، As، و Sb)، چهارالکترون در پیوند کووالانی با Si و Ge شرکت می‌کنند، پنجمین الکترون به‌آسانی درشبکه حرکت می‌کند و درست در زیر نـوار رسانش مجموعه‌ای از حالتهای بخشندهٔ گسسته از هم را تشکیل می‌دهد. به‌علت وجود حاملین بـار منفی (الکترونها)، این‌نوع ماده را نیمرسانای نوع n می‌نامند. از سوی دیگر اگـر از اتمهای ۳ ظرفیتی استفاده‌کنیم، تلاش در جهت تشکیل پیوندهای‌کووالانی با چهار اتم بلور منجر به‌تولید حفره‌های اضافی دربلور می‌شود. این عمل سبب تشکیل حالتهای پذیرنده در بالای نـوار ظرفیت می‌شود، و مادهٔ حـاصل را نیمرسانای نوع p می‌نامند زیرا حاملین بار حفره‌های با بار مثبت‌اند. شکل۱۹.۷ ساختار نواری این نیمرساناها را نشان می‌دهد.

باید به‌خاطر داشته باشیم‌که نوع p و نوع n به‌علامت بـار حاملین اولیهٔ جریان الکتریکی مربوط می‌شوند، وخود مواد از نظر الکتریکی خنثی هستند.

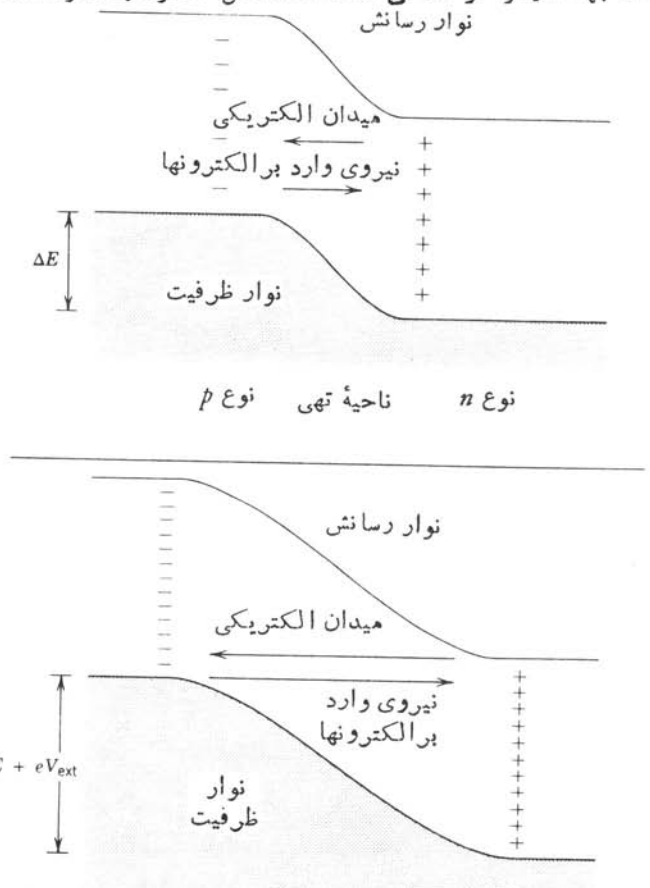
با تماس مواد نوع n و نوع p با یکدیگر، الکترونها از طریق پخش درپیوندگاه از مادهٔ نوع n به مـادهٔ نوع p نفوذ می‌کنند و در مجاورت پیوندگاه با حفره‌ها ترکیب می‌شوند. بدین‌ترتیب حاملین بار خنثی می‌شوند، و نـاحیه‌ای به‌نام ناحیهٔ تهی به‌وجـود می‌آید. پخش الکترونهـا از ناحیهٔ نوع n جایگاههـای بخشندهٔ ثابت و یونیده برجای



شکل ۱۹.۷ (بالا) با جایگـزین شدن یك اتم ۵ ظرفیتی در بلور Ge یا Si، یك الکترون اضافی کـه در پیوند کووالانی شرکت ندارد به‌آسانی به نوار رسانش برانگیخته می‌شود. این اتمها حالتهای بخشنده را درست درزیر نوار رسانش به‌وجود می‌آورند. ماده‌ای که با ناخالصی ۵ ظرفیتی آلاییده شده است به‌صورت نیمرسانای نوع n درمی‌آید. (پایین) با استفاده از یك اتم ۳ ظرفیتی به‌عنوان آلاینده، یك‌جای خالی یا حفره تشکیل می‌شود که می‌تواند به‌آسانی یك الکترون از نوارظرفیت را بپذیرد. حفره می‌تواند در ماده‌ای که نیمرسانای نوع p است، حرکت کند.

می‌گذارد، درحالی‌که پخش حفره‌ها از ناحیهٔ نـوع p جایگاههای پذیرندهٔ ثابت با بار منفی باقی می‌گذارد. فضای بار ناشی از جایگاههای ثابت، میدانی الکتریکی به‌وجـود می‌آورد که درنهایت از مهاجرتهای بیشتر جلوگیری می‌کند. نتیجهٔ این‌ترکیب، تولیدیك دیود پیوندی مطابق شکل ۲۰.۷ است.

اگر تابش هسته‌ای وارد نـاحیهٔ تهی شود و زوج الکترون ـ حفره به وجود آورد، نتیجه بسیار شبیه همان فرایندی است کـه در یك اتاقك یونش اتفاق می‌افتد (در حقیقت، ناحیهٔ تهی کاملا شبیه یك خازن با صفحات مـوازی عمل می‌کند). الکترونها در یك جهت و حفره‌ها در جهت دیگر حرکت می‌کنند، و تعداد کل الکترونهای گردآوری شده یك تپ



شکل ۲۰.۷ (بالا) با تماس مواد نوع n و نوع p، الکترونها و حفره‌هـای نزدیك پیوندگـاه می‌توانند باهم ترکیب شوند و یك ناحیهٔ تهی ازحاملین بار را به وجود آورند. (پایین) تحت بایاس معکوس (وقتی قطب منفی یك باتری خارجی به‌قسمت نوع p متصل شود)، نـاحیهٔ تهی بزرگتر می‌شود واندازهٔ میدان الکتریکی افزایش می‌یابد.

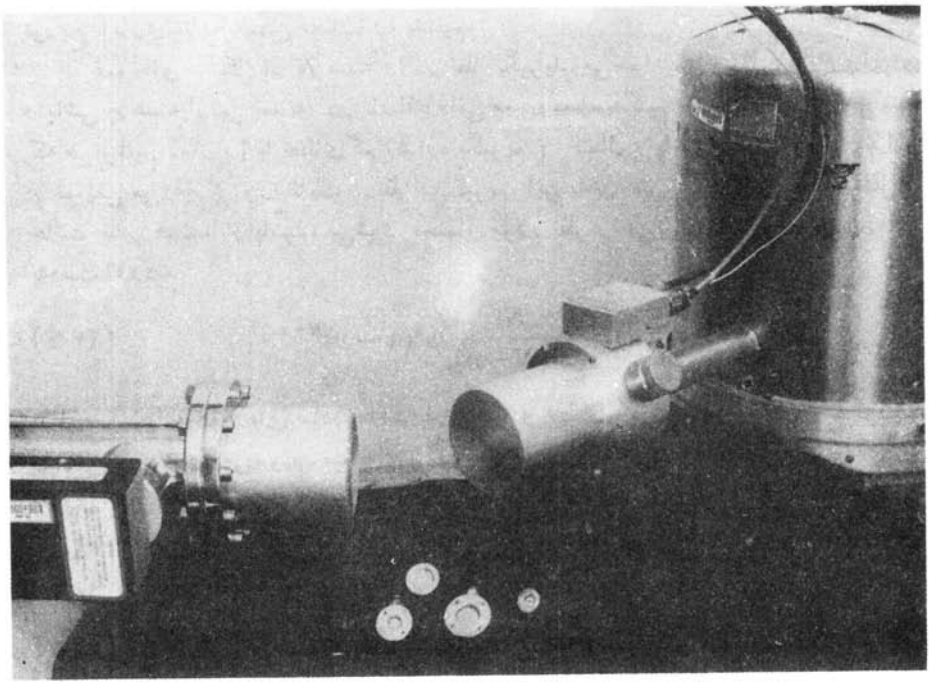
الکترونیکی تولید می‌کند که دامنهٔ آن با انرژی تابش متناسب است.

درعمل، این آشکارسازها با بایاس معکوس ولتاژهای بسیار زیاد (۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰V) کار می‌کنند که دارای دو اثر است: مقدار میدان الکتریکی را درناحیهٔ تهی افزایش می‌دهد وبازدهٔ گردآوری بار را بهبود می‌بخشد؛ وبه‌علاوه با راندن حاملین بار وسوق آنها از یك طرف پیوندگاه به‌طرف دیگر ابعاد ناحیهٔ تهی را زیاد می‌کند (و در نتیجه حجم حساس آشکارساز را افزایش می‌دهد).

دریکی از روشهای رایج ساخت آشکارسازهای Ge و Si از یك‌مادهٔ نوع p شروع می‌کنند ومقداری از اتمهای Li را ازطریق پخش در سطح آن وارد می‌کنند، بدین‌ترتیب با تشکیل حالتهای بخشنده یك ناحیهٔ نازك نوع n درآن‌ایجاد می‌شود. با بایاس معکوس وباافزایش اندك دما، اتمهای Li به‌ناحیهٔ نوع p رانده می‌شوند وناحیهٔ تهی نسبتاً بزرگی را به وجود می‌آورند. این آشکارسازها را آشکارسازهای Ge و Si با لیتیم نفوذی یا آشکارسازهای Ge(Li) و Si(Li) می‌خوانند (که «جلی» و «سیلی» تلفظ می‌شوند). پس از نفوذ Li، آشکارساز Ge(Li) باید سرد نگه‌داشته شود (معمولا در دمای نیتروژن‌مایع، یعنی ۷۷K)؛ درغیراین‌صورت Li ازجایگاه شبکه‌ای خود درناحیهٔ تهی مهاجرت‌می‌کند و خاصیت آشکارسازی از بین می‌رود. سرد نگه‌داشتن آشکارساز، برانگیختگی گرمایی الکترونها و عبورآنها را از گاف انرژی کاهش می‌دهد، ودرنتیجه از نوفهٔ الکتریکی‌زمینهٔ آشکارساز کاسته می‌شود. اخیراً، به‌علت پیشرفت‌روشهای پالایش بلورهای Ge، آشکارسازهای Ge با حجم بزرگ و خلوص زیاد در دسترس قرار گرفته‌اندکه نیازی به‌نگهداری در دمای ۷۷K ندارند، ولی برای پایین نگه‌داشتن سطح نوفه در این دما کار می‌کنند. چند نمونه از آشکارسازهای حالت جامد درشکل ۲۱.۷ نشان داده شده‌اند.

ضخامت‌لایهٔ نوع n درآشکارسازهای Ge(Li) و Si(Li) درحدود ۱ mm است، که پرتوهای گاما باانرژی متوسط به‌سهولت درآن‌نفوذ می‌کنند (برد یك‌فوتون ۱۰۰keV در Ge درحدود ۴ mm ودر Si در حدود ۲cm است). اما، برد ذرات باردار خیلی کمتر است (برد الکترون ۱ MeV در Si و Ge درحدود ۱ mm، برد ذرات آلفای با انرژی ۵ MeV در Ge و Si درحدود ۰٫۰۲ mm است)، وچنین‌لایه‌ای مانع ازرسیدن ذرات به‌ناحیهٔ تهی می‌شود. انتخاب مناسب برای ذرات باردار، استفاده از آشکارساز سد سطحی است، که درآن لایهٔ بسیار نازکی از نوع p برسطح Si نوع n حکاکی یا نشانده می‌شود. سپس یك لایهٔ نازك طلا از طریق تبخیر بر سطح فوقانی آن نشانده می‌شود تا به عنوان یك اتصال الکتریکی عمل کند. دراین‌صورت، کل ضخامتی که ذره برای رسیدن به‌ناحیهٔ تهی باید ازآن عبورکند درحدود ۰٫۱ μm است.

زمان گردآوری بار در یك آشکارساز با حجم بزرگ درگسترهٔ ۱۰ تا ۱۰۰ ns قرار می‌گیرد، واین‌تغییرات زمان به‌شکل هندسی آشکارساز (تخت یا استوانه‌ای) و محل ورود تابش نسبت به‌الکترودها بستگی دارد.



شکل ۲۱.۷ چهار اندازهٔ مختلف آشکارسازهای سیلیسیم سد سطحی در قسمت جلو نشان داده شده‌اند. دو آشکارساز بزرگ گاما از نوع Ge در زمپاهای آلومینیمی به‌اندازهٔ تقریبی 8 cm قرار دارند؛ آشکارسازها استوانه‌هایی به‌طول و قطر 4cm هستند. هر آشکارساز روی یك میلهٔ مسی نصب می‌شود که این میله با محفظهٔ نیتروژن مایع (در طرف راست شکل) در تماس گرمایی است جعبه‌های کوچکی که به‌موازات زمپاها سوار شده‌اند، تقویت کنندهٔ اولیه‌اند.

۵.۷ آمار شمارش

در کلیهٔ اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی منابع عدم قطعیت یا خطا وجود دارد. برخی از این عدم قطعیتها از خصوصیات دستگاه اندازه‌گیری ناشی می‌شود (مانند وقتی که با استفاده از خط کشی که برحسب میلی‌متر مدرج شده است، می‌خواهیم کسری از میلی‌متر را براورد کنیم). منشأ دستهٔ دیگر، که عدم قطعیت واپاشی رادیواکتیو نمونهٔ آن است، به تغییرات آماری ذاتی فرایندی مربوط می‌شود که وقوع آن اساساً کاتوره‌ای است. اگر تنها یك اندازه‌گیری از پدیده‌ای که تابع فرایند آماری و کاتوره‌ای است انجام دهیم، نتیجهٔ اندازه‌گیری تنها درصورتی مفید است که بتوانیم به‌دو سؤال زیر پاسخ دهیم: (۱) این اندازه‌گیری تا چه اندازه نتیجهٔ اندازه‌گیریهای آتی را پیش‌بینی می‌کند؟ (۲) نتیجهٔ یك اندازه‌گیری منفرد تا چه‌اندازه می‌تواند به‌مقدار «حقیقی» نزدیك باشد؟ برای پاسخ به‌این پرسشها، باید

توزیع آماری نتایج ممکن مختلف را بدانیم.

نمونه‌ای متشکل از N هسته را در نظر بگیرید. می‌خواهیم احتمال $P(n)$ را برای واپاشی n هسته ازاین نمونه، در فاصلهٔ زمانی معین، محاسبه کنیم. (دراینجا فرض می‌کنیم که می‌توانیم زمان را با خطای کم اندازه بگیریم.) احتمال واپاشی یك هستهٔ منفرد را با p نمایش می‌دهیم و آن‌را ثابت درنظر می‌گیریم. این بدان معنی است که هرهسته مستقل‌از حالت سایر هسته‌ها واپاشیده می‌شود. احتمال مورد نظر را می‌توان از توزیع دوجمله‌ای به‌دست آورد

$$P(n)=\frac{N!}{n!(N-n)!}p^n(1-p)^{N-n} \qquad (۲۴.۷)$$

درآزمـایشهای کاتوره‌ای ساده، مانند بازی شیر و خط یا ریختن تاس، اغلب بـا توزیع دوجمله‌ای روبه‌رو می‌شویم. نمونه‌ای ازاین‌توزیع را درشکل۲۲.۷ که بامقدارمیانگین $\bar{n}$ مساوی pN (همان‌طورکه انتظار می‌رود، با ضرب کردن احتمال واپاشی هرهسته درتعداد کل هسته‌های موجود، تعداد واپاشیها قابل‌محاسبه است) و نیز تعداد واریانس σ^2 مشخص می‌شود، نشان‌داده‌ایم

$$\bar{n}\equiv\sum_{n=0}^{N}nP(n)=pN \qquad (۲۵.۷)$$

$$\sigma^2\equiv\sum_{n=0}^{N}(n-\bar{n})^2P(n)=\bar{n}(1-p) \qquad (۲۶.۷)$$

انحراف معیار σ اندازهٔ تقریبی «پهنای» توزیع آماری را به‌دست می‌دهد.

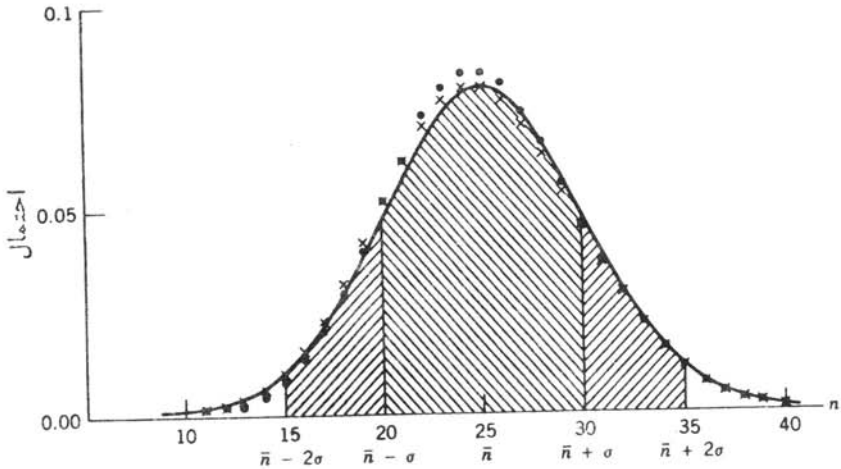
وقتی n و N کوچك‌اند، توزیع دوجمله‌ای استفادهٔ چندانی ندارد. ولی هنگامی که n و N خیلی بزرگ باشند (فرایندهای واپاشی را می‌توان نوعاً در این دسته قرار داد)، سودمندی این توزیع کم و انجام محاسبات مشکل می‌شود. تقریب کم دردسرتر برای این توزیع، هنگامی به‌دست می‌آید که $p\ll 1$ باشد (که معمولا درمورد واپاشی رادیواکتیو صادق است).

$$P(n)=\frac{\bar{n}^n e^{-\bar{n}}}{n!} \qquad (۲۷.۷)$$

که در آن $\bar{n}=pN$ است. این توزیع را توزیع پواسون می‌گویند. توجه کنید که احتمال مشاهدهٔ n واپـاشی فقط تابع میانگین $\bar{n}$ است. برای این‌توزیع $\sigma=\sqrt{\bar{n}}$ است.

یك تقریب مفید دیگر دراین مورد وقتی به‌دست می‌آید که p کـوچك و $\bar{n}$ بزرگ ($\bar{n}\gg 1$) باشد. دراین‌صورت می‌توان از توزیع بهنجار یا گاؤسی استفاده کرد

$$P(n)=\frac{1}{\sqrt{4\pi\bar{n}}}e^{-(n-\bar{n})^2/2\bar{n}} \qquad (۲۸.۷)$$



شکل ۲۲.۷ مقایسهٔ توزیعهای دوجمله‌ای (●)، پواسون (×)، و گاؤسی (—) برای $\bar{n}=۲۵$. تقریب استفاده از توزیع گاؤسی با افزایش $\bar{n}$ بهتر می‌شود. سطح زیر منحنی توزیع گاؤسی بین $\bar{n}-\sigma$ و $\bar{n}+\sigma$ برابر ۶۸٪ سطح کل زیر منحنی است؛ بنابراین احتمال قرارگرفتن هر اندازه‌گیری منفرد، در فاصلهٔ $\pm\sigma$ از میانگین حقیقی $\bar{n}$ برابر ۶۸٪ است. سطح بین حدود $\bar{n}\pm۲\sigma$ برابر ۹۵٪ سطح کل است.

که دراین حالت هم $\sigma=\sqrt{\bar{n}}$ است.

دراکثر موارد عملی، می‌توانیم برای تحلیل آماری از توزیع گاؤسی استفاده کنیم. همان‌طور که در شکل ۲۲.۷ نشان‌داده شده است، توزیع گاؤسی دارای این خصوصیت است که ۶۸٪ احتمال در فاصلهٔ $\pm\sigma$ از مقدار میانگین $\bar{n}$ قرار می‌گیرد. متأسفانه مقدار میانگین $\bar{n}$ را نمی‌توان با اندازه‌گیری به‌دست‌آورد؛ این مقدار فقط با انجام بی‌نهایت آزمون قابل‌حصول است. بدیهی است که دراینجا مقدار «حقیقی» را که درجستجوی آن هستیم با $\bar{n}$ نشان‌داده‌ایم، ویك اندازه‌گیری منفرد بااحتمال ۶۸٪ شانس قرارگرفتن در فاصلهٔ $\pm\sigma$ از $\bar{n}$ را دارد. بنابراین، n را بهترین براورد $\bar{n}$ درنظر می‌گیریم و حد خطای n را به‌صورت $\pm\sigma$ یا $\pm\sqrt{\bar{n}}$ نشان می‌دهیم.

اگر اندازه‌گیریها را به‌دفعات تکرارکنیم، می‌توانیم یك نمودار ستونی به‌دست آوریم که به‌توزیع گاؤسی نزدیك است، وخطای نسبی هربار کاهش می‌یابد. اگر m اندازه‌گیری مستقل انجام‌دهیم وتعداد کل M شمارش را ثبت‌کنیم $(M=\sum_{i=۱}^{m}n_i)$. دراین‌صورت، داریم

$$\sigma_M=\sqrt{\sum_{i=۱}^{m}\sigma_i^{۲}}=\sqrt{\sum n_i}=\sqrt{M} \qquad (۲۹.۷)$$

$$\bar{n}=\frac{M}{m}$$

$$\sigma_{\bar{n}}=\frac{\sigma_M}{m}=\frac{\sqrt{M}}{m}=\sqrt{\frac{\bar{n}}{m}} \qquad (۳۰.۷)$$

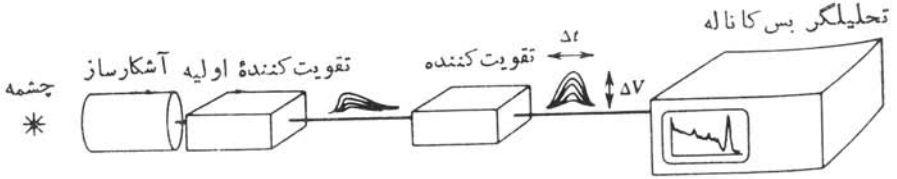
بدین‌سان، انحراف استاندارد (یا مقدار خطای) بهترین براورد مقدار حقیقی $\bar{n}$ با ضریب $1/\sqrt{m}$ کاهش یافته است. هر اندازه‌گیری مستقل دیگری که متعاقباً انجام شود، خطای میانگین را تقلیل می‌دهد.

کمیتی که از یك توزیع آماری کاتوره‌ای از این نوع پیروی کند (احتمال هر واقعه کم ومستقل از سایر وقایع، تعداد وقایع مشاهده شده زیاد)، دارای این‌خصوصیت بنیادی است که عدم‌قطعیت انتظاری‌درنتیجهٔ مشاهدات را می‌توان به‌صورت جذرتعداد مشاهدات براوردکرد. این مطلب نه‌فقط در مورد شمارشهای یك آشکارساز از واپاشی رادیواکتیو، بلکه در مورد تولید یونش درخودآشکارساز نیز صادق‌است. چنانکه دربخش بعد خواهیم دید، تفکیك انرژی یك آشکارساز با جذر تعداد وقایع یونشی مشخص می‌شود.

بالاخره، باید همواره به‌این‌نکته توجه داشت که رابطهٔ جذر فقط برای‌تعداد وقایع خام به‌کار می‌رود، ودرموردکمیتهای محاسبه‌شده مانندآهنگ شمارش یا اختلاف تعداد شمارشها به کار نمی‌رود. یعنی اگر آشکارساز تعداد N شمارش را در زمان t ثبت کند، آهنگ‌شمارش برابر N/t و عدم قطعیت آن برابر $N^{1/2}/t$ می‌شود. اگر بخواهیم زمینهٔ B را از شمارش N کم کنیم، با توجه به‌قوانین عادی جمع خطاها، عدم‌قطعیت در تفاضل $N-B$ برابر $(N+B)^{1/2}$ است.

۶.۷ اندازه‌گیری انرژی

نمودار ساده‌ای از دستگاهی را که می‌تواند برای اندازه‌گیری انرژی تابشهای هسته‌ای مورد استفاده قرارگیرد، در شکل ۲۳.۷ نشان‌داده‌ایم. معمولا سیگنال الکترونیکی حاصل از آشکارساز هسته‌ای مستقیماً به‌تقویت‌کنندهٔ اولیه می‌رود، و در آن تپ بار آشکارساز به‌تپ ولتاژ تبدیل می‌شود (مثلا، با پرشدن یك‌خازن) و سپس این تپ به‌قسمت بعدی‌مدار فرستاده می‌شود. دستگاه تقویت‌کننده با تأمین بهرهٔ ولتاژ، تپ حاصل از تقویت‌کنندهٔ اولیه را به حدود چند ولت می‌رساند و بدین‌ترتیب پردازش آن را به‌سهولت امکان‌پذیر می‌سازد. تقویت‌کننده باید خطی باشد تا تناسب بین انرژی تابش و ارتفاع تپ حفظ شود. تپهای با ارتفاع مختلف راکه در فرایند واپاشی پیچیده تولید شده‌اند می‌توان به‌سهولت توسط یك تحلیلگر بس‌کاناله (MCA) به‌صورت نمودار ستونی نشان‌داد که درآن محور افقی نمایندهٔ ارتفاع تپ ومحور عمودی نمودار تعداد تپهاست. تپهای‌ورودی به‌صورت رقمی در می‌آیند، ارتفاع رقمی تپ در حافظه‌ای به نام کانال ذخیره می‌شود؛



شکل ۲۳.۷ نمودار ساده‌ای از دستگاه الکترونیکی که می‌توان آن‌را در اندازه‌گیری انرژی تابشهای حاصل از یك چشمه به‌کار بـرد. تپهای بین تقویت‌کنندهٔ اولیه و تقویت‌کننده عموماً دارای زمان صعود کوتاه (ns) و زمان نزول طولانی (ms) ودامنه‌ای درحدود میلی‌ولت هستند. تپهای خارج شده از تقویت‌کننده متقارن‌ترند و پهنای Δt آنها درحدود μs و ارتفاع تپ ΔV آنها در حدود چند ولت است. در صفحهٔ نمایش تحلیلگر بس‌کاناله ΔV در امتداد محور افقی قرار می‌گیرد.

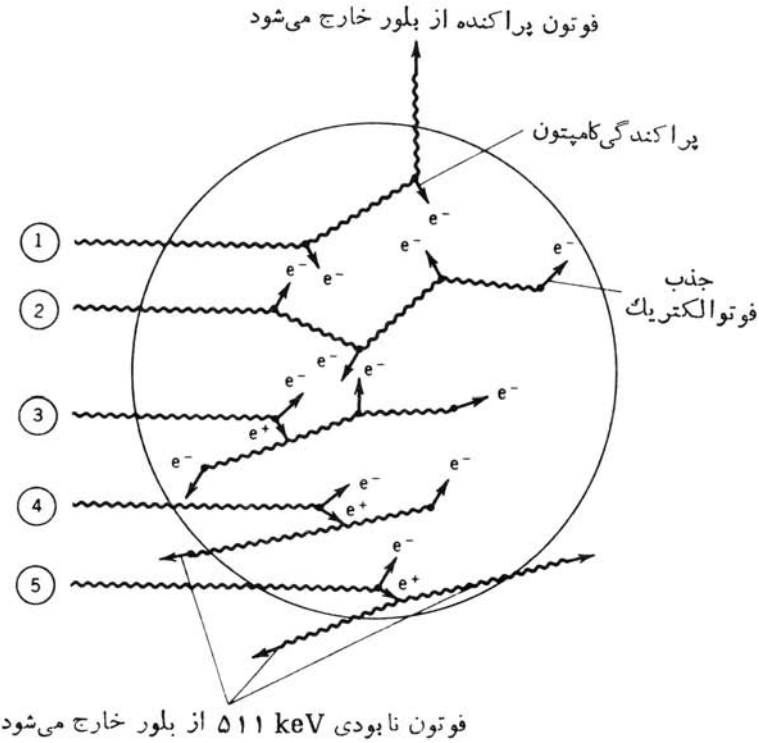
وازهمین‌روست که محورافقی‌را غالباً به‌صورت شمارهٔ کانال مشخص‌می‌کنند. طیف‌ارتفاع تپ را می‌توان برای تعیین انرژی تابشهای‌گسیل شده از چشمه (با توجه به‌محل آنها در روی محورافقی) وشدت‌نسبی‌آنها (از سطح زیر قله‌های مختلف طیف) به‌کاربرد. این‌عمل غالباً برای تابش γ انجام می‌شود، که‌اکنون با تفصیل‌بیشتر دربارهٔ‌آن بحث خواهیم‌کرد.

درشکل ۲۴.۷ فرایندهایی نشان‌داده شده‌است که ممکن است‌دراثر ورود یك‌فوتون γ به‌یك آشکارساز جامد رخ دهند. فوتون می‌تواند چند بار دراثر پدیدهٔ کامپتون پراکنده شود؛ پس ازهرپراکندگی، فوتون قسمتی از انرژی خود را ازدست می‌دهد ویك‌الکترون آزاد تولید می‌شود. به‌تدریج فوتون با یکی از دو سرنوشت زیر روبه‌رو خواهد شد: یا پراکندگی کامپتون ادامه می‌یابد و درنهایت انرژی فـوتون به‌قدری‌کم می‌شود که در اثر جذب‌فوتوالکتریك‌ناپدید می‌شود، ویاآن‌قدربه‌لبهٔ بلورنزدیك‌می‌شود که دراثر پراکندگی ازآن خارج می‌شود. انرژی فـوتـون به‌صورت انرژی الکترونهـا درمی‌آید (انرژی فوتوالکترونها یا الکترونهای پراکنده شده از پدیدهٔ کامپتون). این الکترونها بردشان در بلور بسیارکوتاه است ودرنتیجه انرژی خود را به‌سرعت، با خلق فوتونهای نـوری در سوسوزن و یا تولید زوج الکتـرون ـ حفره در آشکارساز نیمـرسانا، از دست می‌دهند. بدین‌ترتیب می‌توان فرض‌کرد که تمام این انرژی‌جذب می‌شود، وماازاین‌کمیت‌به‌عنوان انرژی به‌جا مانده از فوتون اولیه درآشکارساز یاد خواهیم‌کرد. اگر سرنوشت فـوتون اولیه جذب فوتوالکتریك باشد، انرژی به‌جامانده با انرژی پرتو اولیهٔ گاما برابر است. اگـر فوتون به خارج از بلور پـراکنده شود، انرژی به‌جا مانده از انرژی فوتون اولیه کمتر است.

حال‌مقدار انرژی الکترون پراکنده را درفرایندکامپتون موردبررسی قرار می‌دهیم. از معادلهٔ (۱۵.۷) انرژی جنبشی الکترون را به‌دست می‌آوریم

$$T_e = E_\gamma - E'_\gamma = \frac{E_\gamma^2(1-\cos\theta)}{mc^2 + E_\gamma(1-\cos\theta)} \qquad (۳۱.۷)$$

از آنجا که پراکندگی در کلیهٔ زوایا امکان‌پذیر است، انرژی‌الکترون پراکنده در گسترهٔ ۰ برای $\theta = 0^\circ$ تا $2E_\gamma^2/(mc^2+2E_\gamma)$ برای $\theta = 180^\circ$ قرار می‌گیرد. این‌الکترونها معمولا به‌طور کامل جذب آشکارساز می‌شوند، و (درصورت فرار فوتون پراکنده) سهم آنها در پاسخ انرژی‌آشکارساز به‌صورت طیف پیوسته‌ای‌است که پیوستار کامپتون خوانده می‌شود ومحدودهٔ آن از انرژی صفر تا یك انرژی بیشینه است که‌آن را لبهٔ کامپتون می‌گویند. (این



شکل ۲۴.۷ فرایندهایی که درآشکارسازی پرتو گاما رخ می‌دهند. (۱) فوتون پس از چند پراکندگی کامپتون آشکارساز را قبل از به‌جا گذاشتن همهٔ انرژی خود ترك می‌کند. (۲) پس از چند پراکندگی کامپتون، جذب فوتوالکتریك صورت می‌گیرد وتمام انرژی پرتو گاما در بلور به‌جا می‌ماند. (۳) به‌ترتیب فرایندهای تولید زوج، نابودی پوزیترون، پراکندگی کامپتون، و جذب فوتوالکتریك صورت می‌گیرند، و در نتیجه در این حالت هم تمام انرژی پرتوگاما دربلور به‌جا می‌ماند. (۴) یکی از فوتونهای نابودی آشکارساز را ترك می‌کند، و پرتوگاما انرژی‌کامل منهای ۵۱۱keV را به‌جا می‌گذارد. (۵) هردوفوتون حاصل از نابودی آشکارساز را ترك می‌کنند، درنتیجه انرژی به‌جامانده برابر انرژی‌کل منهای ۱۰۲۲ keV است.فرایندهای (۴) و(۵) درصورتی رخ‌می‌دهندکه‌انرژی پرتوگاما بیش‌از۱۰۲۲ keV باشد.

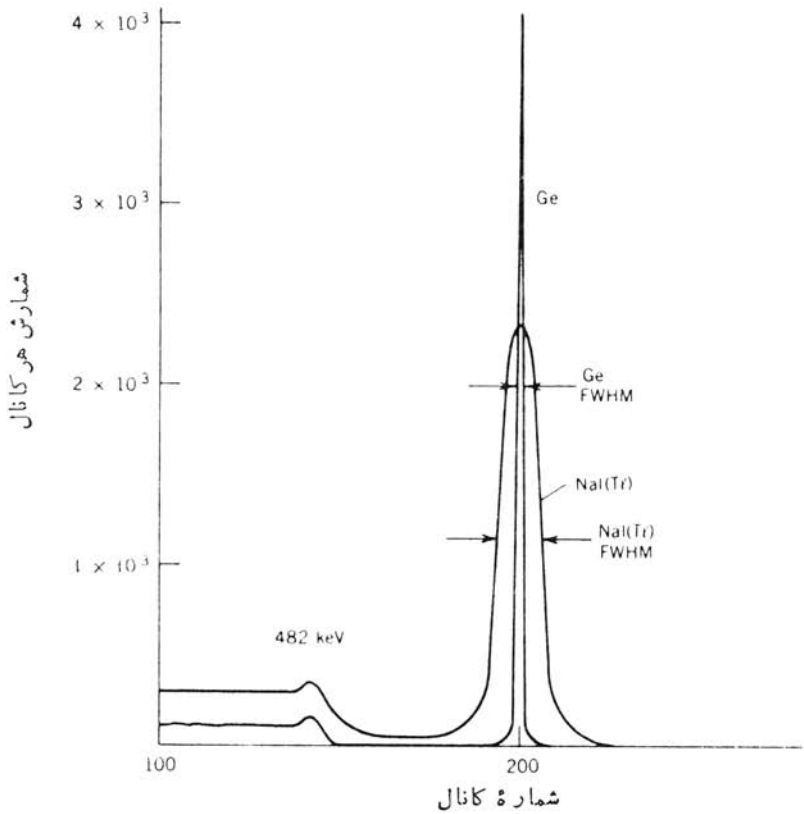
قسمت پیوستار طیف به‌صورت منحنی تخت نیست؛ فرمول کلاین - نیشینا یا معادلهٔ (۱۶.۷) چگـونگی تغییرات احتمال پراکندگی را برحسب زاویه نشان می‌دهد.) قلـهٔ با انرژی $E = E_\gamma$ که باجذب کامل فوتوالکتریك متناظر است (وقلهٔ انرژی کامل یا فوتوپیك خوانده می‌شود) و پیوستار کامپتون را ازشکل ۲۵.۷ نشان‌داده‌ایم.

تاکنون سومین فرایند برهم‌کنش پرتو گاما باآشکارساز یعنی تولید زوج رانادیده می‌گرفتیم. پوزیترون والکترون، مطابق معادلهٔ (۱۸.۷)، با انرژی‌جنبشی کل $E_\gamma - 2mc^2$ به‌وجود می‌آیند، وجذب این‌انرژی درآشکارساز سبب‌ایجاد قله‌ای با انرژی‌کامل‌می‌شود. اما، با کند شدن پوزیترون و رسیدن آن به حدود انرژیهای الکترونهـای اتمی، نابودی صورت می‌گیرد که‌طی آن پوزیترون والکترون اتمی‌ناپدید می‌شوند و به‌جای آنها دوفوتون با انرژی mc^2 یا ۵۱۱keV به‌وجود می‌آیند. این دوفوتون می‌توانند بدون برهم‌کنش‌از آشکارساز خارج شوند، یا دراثر فرایندهای پراکندگی کامپتون، قسمتی از انرژی یا همهٔ آن را از دست بدهند. بنابرایـن انتظار داریم کـه قله‌هـایی را در $E_\gamma - 2mc^2$ (وقتی هردو فوتون فرارکنند)، در $E_\gamma - mc^2$ (وقتی یکی فرارکند ودیگری‌کاملا جذب شود)؛ و در E_γ (وقتی هر دوفوتون به‌طورکامل جذب شوند)، مشاهده‌کنیم. این‌قله‌های تك‌فراری و دوفراری درشکل ۲۵.۷ نشان‌داده شده‌اند.

شکل ۲۵.۷ نمونهٔ پاسخ یك‌آشکارساز به پرتوهای گامای تك‌انرژی. فوتوپیك ناشی از جذب کامل انرژی پرتو گاما در آشکارساز، متناظر با وقـایع ۲ و۳ در شکل ۲۴.۷ است. پیوستار کامپتون از وقایع نوع ۱ تشکیل شده است، در حـالی که قله‌های تك فراری و دو فراری از فرایندهای ۴ و۵ ناشی می‌شوند. تفکیك انرژی آشکارساز می‌تواند قله‌ها را ازآنچه در این شکل نشان‌داده شده‌است پهن‌تر کند، وپراکندگی چندگـانهٔ کامپتون فاصلهٔ بین لبهٔ کامپتون و فوتوپیك را پر می‌کند. قله‌هـای فرار فقط وقتی‌که انرژی پرتو گاما بیش از ۱٫۰۲۲MeV باشد، ظاهر می‌شوند.

دامنه‌های نسبی فوتوپیك، پیوستار کامپتون، وقله‌های فرار به‌اندازه وشکل آشکارساز بستگی دارند. به‌طور کلی، هرچه آشکارساز بزرگتر باشد، پیوستار کامپتون نسبت به‌فوتوپیك کوچکتر خواهد بود، زیرا احتمال آنکه فوتون پراکنده بتواند بدون برهم‌کنش مجدد تا سطح آشکارساز پیش برود کاهش می‌یابد. به‌همین‌ترتیب، در یك آشکارساز بزرگ، احتمال گیراندازی یك یا هردو فوتون ۵۱۱ keV ناشی از نابودی هم بیشتر می‌شود.

شکل ۲۶.۷ طیفهای توزیع ارتفاع تپ حاصل از MCA راکه برای واپاشی ^{137}Cs وبه‌کمك آشکارسازهای Ge و NaI(Tl) به‌دست آمده‌اند نشان می‌دهد. فقط یك پرتو منفرد گاما با انرژی ۶۶۲ keV دراین واپاشی گسیل می‌شود. پیوستار و لبهٔ کامپتون دراین‌طیفها به‌سهولت قابل‌مشاهده‌اند. «درهٔ» موجود بین لبهٔ کامپتون وفوتوپیك کاملا به‌صفر



شکل ۲۶.۷ مقایسهٔ طیفهای حاصل از چشمهٔ ^{137}Cs در آشکارسازهای NaI(Tl) و Ge(Li). انرژی فوتوپیك برابر ۶۶۲ keV است. توان تفکیك (FWHM) آشکارساز NaI(Tl) در حدود ۴۰ keV است، درحالی‌که برای Ge درحدود ۱ keV است. شدت (یا مساحت زیرقله) در Ge درحدود ۱۱٪ شدت در NaI(Tl) است.

نمی‌رسد و لبهٔ کامپتون تیز نیست. در بحث قبل فرض کردیم که طیف پیوستهٔ کامپتون ناشی از یك پراکندگی منفرد است، ولی در عمل پراکندگی چندگانه تصویر سادهٔ شکل ۲۵.۷ را تغییر می‌دهد. همان‌طور که در طیف دیده می‌شود، لبهٔ کامپتون در انرژی انتظاری $E = ۴۷۸\ \mathrm{keV}$ قرار می‌گیرد.

آنچه در مقایسهٔ طیفهای حاصل از Ge و NaI(Tl) چشمگیر است، اختلاف بازدهٔ آشکارسازها (مساحت زیر منحنی فوتوپیکها) واختلاف توان تفکیك (پهنای فوتوپیك) آنهاست. بازدهٔ آشکارسازهای NaI از آشکارسازهای Ge بیشتر است، و بعلاوه قیمت آنها نیز ارزانتر است (قیمت NaI درحدود ۱/۱۰ قیمت Ge یا کمتر است) وشرایط کار با آنها هم ساده‌تر است (NaI نیازی به خنك کردن ندارد). به‌علت تقاضای کنونی طیف‌نمایی هسته‌ای برای مطالعهٔ واپاشیهای هرچه پیچیده‌تر، تفکیك اهمیت خاصی پیدا کرده است. برای مطالعهٔ دقیق این واپاشیها، باید بتوانیم انرژی و شدت کلیهٔ پرتوهای گاما را تعیین کنیم، اما اگر پهنای تمام قله‌ها به‌صورت پهنای مشخصهٔ آشکارساز NaI(Tl) باشد رسیدن به‌این‌هدف امکان‌پذیر نخواهدبود. درکارهای اولیهٔ آشکارسازهای Ge، برای آنکه به‌تفکیك خوب دسترسی پیدا کنند، باید به بازدهٔ فوق‌العاده ضعیف قناعت می‌کردند، به‌طوری که بازدهٔ این آشکارسازها فقط درحدودچنددرصد آشکارسازهای NaI(Tl) می‌شد. پیشرفت روشهای پالایش Ge، تولید آشکارسازهای با حجم بزرگ را امکان‌پذیر کرده است و بدین‌ترتیب، درحال‌حاضر بازدهٔ آنها فقط با ضریب ۲ تا ۳ کمتر از بازدهٔ NaI(Tl) است. به‌علت کوچکتر بودن عدد اتمی Ge از NaI، احتمال برهم‌کنش فوتون با آن همواره کوچکتر خواهد بود وبنابراین بازدهٔ نسبی آن نیز کمتر است. ضریب جذب فوتوالکتریك تقریباً متناسب با $Z^۴$ تغییر می‌کند.

حال دلایل توان تفکیك تجربی‌را باتوجه به آمارفرایند آشکارسازی بررسی‌می‌کنیم.

قله‌های انرژی‌کامل در هردو آشکارساز NaI(Tl) و Ge را می‌توان تقریباً باشکل گاؤسی نشان‌داد، و پهنای قله‌ها را درشکل کلی توزیع گاؤسی با پارامتر σ مشخص کرد

$$f(E) = Ae^{-(E-\bar{E})^۲/۲\sigma^۲} \qquad (۳۲.۷)$$

که درآن A ثابت بهنجارش است. دراینجا نمی‌توان از رابطهٔ بین میانگین $\bar{E}$ و σ استفاده کرد، زیرا تعداد رویدادهای معرف میانگین $\bar{n}$ را نمی‌دانیم (یادآورمی‌شویم که $\sigma = \sqrt{\bar{n}}$ فقط برای رویدادهای شمارشی به‌کار می‌رود).

عموماً پهنا را برحسب پهنای نیم‌ارتفاع (FWHM)، یعنی فاصلهٔ ΔE بین‌دونقطهٔ $E_۱$ و $E_۲$ که درآنها $f(E_۱) = f(E_۲) = A/۲$، مشخص می‌کنند که بادستکاری مختصری به‌صورت زیر درمی‌آید

$$\Delta E = ۲\sigma\sqrt{۲\ln ۲} \cong ۲٫۳۵\,\sigma \qquad (۳۳.۷)$$

اغلب پهنای نیم ارتفاع FWHM را به‌صورت $\Delta E/\bar{E}$ نشان می‌دهند.

برای براورد σ باید $\bar{n}$، یعنی تعداد رویدادهای آماری مربوط به تولید علامت آشکارساز، را براورد کنیم. انرژی پرتو گامای فرودی برابر ۶۶۲ keV است. در NaI(Tl) بازدهٔ سوسوزنی (کسری از تابش فرودی که تبدیل به نور می‌شود) درحدود ۱۳٪ است، بنابراین ۸۶ keV از انرژی فوتون در آشکارساز ظاهر می‌شود. انرژی هر فوتون در NaI در حدود ۴eV است، و بنابراین تعداد فوتونهای نور (به‌طور متوسط) درحدود ۲۱۰۰۰ است. سهم این مقدار در توان تفکیک درحدود $2{,}35\sqrt{21000}/21000$ یا حدود ۱٫۶٪ است. این تعداد در فوتوکاتد، کاهش بیشتری می‌یابد. ضریب عبور نور از انتهای شیشه‌ای لولهٔ تکثیر کننده نوعاً حدود ۸۵٪ است و بازدهٔ کوانتومی یك نمونه از فوتوکاتد (یعنی، تعداد فوتوالکترونهای گسیلی به‌ازای هر فوتون فرودی) در حدود ۲۳٪ است. بنابراین تعداد فوتوالکترونها فقط درحدود ۲۰٪ تعداد فوتونهای فرودی، یا درحدود ۴۲۰۰ است و سهم آن در تفکیك انرژی درحدود $2{,}35\sqrt{4200}/4200$ یا ۳٫۶٪ است. فرایند تکثیر الکترون در تکثیر کنندهٔ فوتونی تعداد رویدادها را افزایش می‌دهد و سهم کوچکتری در FWHM دارد. درکل فرایند آشکارسازی $NaI(Tl)$، کمترین تعداد رویدادها مربوط به تولید الکترونها در فوتوکاتد است، و بنابراین این تعداد اساسی‌ترین سهم را در تفکیك انرژی دارد.

در این محاسبهٔ ساده، تعدادی از اثرات داخل بلور، تکثیر کنندهٔ فوتونی، و تقویت کننده نادیده گرفته شده است، که تمامی آنها می‌توانند سهمهای غیر آماری در تفکیك داشته باشند. رقم ۶٪ (۴۰ keV) در ۶۶۲ keV نمونهٔ بهتری است. پهنای نیم‌ارتفاع مطلق FWHM (پهنای قلهٔ انرژی) با افزایش انرژی تقریباً به‌صورت $E^{1/2}$ افزایش می‌یابد، ولی نسبت $\Delta E/E$ به‌صورت $E^{-1/2}$ تنزل می‌یابد؛ بنابراین توان تفکیك در انرژی ۱ MeV در حدود ۵٪ (یا ۵۰ keV) است.

در آشکارساز Ge تنها یك رویداد منفرد در تعیین آمار شمارش دخالت دارد، و آن‌هم تولید زوجهای الکترون ـ حفره در اثر برهم‌کنش فوتون است. متوسط انرژی لازم برای خلق زوج الکترون-حفره برابر ۳ eV است، و بنابراین متوسط تعداد رویدادهای آماری وقتی که یك فوتون ۶۶۲ keV کاملا جذب می‌شود، درحدود ۲۲۰۰۰۰ است. دراین صورت، توان تفکیك این فوتون درحدود ۳٫۳ keV است (طبق قرارداد، تفکیك NaI برحسب درصد، و تفکیك Ge برحسب keV بیان می‌شود). به‌این‌ترتیب، توان تفکیك Ge نسبت به NaI(Tl) به‌میزانی بیش از یك مرتبهٔ بزرگی بهتر می‌شود که این تفاوت را می‌توان با توجه به‌خصوصیات جذب تابش در آشکارسازها به‌سهولت درك کرد.

در براورد توان تفکیك Ge چند عامل را نادیده گرفته‌ایم. درحقیقت جذب را نمی‌توان به‌خوبی به کمك آمار پواسون توصیف کرد؛ توجه به‌ماهیت صحیح فرایند آماری (به‌طریق تجربی) مقدار محاسبه شده را به حدود ۱٫۰ keV تقلیل می‌دهد. فرایندهای غیر آماری (گردآوری بار توسط میدان الکتریکی، نوفهٔ الکترونیکی درتقویت کنندهٔ اولیه وتقویت کننده) تاحدودی تمایل به‌افزایش این مقدار دارند. نمونه‌ای از این مقدار برای یك آشکارساز خوب امروزی برابر ۱٫۷ keV در انرژی ۱۳۳۲ keV (انرژی پرتو گامای

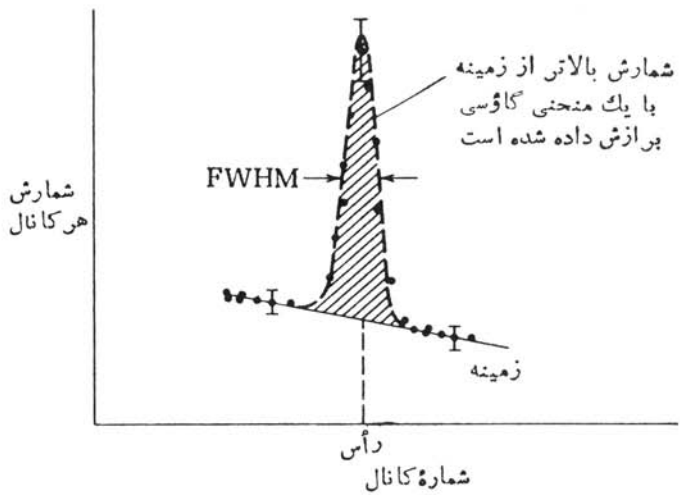
حاصل از ^{60}Co که به‌عنوان استاندارد اندازه‌گیری تفکیك درنظر گرفته می‌شود) است، که‌درصورت‌معتبر بودن‌رابطهٔ $E^{1/2}$ باتفکیك ۱٫۲ keV درانرژی ۶۶۲ keV متناظر است.

در طیف‌نمایی پرتو γ (یا سایر تابشها)، هدف معمولا تعیین انرژی و شدت تابش است. برای به‌دست‌آوردن انرژی، باید رأس قلهٔ انرژی‌را تعیین کنیم. برای‌قله‌های‌منزوی کاملا جدا از هم، رأس را می‌توان با استفاده از یك دستورالعمل سادهٔ تجربی تعیین کرد. ابتدا باید زمینه راکم کرد (قله ممکن است روی پیوستار کامپتون قله‌های پرانرژیتر قرار گرفته‌باشد.) که این‌عمل معمولا بارسم یك خط راست‌بین دوگروه ازکانالهای زمینهٔ قبل و بعد از قله انجام می‌شود (شکل ۲۷.۷). دراین‌حالت زمینه را خطی در نظر می‌گیریم، و شمارشهای زمینه را مستقیماً ازشمارش کلی چشمه و زمینه‌کم می‌کنیم. رأس قله وسطح‌زیر آن را می‌توان به‌طریق زیر تعیین کرد

$$\text{سطح} = \Sigma y_i \qquad (۳۴.۷)$$

$$\text{رأس} = \frac{\Sigma x_i y_i}{\Sigma y_i} \qquad (۳۵.۷)$$

که در آن y_i نمایندهٔ تعداد شمارش خالص بیش از زمینه درکانال i است. روش دقیقتر برازش یك تابع گاؤسی به‌قله است. این عمل را با درنظر گرفتن‌بستگی تابعی به‌صورت



شکل ۲۷.۷ مساحت سطح یك‌قلهٔ کاملا تفکیك‌شده را می‌توان ازتفاضل زمینهٔ خطی ازشمارش کل،وسپس یا با جمع‌زنی شمارشهای بالاتر اززمینه، ویا بابرازش یك تابع گاؤسی باشمارشهای بالاتر از زمینه به‌دست آورد. چون شمارش هرکانال از یك فرایند شمارش ساده حاصل می‌شود، عدم قطعیت‌آن برابر جذر شمارش کانال خواهد شد. این حکم فقط برای شمارش کل‌هرکانال صادق است، وبرای شمارش بالاتر از زمینه قابل‌استفاده نیست.

معادلهٔ (۳۲.۷) و لگاریتم‌گیری می‌توان به‌ساده‌ترین‌شکل انجام‌داد

$$\ln y_i = \ln A - \frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2} \qquad (۳۶.۷)$$

یك برازش کمترین مربعات، پارامترهای $\bar{x}$، σ، و A را به‌دست می‌دهد. با انتگرال‌گیری از شکل گاؤسی خواهیم داشت

$$\text{سطح} = \sigma A\sqrt{2\pi} \qquad (۳۷.۷)$$

درمورد طیفهای پیچیده نمی‌توان از این‌دستورالعمل ساده استفاده‌کرد. دراین گونه‌موارد، معمولا زمینه را نمی‌توان با تقریب خطی به‌خوبی نشان‌داد. قله‌های نزدیك به‌هم راکه ممکن است همپوشی داشته باشند، نمی‌توان به‌این‌طریق برازش داد. حتی فرض شکل گاؤسی‌هم همیشه معتبر نیست، زیـرا ممکن است در قسمتهای کم‌انرژی و پر انـرژی منحنی گاؤسی «دنباله‌های» نهایی وجود داشته‌باشند. دراین‌صورت، برنامه‌های برازش پیشرفته‌ای وجود دارندکـه درآنها پارامترهای مختلف از جمله رأسها وسطوح قله‌ها و زمینه‌های غیرخطی قابل براوردند.

بامعلوم‌بودن‌رأس‌وسطح‌قله، می‌توان انرژی وآهنگ‌شمارش‌تابش را به‌دست‌آورد. برای تعیین انرژی باید دستگاه MCA را مدرج‌کرد، به‌طوری‌که بتوان شمارهٔ هرکانال را به‌انرژی تبدیل‌کرد. این‌عمل معمولا با استفاده از دو یـا چند تابش با انرژی مشخص E_1 و E_2 که دارای رأسهای $\bar{x}_1$ و $\bar{x}_2$ هستند، انجام می‌گیرد. سپس می‌تـوان یك رابطهٔ خطی بین $\bar{x}$ و E به‌دست‌آورد. چون دستگاههای MCA (و سایر قسمتهای دستگـاه، از جمله آشکارساز وتقویت‌کننده) ممکن است‌کمی غیرخطی‌باشند، توصیه می‌شودکه‌انرژیهای درجه‌بندی E_1 و E_2 حتی‌الامکان نزدیك انرژی نامعلوم E انتخاب شوند. بـرای مدرج کردن دستگاه برحسب انرژی باید از دو تـابش استفاده‌کـرد، زیرا کانال صفر MCA همیشه متناظر با ارتفاع تپ صفر نیست. برخی از چشمه‌های استانـدارد مدرج‌سازی در جدول ۲.۷ نشان‌داده شده است.

برای تبدیل سطح قله به‌آهنگ شمارش مطلق، باید اطلاعاتی از بـازدهٔ‌آشکارساز داشته باشیم ــ مانند‌اینکه زاویهٔ فضایی آشکارساز ازمحل منبع تابش واحتمال جذب تابش فرودی در فوتوپیك باید معلوم باشند. بازدهٔ آشکارساز برای پرتوهای γ به‌شدت‌وابسته به‌انرژی است؛ بازدهٔ مطلق آشکارسازهای NaI(Tl) و Ge برحسب انرژی پرتو γ در شکل ۲۸.۷ نشان‌داده شده است.

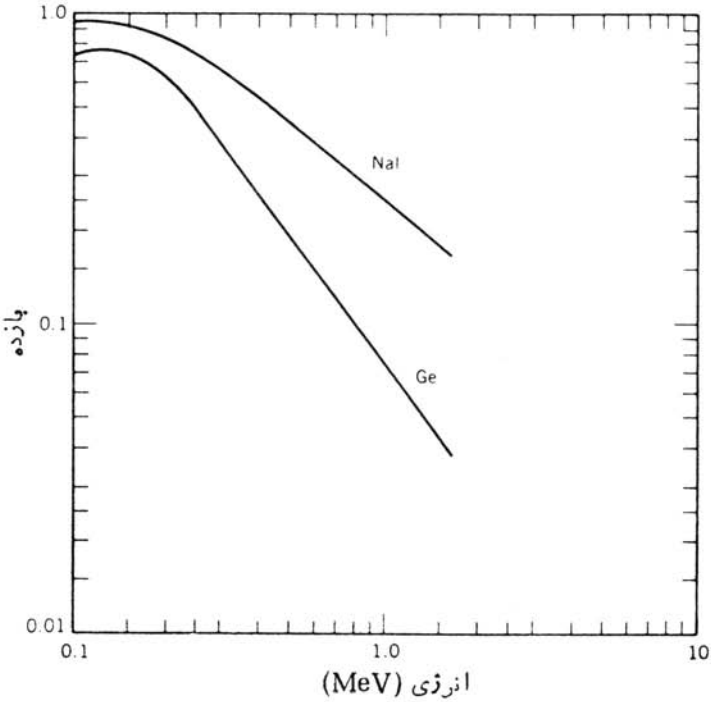
جدول ۲.۷ استانداردهای متداول مورد استفاده درمدرج کردن آشکارسازها.

نوکلید	$t_{1/2}$	تابش	انرژی (keV)
^{109}Cd	۴۵۳ d	γ	۸۸٫۰۳۷ ± ۰٫۰۰۵
^{57}Co	۲۷۱ d	γ	۱۲۲٫۰۶۱۳۵ ± ۰٫۰۰۰۰۱۳
			۱۳۶٫۴۷۴۳۴ ± ۰٫۰۰۰۰۳۰
^{198}Au	۲٫۶۹۶ d	γ	۴۱۱٫۸۰۴۴۱ ± ۰٫۰۰۰۱۵
^{137}Cs	۳۰٫۱۷ y	γ	۶۶۱٫۶۶۱ ± ۰٫۰۰۳
^{60}Co	۵٫۲۷۱ y	γ	۱۱۷۳٫۲۳۸ ± ۰٫۰۱۵
			۱۳۳۲٫۵۱۳ ± ۰٫۰۱۸
^{207}Bi	۳۸ y	e^-	۴۸۱٫۶۵ ± ۰٫۰۱
			۹۷۵٫۶۳ ± ۰٫۰۱
^{241}Am	۴۳۳ y	α	۵۴۸۵٫۷۴ ± ۰٫۱۲
^{226}Ra	۱۶۰۰ y	α	۴۷۸۴٫۵۰ ± ۰٫۲۵
			۵۴۸۹٫۶۶ ± ۰٫۳۰
			۶۰۰۲٫۵۵ ± ۰٫۰۹
			۷۶۸۷٫۰۹ ± ۰٫۰۶

۷.۷ اندازه‌گیریهای همفرودی و تفکیك زمانی

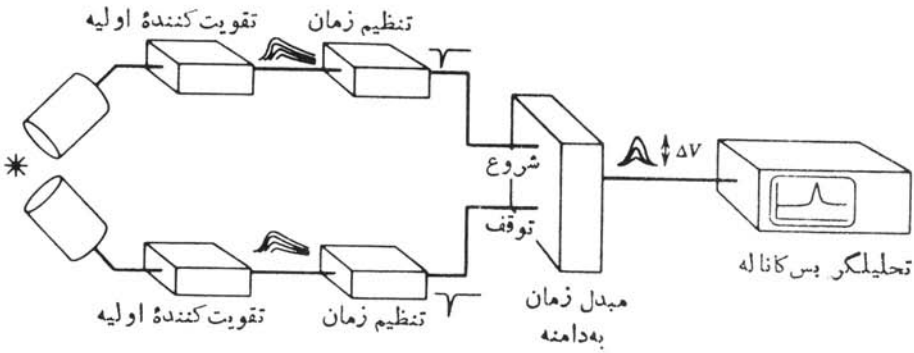
وقتی می‌خواهیم تابشهایی را که به‌طور متوالی یکی پس از دیگری گسیل می‌شوند ــ برای مثال، پرتوهای گامارا پس از یك واپاشی بتازا ــ بررسی کنیم، معمولا از دستگاهی مانند شکل ۲۹.۷ استفاده می‌کنیم. هدف اصلی این دستگاه، تعیین همفرودی زمانی واقعی تابش دوم با تابش اول است. به‌عبارت دیگر، آیا فاصلهٔ زمانی بین دو تابش به‌اندازهٔ کافی کوتاه است تا سرچشمه گرفتن آنها را از یك هسته درگسیل پیاپی توجیه کند؟ دستگاه‌مبدل زمان به‌دامنه (TAC) یك طیف زمانی از تپهای خروجی تولید می‌کند که ارتفاع آنها با تفاوت زمان ورود دو تپ ورودی متناسب است. این تفاوت زمان ورود به‌نوبهٔ خود، پس از تصحیح تأخیرهای شناخته‌شده در دستگاههای رابط و کابلهای علائم، به‌تفاوت زمان گسیل دو تابش از چشمه مرتبط می‌شود.

همفرودی زمانی دو تابش ناشی ازیك هسته را همفرودی حقیقی یا واقعی می‌نامند. راه‌اندازی مدارهای تنظیم زمان در اثر تابشهای ناشی از هسته‌های مختلف نیز امکان‌پذیر است ــ که تحقق آن همفرودی شانسی یا تصادفی ناخواسته را به‌وجود می‌آورد. اصولا، تمیز بین همفرودیهای واقعی و شانسی نسبتاً آسان است. پس از پذیرش اولین تابش در



شکل ۲۸.۷ بازدهٔ نسبی آشکارسازهای NaI و Ge. در اینجا «بازده» به‌معنی احتمال پدیدارشدن فوتون برخوردکننده باآشکارساز در فوتوپیك است. اندازه‌های مختلف آشکارساز در نظر گرفته نشده‌اند. منحنیها برای یك آشکارساز NaI(Tl) به‌قطر ۷٫۵ cm وارتفاع ۷٫۵ cm ویك آشکارساز Ge به‌قطر ۴٫۲ cm وارتفاع ۴٫۲ cm رسم شده‌اند. فاصلهٔ چشمه ازآشکارساز برابر ۱۰cm است. برای به‌دست آوردن بازدهٔ نسبی، احتمال نسبی‌ظهور فوتون ۱٫۳۳۲MeV (گسیل‌شده از ^{60}Co) درفوتوپیك Ge را، با درنظرگرفتن عامل زاویهٔ فضایی، برابر ۸٪ این مقدار در NaI(Tl) درنظر می‌گیرند.

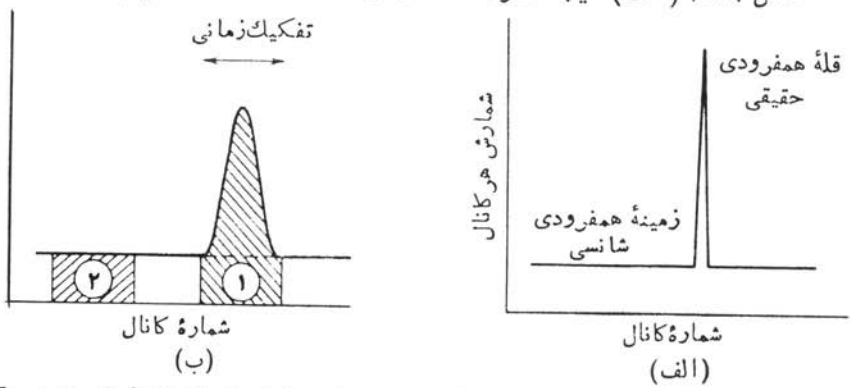
کانال شروع TAC، فقط زمان‌کوتاهی (در حدود نانوثانیه) برای ورود دومین تابش و راه‌اندازی کانال توقف صبر می‌کنیم. هرچه این زمان طولانیتر باشد، احتمال تولید یك همفرودی شانسی در اثر تابش هستهٔ دیگر بیشتر می‌شود. (در این بحث فرض می‌کنیم که فاصلهٔ‌زمانی بین‌گسیل دو تابش ازهسته ناچیز است. موردی را که این نکته درآن صادق نیست درقسمت بعد بررسی می‌کنیم.) طیف ارتفاع تپ، به‌تشخیص همفرودیهای حقیقی و شانسی فقط تاحدی‌کمك می‌کند. ارتفاعهای تپ، و در نتیجه تفاوتهای زمانی، متناظر با علائم شروع و توقف همفرودیهای حقیقی دارای ارتباط زمانی ثابت و مشخصی هستند. همفرودیهای شانسی‌که نمایندهٔ گسیل از چشمه‌های مختلف‌اند ارتباط زمانی معینی ندارند. اگرآهنگ واپاشی چشمه تغییرنکند، احتمال‌گسیل دومین تابش (ازیك‌هستهٔ‌دیگر) به‌دنبال اولین تابش در تمام لحظات یکسان خواهد بود. همفرودیهای شانسی‌گسترهٔ یکنواختی از



شکل ۲۹.۷ نمودار سادهٔ دستگاهی که برای تعیین همفرودی زمانی دو تابش حاصل از چشمه (یعنی، اینکه آیا فاصلهٔ زمانی آنها به‌اندازهٔ کافی کوتاه‌است تا سرچشمه‌گرفتن آنها را از یك هسته درگسیل پیاپی توجیه کند) به‌کار می‌رود. زمان‌خیز کوتاه علامت ناشی از هر تقویت‌کنندهٔ اولیه سبب‌راه‌اندازی یك مدار تنظیم زمان می‌شود. علائم‌سریع تنظیم زمان سبب شروع و توقف کار یك مبدل زمان به‌دامنه (TAC) می‌شودکه ارتفاع تپ خروجی ΔV آن با اختلاف زمان بین شروع وتوقف تپها متناسب است. طیف ارتفاع تپها (ودرنتیجه زمانها) را می‌توان روی MCA نمایش‌داد.

ارتفاع تپ را تولید می‌کنند، درحالی‌که همفرودیهای حقیقی ارتفاع تپ منحصر به‌فردی را به‌وجود می‌آورند. نمونه‌ای از طیف مبدل زمان به‌دامنهٔ قابل‌مشاهده روی صفحهٔ‌نمایش تحلیلگر بس‌کاناله را در شکل۳۰.۷ نشان داده‌ایم.

شکل ۳۰.۷ (الف) نتیجهٔ مورد انتظار از آشکارسازها و الکترونیك ایده‌آل را



شکل ۳۰.۷ طیف مبدل زمان به دامنه برای همفرودیهای حاصل از (الف) آشکارساز ایده‌آل و (ب) آشکارساز واقعی. ارتفاع تپ (که مشابه تمام طیفهای MCA در امتداد محور افقی، قرار می‌گیرد) تفاوت زمانی دو تپ را به‌دست می‌دهد. بی‌دقتی زمان در آشکارسازهای واقعی قلهٔ همفرودی را پهن می‌کند. مساحت زیر منحنی در ناحیهٔ ۱ مجموع همفرودیهای حقیقی و شانسی را به‌دست می‌دهد. اگر زمینه تخت باشد، ناحیهٔ ۲ همفرودیهای شانسی را نشان می‌دهد و تفاضل دو ناحیه نمایانگر همفرودیهای حقیقی است.

نشان می‌دهد که در آن علامت زمانی بی‌هیچ ابهام وعدم قطعیتی از تابش فرودی گرفته می‌شود. آشکارسازهای واقعی والکترونیك وابسته به آنها نتیجهٔ پیچیده‌تری را نشان می‌دهند (مثلا دراثر نوفهٔ الکترونیکی، ویا دراثر مشکلات ناشی از راه‌اندازی مدار تنظیم زمان با استفاده از تپ تقویت کنندهٔ اولیه). طیف زمانی حاصل از آشکارساز واقعی در شکل ۳۰.۷ (ب) نشان‌داده شده است. در این‌مورد قلهٔ تیز همفرودیهای حقیقی پهن شده است، وپهنای آن مشخصهٔ تفکیك زمانی τ آشکارساز و دستگاه الکترونیکی است. برای تعیین آهنگ گسیلهای همفرود، می‌توانیم نواحی ۱ و۲ را درشکل ۳۰.۷(ب) به‌طور الکترونیکی تعیین کنیم و بااستفاده از تفاوت سطح آنها (درصورت اطمینان از تخت‌بودن همفرودیهای شانسی) قلهٔ همفرودی حقیقی را به‌دست آوریم.

بااستفاده از این‌روش، همواره می‌توانیم همفرودیهای شانسی را تصحیح کنیم. ولی اگر آهنگ همفرودیهای شانسی بسیار بالا باشد، خطاهای آماری تولیدشده در اثر تفریق دوکمیت بزرگ وتقریباً مساوی می‌تواند منجر به‌یك آهنگ همفرودی حقیقی باخطای نسبتاً بزرگ شود. بنابراین، معمولا توصیه می‌شود که آهنگ همفرودیهای شانسی به کمترین سطح ممکن تقلیل یابد. این‌کار به‌دو طریق امکان‌پذیر است: (۱) چون آهنگ همفرودی شانسی به‌انطباق کاتوره‌ای دو تپ بستگی دارد، مقدار آن متناسب بامجذور اکتیویتهٔ چشمه افزایش می‌یابد. برای مثال، دوبرابر کردن اکتیویته، آهنگ همفرودی حقیقی را دوبرابر وآهنگ همفرودی‌شانسی‌را چهاربرابر می‌کند. بنابراین کاهش اکتیویته، آهنگ همفرودیهای شانسی‌را کم‌می‌کند. ازطرف دیگر، کاهش بیش‌از اندازهٔ آن می‌تواند آهنگ همفرودیهای حقیقی را به‌اندازه‌ای کم کند که سبب نقصان دقت آماری شود. بنابراین در تنظیم اکتیویتهٔ چشمه باید جانب اعتدال را رعایت کرد. (۲) بهینه‌سازی آشکارساز ودستگاه الکترونیکی می‌تواند تفکیك‌زمانی قلهٔ همفرودی حقیقی را در شکل ۳۰.۷(ب) کاهش‌دهد، که این‌امر به‌معنای کاهشی مشابه در همفرودیهای شانسی‌زمینه است که باید شمرده شود. تفکیك‌زمانی درنهایت به‌تأثیر نوفهٔ کاتوره‌ای در آشکارساز و دستگاه الکترونیکی و یا به‌تأثیراین نوفه در تغییرات زمان لازم برای گردآوری بار الکترونی آشکارساز، که مولد تپ تقویت کنندهٔ اولیه است، بستگی دارد. در آشکارسازهای ژرمانیم، مخصوصاً بلورهای با حجم بزرگی که درحال‌حاضر برای آشکارسازی پرتو گاما به‌کار می‌روند، زمان گردآوری بار درحجم آشکارساز می‌تواند تفکیك را به‌حدود ۱۰ns تقلیل دهد. برای آشکارسازهای کوچك NaI با تکثیرکننده‌های فوتونی سریع، مقادیر تفکیك در گسترهٔ ۱ ns است، و در سوسوزنهای پلاستیکی مقادیر کوچکتر حدود ۱۰۰ ps هم امکان‌پذیر است.

۸.۷ اندازه‌گیری طول‌عمرهای هسته‌ای

روشهای اندازه‌گیری طول‌عمرهای‌هسته‌ای به‌اندازهٔ خود این‌طول عمرها، که در گستره‌ای از 10^{15} سال برای بعضی ایزوتوپهای پرتوزای طبیعی تا کمتر از 10^{-15}s برای‌حالتهای برانگیختهٔ کم‌عمر قرارمی‌گیرند، متنوع‌اند. جستجو برای واپاشی بتازای دوگانه (فصل ۹

را ببینید) در گسترهٔ طول‌عمرهای حدود 10^{20} سال ادامه دارد، وفروپاشی هسته‌های بسیار ناپایداری مانند ^{8}Be یا ^{5}He در گسترهٔ طول‌عمرهای 10^{-16} تا 10^{-20} ثانیه اتفاق می‌افتد. دراینجا روشهای غیر متداول را برای این‌حالتهای خاص بررسی نخواهیم کرد، بلکه‌فقط چند نمونه از روشهایی را بررسی خواهیم کرد که برای اندازه‌گیری طول عمرهای‌عادی درمطالعهٔ واپاشیهای هسته‌ای به‌کار می‌روند.

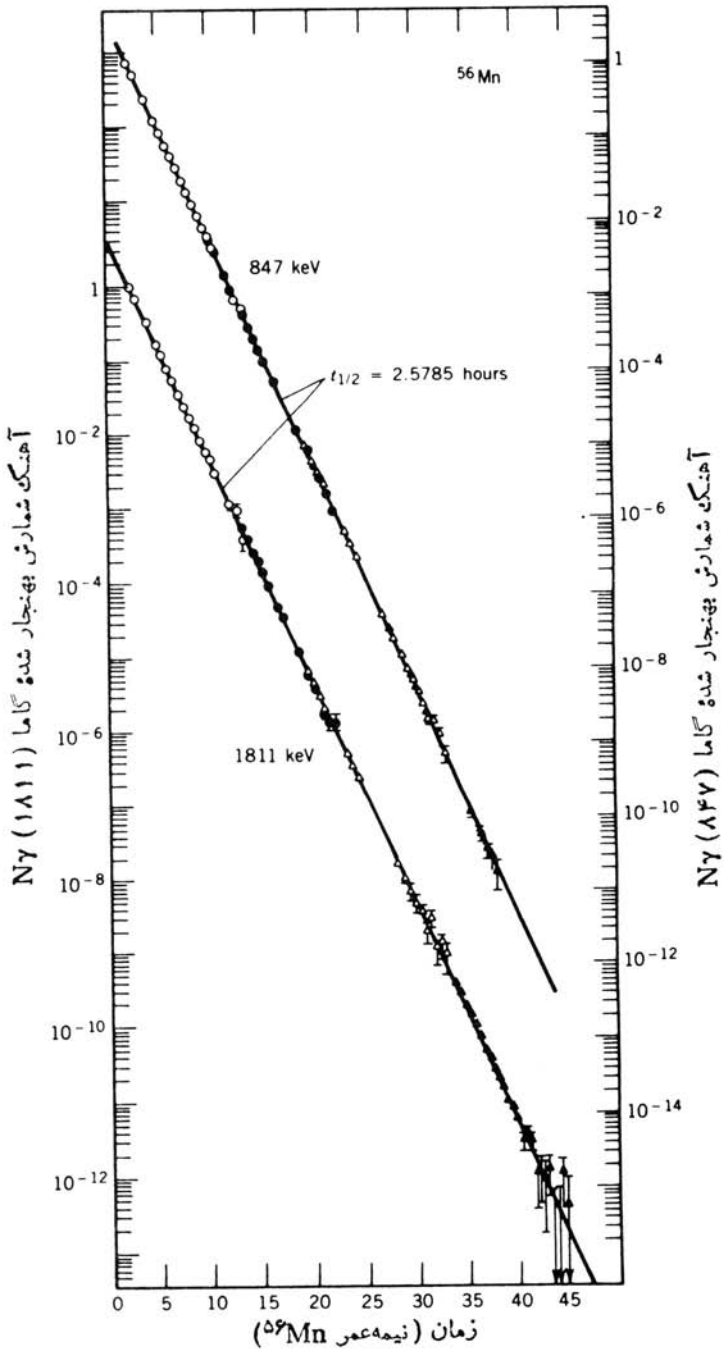
مسلماً سرراست‌ترین روش، مشاهدهٔ کاهش‌نمایی اکتیویته برحسب زمان است که در شکل ۱.۶ نشان داده شده است. رسم اکتیویتهٔ $\mathcal{A}$ بـرحسب t در مقیاس نیمه‌لگاریتمـی مستقیماً ثابت واپاشی λ ودرنتیجه نیمه‌عمررا به‌دست می‌دهد. برای‌نیمه‌عمرهای در گسترهٔ دقیقه تا ساعت، این‌روش آزمایشگاهی بسیار ساده است. می‌توانیم از تابش‌خاصی‌استفاده کنیم وشمارش در زمان معین را به‌کمك شمارنده تعیین‌کنیم. این روش را می‌توان برای نیمه‌عمرهای در گسترهٔ سال نیز به‌کاربرد، اگرچه دنبال‌کردن واپاشی برای چند نیمه‌عمر کار چندان ساده‌ای نیست. با رسیدن به نیمه عمرهای بسیار طولانیتر، این روش غیرعملی می‌شود. مثالی از این روش مستقیم درشکل ۳۱.۷ نشان‌داده شده است.

برای نیمه عمرهای بسیار طـولانی، استفاده از روش اکتیویتهٔ ویژه مناسبتر است. (اکتیویتهٔ ویژه، مقدار اکتیویتهٔ ناشی ازهرواحد ماده‌است‌که با یکایی مانندکوری بر گرم بیان می‌شود.) دراینجا می‌توان مستقیماً از رابطهٔ $\mathcal{A}=\lambda N$ استفاده‌کرد. مقدار $\mathcal{A}$ را با شمارش واپاشیهای گسیل‌شده در زمان معین و N (تعدادهسته‌های رادیواکتیو) را باروش تحلیل شیمیایی یا طیف‌سنجی جرم می‌توان تعیین‌کرد.

برای نیمه‌عمرهای کوتاهتر از دقیقه، دیگر نمی‌توان $\mathcal{A}$ را برحسب t اندازه‌گرفت. یعنی اگر واپاشی مثلا با نیمه عمر ۱۰ ثانیه انجام شود، فرصت آن‌را نخواهیم داشت‌که اطلاعات مربوط به یك نقطه را گردآوری وقبل از نابودی‌کامل نمونه شمارنده را برای شمارش‌بعدی آماده‌کنیم. دراین‌گستره، می‌توان از یکی‌از امکانات موجود درتحلیلگرهای بس‌کانال‌که شمارش چندگانه نـامیده می‌شود استفاده‌کرد. دراین روش، MCA به‌جای یك تپ خطی یك تپ منطقی را می‌پذیرد. یك زمان درنگ قابل‌تنظیم توسط آزمایش‌کننده تعیین می‌شود. دستگاه MCA ازکانال ۱ شروع می‌کند وتعداد تپهای منطقی را در زمان درنگ می‌شمارد، سپس به‌کانال ۲ می‌رود واین‌چرخه را تکرار می‌کند. بنابراین، دستگاه MCA کار شمارش وخواندن تمـام شمارنده‌ها را انجام می‌دهد، و بدین‌سان می‌توانیم منحنیهای واپاشی را مشابه شکل ۱.۶ روی صفحهٔ نمایش مشاهده‌کنیم.

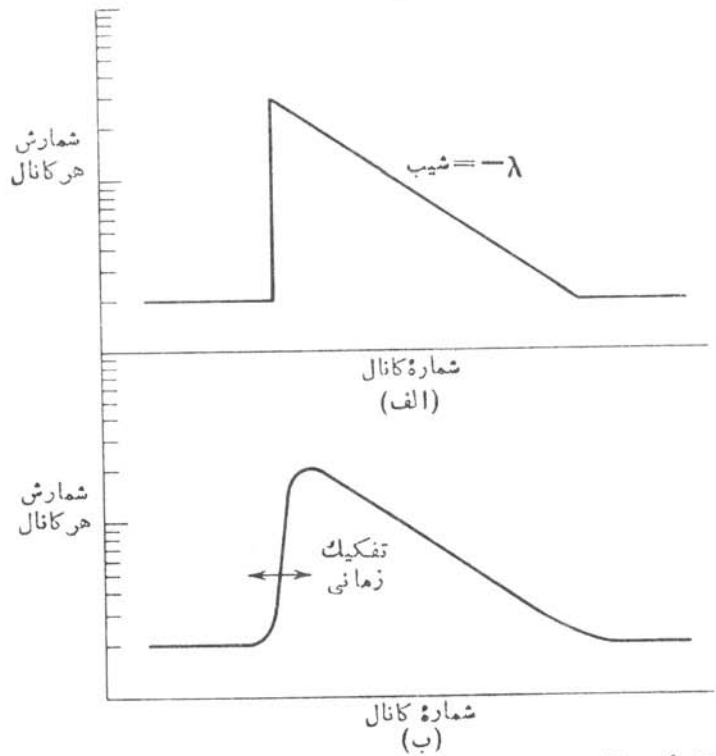
اساساً می‌توانیم این روش را به نیمه‌عمرهای کوتاه وکـوتاهتر نیزگسترش دهیم، ولی در زمانهای حدود $10^{-3}s$ به‌بن‌بست می‌رسیم. بیشتر آشکارسازهای‌تابش نمی‌توانند آهنگ‌شمارش بیش از $10^{5}/s$ را تحمل‌کنند. اگـر زمان درنگ برابر $10^{-3}s$ بـاشد، بیشترین شمارش ممکن درهرکانال درحدود ۱۰۰ خواهد بود؛ وچون خطای هـرکانال از مرتبهٔ $\sqrt{100}$ یا ۱۰٪ است، خطای نیمه‌عمر در این روش خیلی زیاد خواهد شد.

اگر برای تعیین فاصلهٔ زمانی بین تشکیل یك حالت هسته‌ای و واپـاشی آن روش



شکل ۳۱.۷ اندازه‌گیری مستقیم نیمه‌عمر با استفاده از کاهش اکتیویته برحسب زمان. اطلاعات حاصل از دو پرتوگاهای مختلف ناشی از واپاشی ^{56}Mn برحسب زمان، طی ۴۵ نیمه‌عمر، روی کاغذ نیمه لگاریتمی رسم شده است. طی این‌دوره آهنگ شمارش درحدود ۱۳ مرتبهٔ بزرگی تغییر می‌کند.

دقیقی دراختیار داشته باشیم، می‌توانیم نیمه‌عمرهای کوتاهتر از 10^{-3}s را هم تعیین کنیم. تشکیل یك‌حالت‌را با مشاهدهٔ تابشی که به‌آن‌حالت منجر می‌شود می‌توان فهمید. بنابراین می‌توانیم بین تابشی که تشکیل یك حالت را نشان می‌دهد وتابش ناشی از واپاشی آن یك آزمایش همفرودی ترتیب دهیم. ساده‌ترین راه حصول این هدف، استفاده از مبدل زمان به‌دامنه (TAC) است که درشکل ۳۰.۷ برای مواردی که نیمه‌عمر در مقایسه با تفکیك زمانی کوتاه است، نشان داده شده است. اگر نیمه‌عمر قابل مقایسه با تفکیك زمانی یا طولانیتر ازآن باشد، طیف TAC شواهدی دال بر کاهش نمایی عادی را که در تمام سیستمهای رادیواکتیو دیده می‌شود نشان خواهد داد. یعنی احتمال بقای حالت در طول زمان t پس از تشکیل آن با افزایش زمان به‌طور نمایی کاهش می‌یابد. بنابراین، بیشترین احتمال این است که تابش دوم را در زمان کوتاهی پس از تشکیل آن‌حالت مشاهده کنیم؛ هرچه بیشترصبر کنیم، احتمال بقای آن‌حالت کمترمی‌شود وتابشهای دوم کمتری‌را می‌شماریم. طیف TAC حاصل درشکل ۳۲.۷ نشان‌داده شده است.

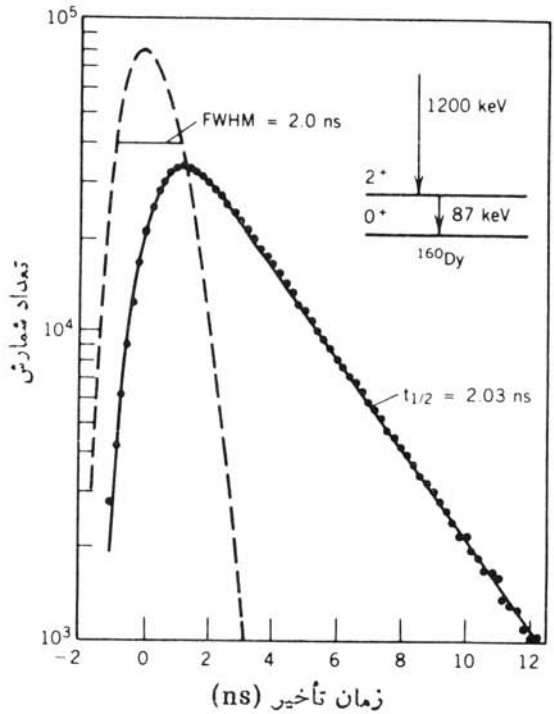


شکل ۳۲.۷ اگر حالت هسته‌ای بین اولین و دومین تابش در مقایسه با تفکیك زمانی دارای نیمه‌عمر خیلی کوتاه نباشد، کاهش نمایی آن قابل مشاهده می‌شود. این طیفهای TAC را برای مشاهدهٔ اثر واپاشی حالت (الف) آشکارساز ایده‌آل، (ب) آشکارساز حقیقی، باید با شکل ۳۰.۷ مقایسه کرد.

این آزمایش، چگونگی کاربرد همفرودی تأخیری را نشان می‌دهد. نمونه‌ای از نتایج تجربی حاصل از این روش درشکل ۳۳.۷ نشان‌داده شده است.

محدودیت استفاده از روش همفرودی تأخیری در قابلیت تشخیص منحنیهای آنی و تأخیری مطابق‌شکل۳۳.۷ است. یعنی، تفکیک‌زمانی باید کوچکتر از نیمه‌عمر باشد. تفکیک زمانی Ge درحدود ۱۰ns و NaI(Tl)درحدود ۱ ns، و سوسوزنهای پلاستیکی‌درحدود ۰٫۱ns است. با اندازه‌گیری دقیق می‌توان روش‌همفرودی تأخیری‌را برای‌نیمه‌عمرهای کمتر از ۱۰ps گسترش‌داد، ولی گسترهٔ اصلی‌کاربردآن از $۱۰^{-۳}$ تا $۱۰^{-۱۱}$s است.

برای نیمه‌عمرهای کوتاهتر، فنون همفرودی قابل‌استفاده نیستند وباید از روشهای دیگر استفاده کرد. بعضی از این روشها شامل اندازه‌گیری احتمال برانگیزش یك حالت هسته‌ای از حالت پایه از طریق جذب تابش الکترومغناطیسی است. نمونه‌هایی از این



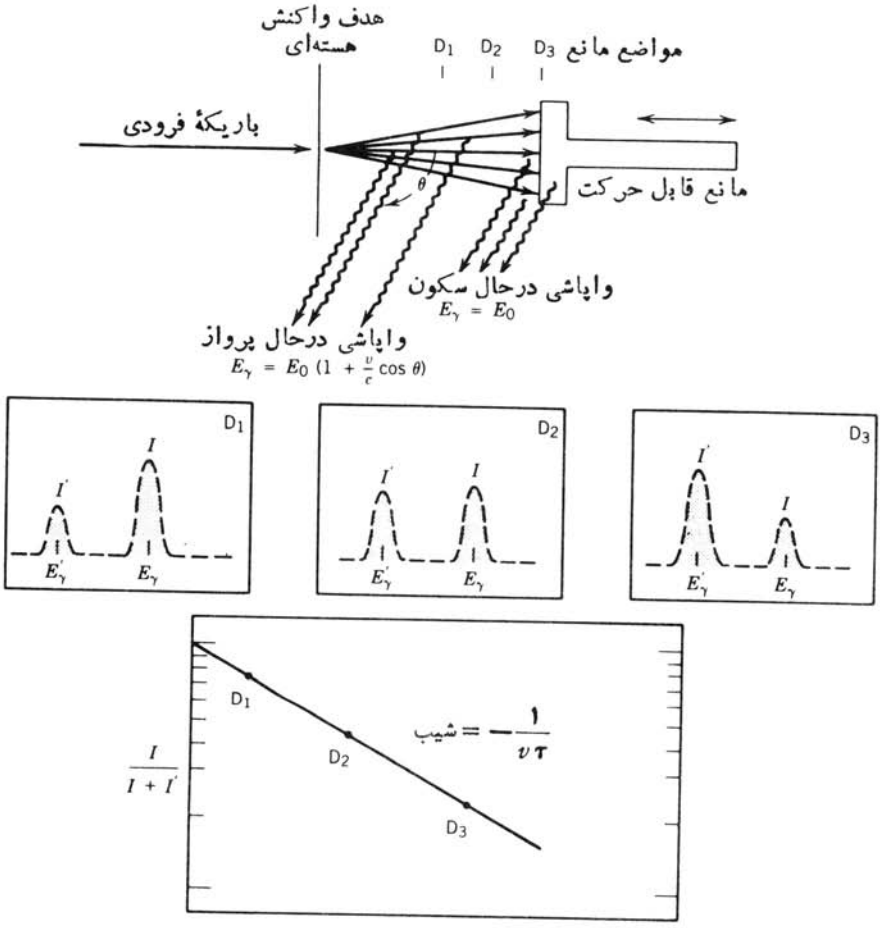
شکل ۳۳.۷ نمونه‌ای از اندازه‌گیری نیمه‌عمر با روش همفرودی تأخیری. منحنی خط‌چین پاسخ انتظاری را برای دو تابشی که به‌طور لحظه‌ای گسیل می‌شوند، یعنی در یك فاصلهٔ زمانی که درمقایسه با تفکیك زمانی دستگاه (۲ ns) کوتاه است، نشان می‌دهد. این‌همان منحنی به‌اصطلاح «آنی» است. منحنی تأخیری، گرد شدن ناشی از تفکیك زمانی محدود را مشابه شکل ۳۲.۷ نشان می‌دهد. قسمت خطی نمودار نیمه‌لگاریتمی، برای اولین‌حالت برانگیختهٔ ^{۱۶۰}Dy با انرژی ۸۷ keV، نیمه‌عمری برابر ۰٫۰۲±۲٫۰۳ به‌دست می‌دهد.

آزمایشها را در بخشهای ۹.۱۰ و ۶.۱۱ (جلددوم، ترجمهٔ فارسی) مورد بررسی قرارخواهیم داد. سایرفنون، اغلب درمورد هسته‌هایی که در واکنشهای هسته‌ای تولیدمی‌شوند به‌کارمی‌روند. هسته‌های حاصل از واکنش، ازمحیط هدف به‌خارج منتقل می‌شوند. اگر این هسته‌ها درحالت برانگیخته تشکیل شده باشند، ممکن است درضمن پرواز پرتوهای گاما نیز از آنها گسیل شوند. این پرتوهای گاما دارای انتقال دوپلر خواهند بود. اگر باریکهٔ هسته‌های پس‌زن (دراثر برخورد با یك هدف جامد) متوقف شود، هسته‌های باقیمانده درحال سکون واپاشیده می‌شوند و انرژی آنها دراثر انتقال دوپلر تغییر نمی‌کند. بنابراین دوقلهٔ پرتو گاما، یکی باانرژی منتقل شده ودیگری باانرژی منتقل نشده، مشاهده می‌کنیم. نسبت شدتهای دوقله به‌مسافت پیش از توقف هسته‌های پس‌زده بستگی دارد. (اگر مسافت کوتاه باشد، هسته‌های کمتری در حال پرواز واپاشیده خواهندشد.) شکل ۳۴.۷ نمایش ساده‌ای از این آزمایش ونتیجهٔ آن را نشان می‌دهد. کسر پرتوهای گاما درقلهٔ منتقل نشده با مساحت پس‌زنی به‌طور نمایی بستگی دارد، و این امر به‌نوبهٔ خود نیمه‌عمر تراز برانگیخته را تعیین می‌کند. این روش برای گسترهٔ 10^{-10} تا 10^{-12} s مفید است. درکمتر از 10^{-12} s، فاصلهٔ پس‌زنی به‌قدری کوتاه است که این روش به‌آسانی قابل استفاده نیست. (برای نمونهٔ نوکلئون غیرنسبیتی با $v = 0.1c$، مسافت طی شده در 10^{-12} s برابر ۰.۰۳ mm است.) در عوض، دریك روش دیگر به‌هستهٔ پس‌زن پس از واکنش اجازهٔ نفوذ درجسم جامدی که به‌هدف چسبیده است داده می‌شود. هسته بلافاصله شروع به کندشدن می‌کند وبالاخره متوقف می‌شود. سرعت آن به‌طورپیوسته کم می‌شود، و بنابراین انرژی گامای گسیل شده به‌طور پیوسته از مقدار بدون انتقال تا مقدارانتقال‌یافته تغییر می‌کند. با درك سازوکار کاهش انرژی در برخورد بامادهٔ موردگذار، و بااستفاده از، نمایهٔ این توزیع انرژی می‌توان طول‌عمر موردنظر را به‌دست آورد. این روش را می‌توان برای طول عمرهای کوتاه تا حدود 10^{-15} s به‌کار برد. درشکل ۳۵.۷ کاربرد هردو روش نشان‌داده شده است.

۹.۷ سایر انواع آشکارساز

طیف‌سنجهای مغناطیسی

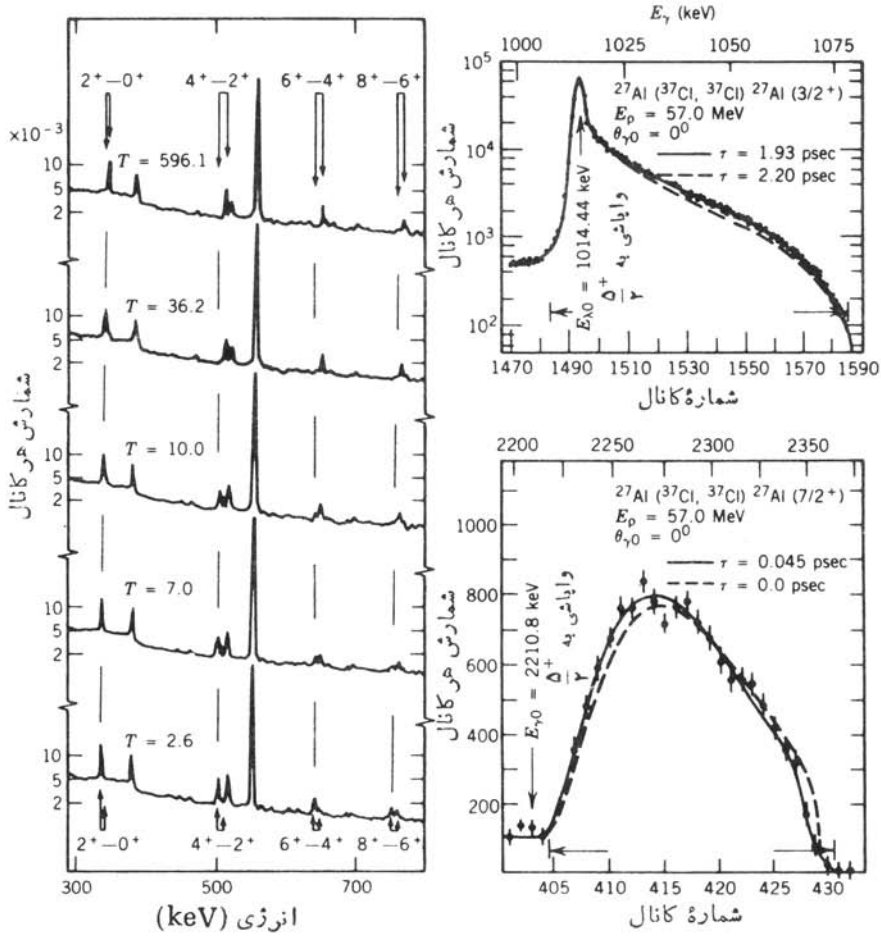
در اندازه‌گیریهای اپتیکی، برای پاشیدگی نور و تجزیهٔ آن به‌طول‌موجهای تشکیل‌دهنده از تـوری پراش استفاده می‌کنیم. بدین‌طریق جداسازی فضایی طـول‌مـوجها امکان‌پذیر می‌شود، یعنی‌طول‌موجهای مختلف درمکانهای مختلف‌ظاهر می‌شوند، وبدین‌ترتیب می‌توانیم اثر آنها را روی فیلم عکاسی ثبت کنیم (درطیف‌نگار) ویا شدت آنهارا به‌کمك یك‌شکاف ویك وسیلهٔ فوتوالکتریك (در یك طیف‌سنج) تعیین کنیم. هدف از طرح یك دستگاه‌برای این اندازه‌گیریها، چنانکه دربسیاری ازکتابهای مقدماتی بحث شده است، رسیدن به‌توان تفکیك بالا (که به‌صورت $\lambda/\Delta\lambda$ تعریف می‌شود وقابلیت تفکیك طـول‌موجهای نزدیك به‌λ را با تفاوت $\Delta\lambda$ نشان می‌دهـد) و پاشندگی زیاد است (که به‌صورت $\Delta\theta/\Delta\lambda$ یا



شکل ۳۴.۷ نمایش ساده‌ای از روش پس‌زنی دوپلر برای اندازه‌گیری طول‌عمر. هسته‌های واپاشنده توسط آشکارسازی که محور آن با جهت پس‌زنی زاویهٔ θ می‌سازد مشاهده می‌شوند. حرکت مانع، تعداد نسبی واپاشیهای درحال پرواز و سکون را تغییر می‌دهد، که با استفاده از آن می‌توان عمر میانگین واپاشی را تعیین کرد.

جدایی زاویه‌ای $\Delta\theta$ در فاصلهٔ واحد طول موج $\Delta\lambda$ تعریف می‌شود).

همین اهداف درطرح طیف‌سنجهای مغناطیسی برای ذرات باردار نیز وجود دارند. یعنی ما یلیم وسیله‌ای با پاشندگی زیاد و تفکیک کوچك دراختیار داشته باشیم. (تعریف تفکیك یکی از موارد متعدد اختلاف اصطلاحات بین فیزیکدانهای اتمی وهسته‌ای است. توان تفکیك یك توری، $\lambda/\Delta\lambda$، باید یك عدد بزرگ باشد؛ درحالی که تفکیك یك آشکارساز هسته‌ای، $\Delta E/E$ باید حتی‌الامکان کوچك باشد. این دو بیان معادل یکدیگرند ولی با عبارات متفاوت مطرح شده‌اند. طبق هردو بیان، تابش تکفام فرودی بر یك وسیله باید با



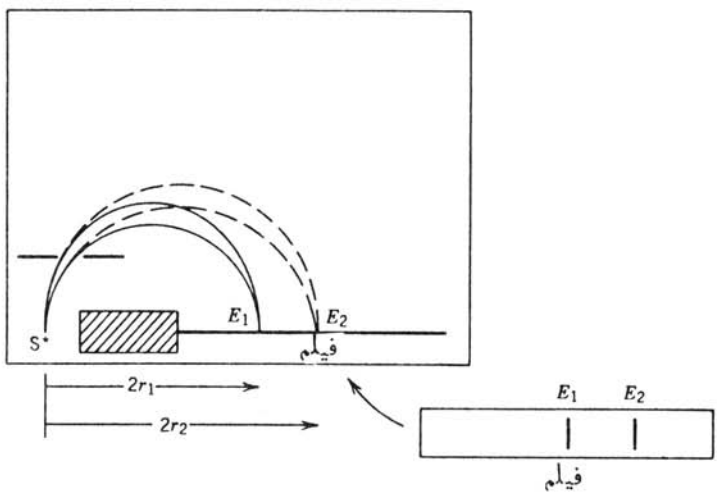
شکل۳۵.۷ روشهای انتقال‌دوپلر برای‌تعیین طول عمر. درقسمت‌چپ اطلاعات‌خام ازگذارهای حالت پایهٔ نوار چرخشی ($^+$۲، $^+$۴، $^+$۶، و $^+$۸) ^{۱۲۲}Xe نشان‌داده شده است. محل‌گذارهای منتقل‌شده ومنتقل نشده در بالا وپایین علامت‌گذاری شده است. این اطلاعات باآشکارساز تحت زاویهٔ °۰ وبا ترتیب هندسی شکل۳۴.۷ گرفته‌شده‌اند. به‌همین‌دلیل، خط انتقالی به‌جای‌انرژی کمتر دارای انرژی بیشتر است. طیفهای مختلف درفواصلی ازمانع که متناظر با زمانهای‌پرواز ۶ر۲ تا ps ۱ر۵۹۶ بوده‌اندگرفته شده‌اند. نیمه‌عمرهای استنتاجی‌به‌ترتیب برای $^+$۰→$^+$۲ برابر ps ۶ر۵±۹ر۶۱؛ برای $^+$۲ → $^+$۴ برابر ps ۸ر۰±۷ر۵؛ برای$^+$۴ → $^+$۶ برابر ps ۵ر۰±۷ر۲؛ برای $^+$۶ → $^+$۸ کمتر از ps ۴ر۲ است. درقسمت راست دومورد نشان‌داده شده‌اند که درآنها طول‌عمر به‌قدری کوتاه است که نمی‌توان از روش پس‌زنی استفاده کرد. خط متناظر به‌قلهٔ انرژی گاما درتمام منطقهٔ انرژی منتقل‌شده ومنتقل نشده پهن شده است. نیمه‌عمر نمونهٔ بالایی‌درحدود ps ۰ر۰۷±۳۳ر۱، ونیمه‌عمر نمونهٔ پایینی‌درحدود ps ۰ر۰۱۳±۰ر۰۲۵ به‌دست می‌آید.

کمترین گستردگی ممکن در انرژی یا طول موج از آن خارج شود.) همین‌طور مایلیم که دستگاه اندازه‌گیری از بیشترین بازدهٔ ممکن برخوردار باشد. در مورد ذرات باردار، علاقه‌مندیم که ذرات تك انرژی متحرك در جهات مختلف را در یك مکان مشترك در وسیلهٔ خروجی جمع‌آوری کنیم.

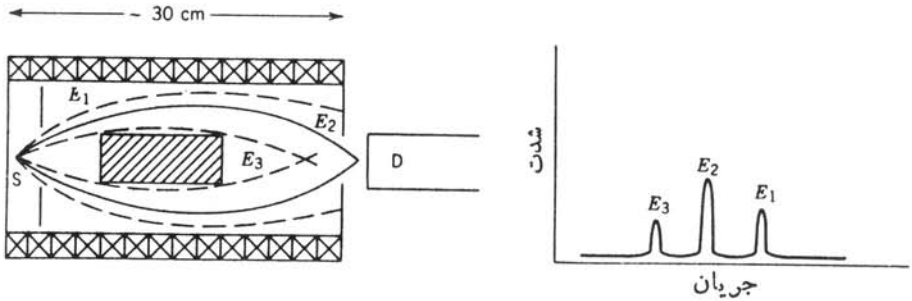
طرح طیف‌سنجهای مغناطیسی با طرح طیف‌سنجهای جرمی که در بخش ۲.۳ مورد بررسی قرار گرفت و درشکل ۱۳.۳ نشان‌داده شد، نقاط مشترك بسیار دارد.

طرز کار اساسی طیف‌سنجهای مغناطیسی به‌قدری مشابه یکدیگر است که ما در اینجا فقط مشخصات کلی طرز کار آنها را شرح می‌دهیم و بحث دربارهٔ طرح و ساختمان آنها را به‌کارهای مفصلتر وامی‌گذاریم. اصول اساسی این وسایل در شکل ۳۶.۷ نشان داده شده است. فرض کنید که چشمهٔ رادیواکتیو دو تابش متمایز با انرژیهای E_1 و E_2 (به‌عنوان مثال، دو دسته ذرهٔ آلفا) گسیل می‌کند. بدیهی است که این ذرات در جهات مختلف گسیل می‌شوند. درمیدان مغناطیسی یکنواخت، این ذرات مسیرهای دایره‌ای دارند که در آنها حاصلضرب Br تکانهٔ ذرات را مشخص می‌کند [معادلهٔ (۲۰.۳)]. برخورد این دو دسته ذره با وسیلهٔ ثباتی مانند فیلم عکاسی، دوتصویر مشخص تولید می‌کند. جزئیات دیگر این دستگاه، به طرح میدان مغناطیسی برای بیشینه‌سازی کانونی کنندگی و بهبود تفکیك آن مربوط می‌شود.

یك نمونه‌از طیف‌سنج الکترونها درشکل۳۷.۷ نشان‌داده شده‌است. میدان‌مغناطیسی توسط مجموعه‌ای از پیچه‌ها به‌وجود می‌آید. به‌ازای جریان معینی که از پیچه‌ها می‌گذرد (ودرنتیجه میدان معینی که به‌وجود می‌آید)، فقط الکترونهای با انرژی مشخصی ازشکاف



شکل ۳۶.۷ یك طیف‌سنج مغناطیسی ساده. میدان مغناطیسی یکنواخت B بر صفحهٔ کاغذ عمود است. تکانهٔ ذره، شعاع انحنای r مسیر را تعیین می‌کند. یك اثر کانونی کننده هم وجود دارد که ذرات گسیل شده درهر گسترهٔ زاویه‌ای کوچك را در یك نقطهٔ مشترك فیلم جمع‌آوری می‌کند.



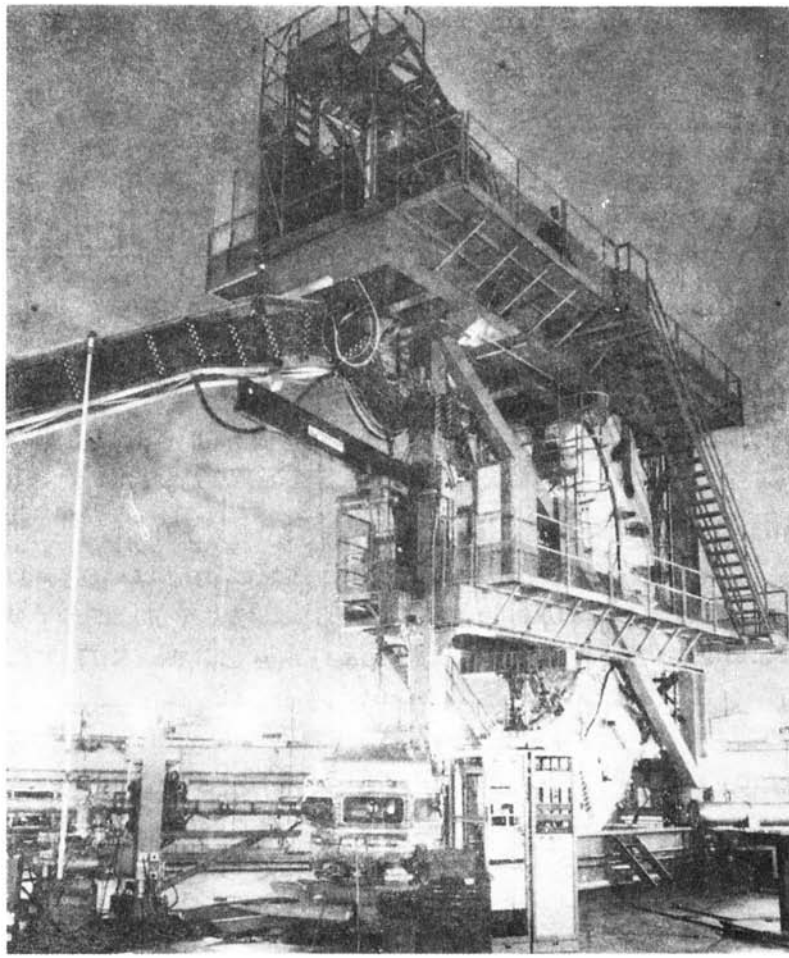
شکل ۳۷.۷ یك طیف‌سنج با «عدسی» مغناطیسی که برای الکترونها طرح شده‌است. طرز کار آن بسیار شبیه عدسیهای اپتیکی است. پیچه‌ها یك میدان مغناطیسی درامتداد محور دستگاه ایجاد می‌کنند. ذراتی که انرژی کاملا مشخص E_2 داشته‌باشند، روی شکاف خروجی کانونی می‌شوند و به آشکارساز می‌رسند، ولی ذرات با انرژیهای دیگر ثبت نمی‌شوند. تغییر جریان پیچه‌ها، کانونی کردن گروههای انرژی دیگر و مشاهدهٔ آنها را توسط آشکارساز ممکن می‌سازد.

عبور می‌کنند و سایر الکترونها از آن رد نمی‌شوند. شدت الکترونهای خروجی به‌ازای جریانهای فرودی مختلف را یك آشکارساز ثبت می‌کند. تفکیك $\Delta E/E$ قابل‌حصول برای این‌وسیله نوعاً کمتر از ۱ر۰٪ است، در حالی‌که بهترین تفکیك برای الکترونها در یك آشکارساز Si(Li) ممکن‌است درحدود ۵ر۰٪ باشد. این‌بهبود تفکیك، در مطالعات‌شدت الکترونهای تبدیل داخلی ناشی از زیر پوسته‌های مختلف از اهمیت‌خاصی برخوردار است (بخش ۶.۱۰ را ببینید).

طراحی طیف‌سنجهای مغناطیسی برای ذرات سنگین، مانند آلفا وپروتون، نیز بر همین اساس‌است ولی جرم بزرگتر این‌گونه ذرات باید درساختمان‌آنها درنظر گرفته‌شود. برای خم‌کردن ذرات سنگین به‌میدانهای قویتری نیاز است، که این امر معمولا استفاده‌از آهنرباهای آهنی را به‌جای پیچه‌های حامل‌جریان ضروری می‌سازد. با وجود این، شعاع انحنای‌مسیر ذرات معمولا بزرگ‌است ودرنتیجه اندازهٔ فیزیکی این وسایل بسیاربزرگتر از طیف‌سنجهای الکترون می‌شود. اندازهٔ یك طیف‌سنج نمونه ممکن است به‌حدود چند متر، و وزن‌کل آهن موجود درآن می‌تواند به‌۱۰۰ تن برسد. شکل ۳۸.۷ نمونه‌ای از طیف‌سنج مغناطیسی‌را نشان می‌دهدکه برای ذرات سنگین باردار طرح‌شده است. تفکیك این دستگاه نیز در حدود ۱ر۰٪ یا بهتر است، که با ضریب ۳ تا ۵ بر Si(Li) یا آشکارسازهای سد سطحی برتری دارد.

شمارگر تلسکوپی

یك شمارگر تلسکوپی متشکل از دو یا چند شمارگر است، که درآن تابش موردنظر به‌ترتیب ازشمارگرها عبور می‌کند و معمولا درآخرین شمارگر به‌طورکامل جذب می‌شود. برای جذب کامل انرژی ذره، آخرین شمارگر معمولا دارای بیشترین حجم است؛ بقیهٔ شمارگرهای تلسکوپ بسیار نازك‌اند، به‌طوری‌که ذره فقط کمی از انرژی ΔE را در



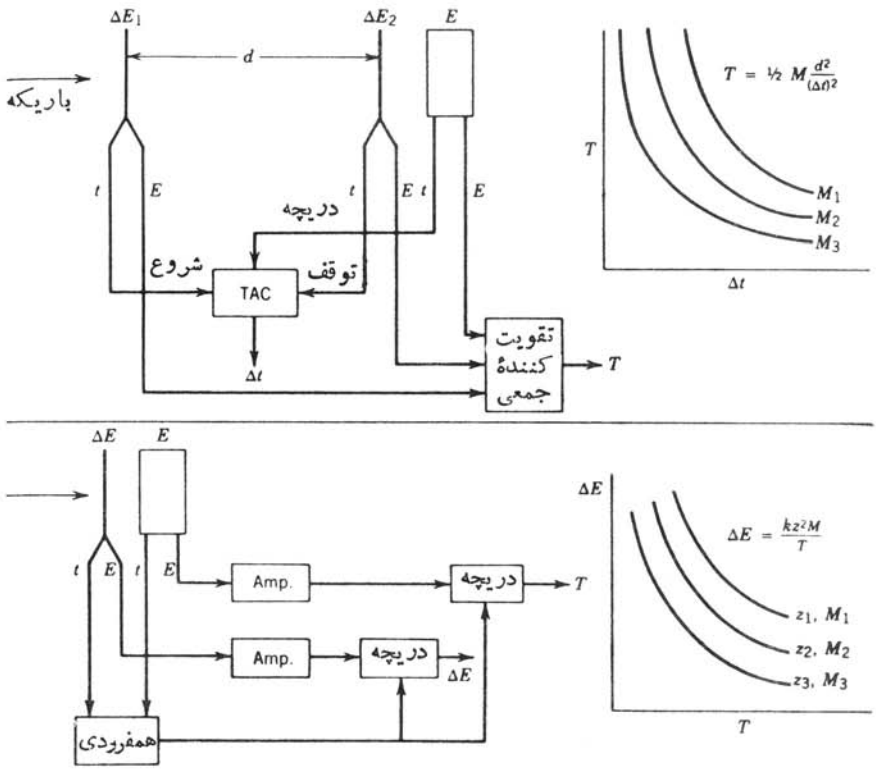
شکل ۳۸۰۷ طیف‌سنج پروتون با تفکیک بالا در آزمایشگاه فیزیک مزونها در لوس آلاموس. باریکهٔ پروتون فرودی از طریق لوله‌های پایینی سمت چپ وارد و در اتاقک هدف در ناحیهٔ مرکزی پراکنده می‌شود. پروتونهای پراکنده دوباره توسط آهنرباهای خم‌کنندهٔ عمودی به‌اندازهٔ °۷۵ منحرف می‌شوند ودرقسمت بالای ساختمان آشکارسازی می‌شوند. تفکیک انرژی برای پروتونهای ۸۰۰ MeV درحدود ۳۰ keV است.

هریك از آنها از دست می‌دهد. شمارگرهای ΔE معمولا برای زمان‌سنجی انتخاب می‌شوند. سوسوزنهای پلاستیکی بهترین انتخاب محسوب می‌شوند، زیرا خصوصیات زمان‌سنجی آنها عالی است و به‌آسانی می‌توان آنها را در اندازه‌ها و به‌اشکال مختلف مورد نیاز آزمایشها ساخت. درسایر دستگاهها ممکن است از شمارگرهای تناسبی استفاده شود، که به‌کمك

آنها می‌توان مسیر ذره را ثبت کرد.

شمارگرهای تلسکوپی موارد استفادهٔ مختلف دارند و می‌توان آنها را به‌کمك آشکارسازهای مختلف ساخت. ما فقط یکی از کاربردهایشان، یعنی استفاده از آنها را برای شناسایی ذره مورد بررسی قرار می‌دهیم. (دربارهٔ شمارگرهای تناسبی مکان‌یاب درقسمت بعدی همین بخش بحث خواهیم کرد.)

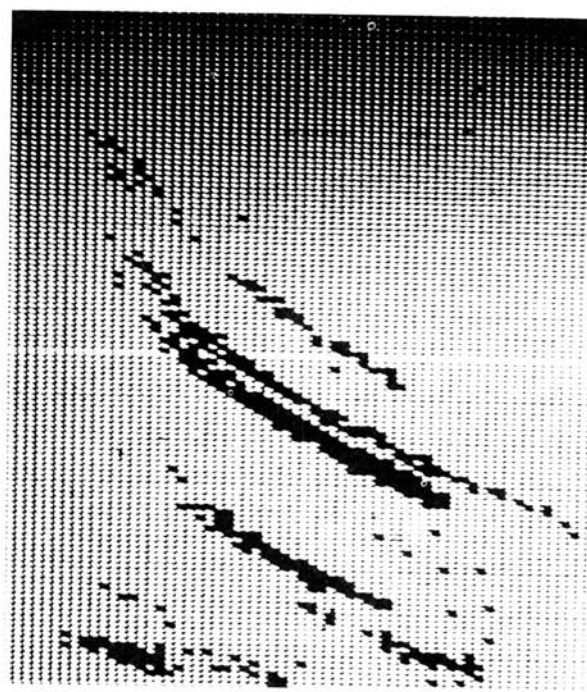
شکل ۳۹.۷ دو تلسکوپ ساده را نشان می‌دهد که می‌توانند برای شناسایی ذرات مورد استفاده‌قرار گیرند. در روش‌نخست، از دوشمارگر نازك برای‌استخراج علائم‌زمانی استفاده می‌کنیم. این علائم زمانی را می‌توان بااستفاده از یك TAC برای استنتاج‌زمان لازم برای طی فاصلهٔ بین دوشمارگر به‌کاربرد. بدین‌وسیله می‌توان سرعت ذره، و چون



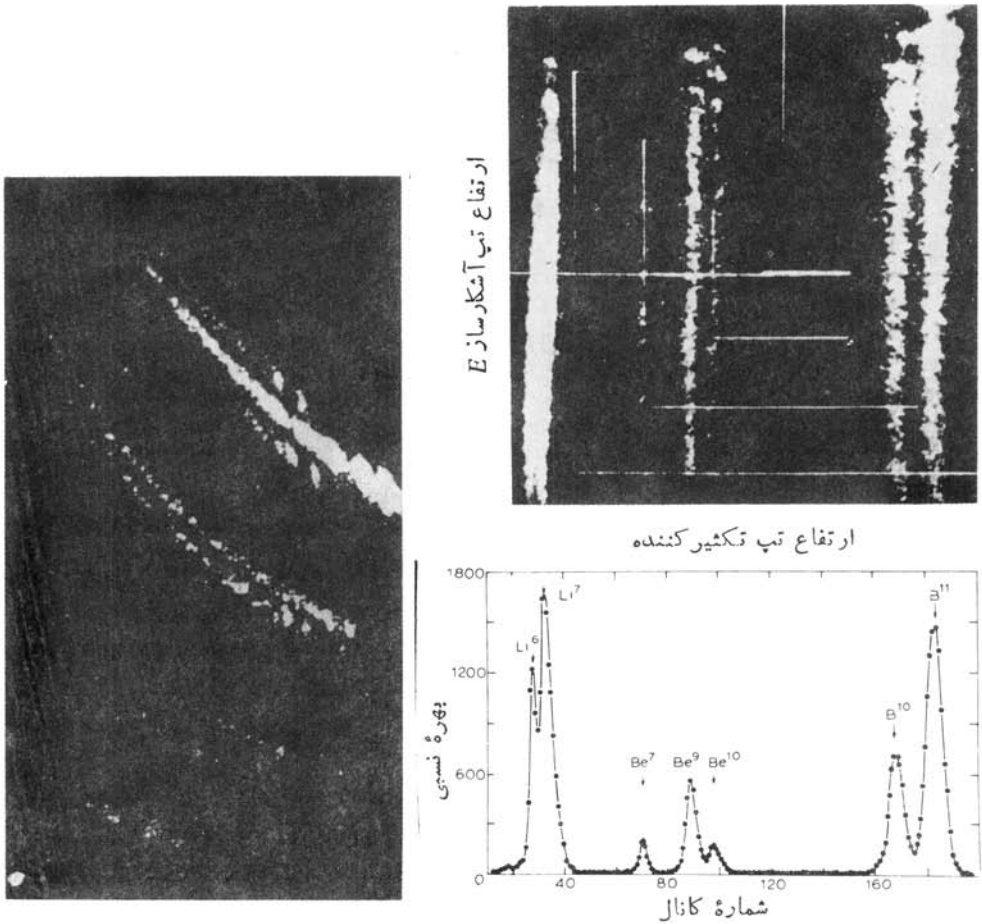
شکل ۳۹.۷ دو نمونهٔ مختلف شمارگرهای تلسکوپی. (بالا) در روش زمان پرواز، یك TAC زمان‌لازم‌را برای طی‌مسافت‌بین‌دو آشکارساز ΔE اندازه می‌گیرد، ویك تقویت کنندهٔ جمعی، سه مقدارکاهش انرژی‌را برای به‌دست‌آوردن انرژی ذره جمع می‌کند. رسم‌تغییرات انرژی‌برحسب Δt خانواده‌ای ازهذلولیها را تولید می‌کند که تعیین کنندهٔ جرم ذره‌اند. (پایین) روش $\Delta E \cdot T$ نیز خانواده‌ای از هذلولیها را به‌وجود می‌آورد که z و M را تعیین می‌کنند.

انرژی جنبشی هم به‌کمك شمارگر E تعیین می‌شود، جرم ذره را به‌دست‌آورد. این روش را روش زمان پرواز می‌نامند که دارای کاربردهایی غیر از شناسایی ذره است. این روش معمولا در اندازه‌گیری انرژی نوترون به‌کار می‌رود که برای آنها در شمارگرهای E فوتوپیك به‌دست نمی‌آید، واز همین‌رو به‌طور نسبتاً تقریبی انرژی نوترون تعیین می‌شود (فصل۱۲، جلد دوم، ترجمهٔ فارسی را ببینید). شکل ۴۰.۷ نمونه‌ای از کاربرد این روش را برای شناسایی محصولات واکنش نشان می‌دهد.

دومین روش متضمن اندازه‌گیری‌کاهش انرژی درشمارگر نازك است. با استفاده‌از معادلهٔ توان ایستانندگی بته، معادلهٔ (۳.۷)، مشاهده می‌شودکه با تقریب خوب داریم $\Delta E \propto v^{-2}$، زیرا عوامل درون پرانتز برای ذرات نسبیتی کوچك هستند. بنابراین حاصلضرب $\Delta E \cdot T$ برابر kz^2M است که درآن ze بار ذره، M جرم‌آن و k مقداری ثابت است (که به‌مادهٔ جاذب بستگی دارد). با رسم ΔE برحسب T خانواده‌ای از هذلولیهای متناظر با مقادیر مختلف z^2M به‌دست می‌آیند. [معادلهٔ (۷.۷) برای الکترونها را می‌توان مشابه ذرات نسبیتی سبك نوشت.] شکل ۴۱.۷ نتایج تحلیل $\Delta E \cdot T$ را برای باریکه‌ای از ذرات نشان می‌دهد.



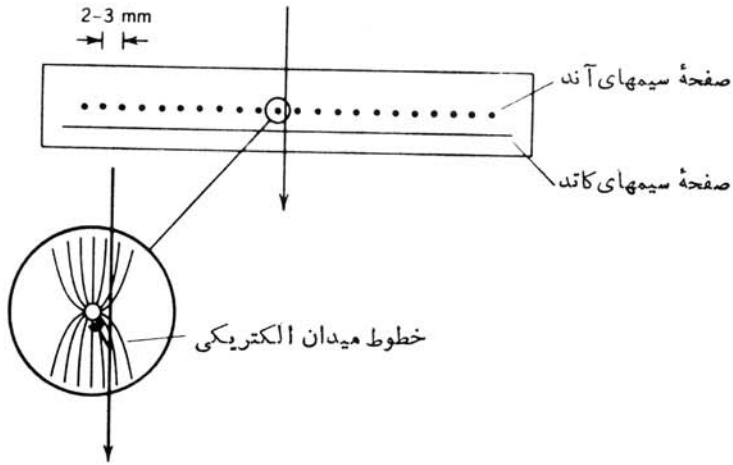
شکل ۴۰.۷ شناسایی ذره به‌روش زمان‌پرواز. اطلاعات T برحسب Δt درست‌مشابه به شکل۳۹.۷ رسم شده‌اند. هذلولیها ازبالا به‌ترتیب ^{16}O، ^{13}C، ^{12}C، ^{7}Li، ^{6}Li، و^{4}He را نشان‌می‌دهند.



شکل ۴۱.۷ روش $\Delta E \cdot T$ برای شناسایی ذره. درقسمت چپ، نمودارهای هذلولی شبیه شکل ۳۹.۷ نشان‌داده شده‌اند. درتصویر بالایی سمت راست، اطلاعات با دستورالعمل اندکی متفاوت رسم شده است: T روی محور قائم و $\Delta E \cdot T$ روی محور افقی نشان‌داده شده است. این‌روش‌رسم اطلاعات نشان می‌دهد که $\Delta E \cdot T$ واقعاً ثابت است. دوتصویرپایین سمت‌راست، طیف متناظر با تصویر نشان‌داده شده‌است. شمارهٔ کانال، ارتفاع تپ حاصلضرب $\Delta E \cdot T$ را نشان می‌دهد. توجه کنید که این روش ^{7}Li را از ^{7}Be و ^{10}Be را از ^{10}B جدا می‌کند. اما در روش زمان‌پرواز که فقط نسبت به‌جرم حساس‌است ومستقل‌از بار است، این‌نوکلیدها ازیکدیگر جدا نمی‌شوند.

شمارگرهای تناسبی چندسیمی

شمارگرهای تناسبی چندسیمی (MWPC) را به‌عنوان نمونه‌ای ازآشکارسازی‌که نسبت به‌محل برهم‌کنش ذره حساس است، بررسی می‌کنیم. از این آشکارسازها می‌توانیم در



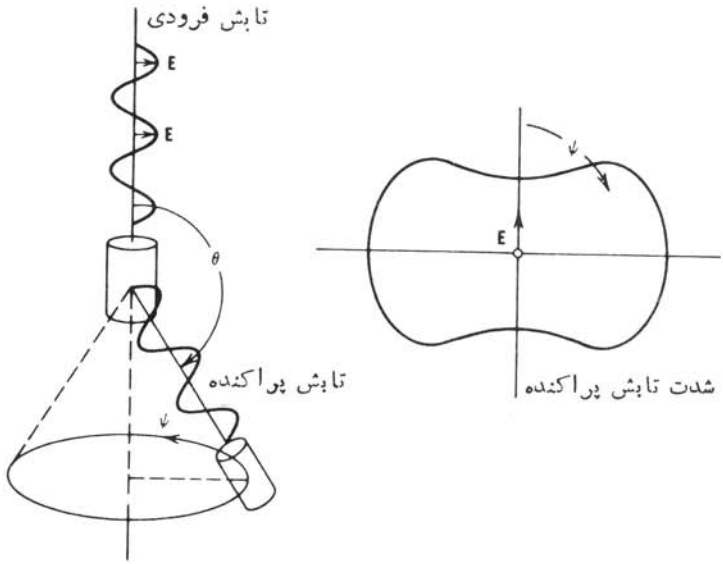
شکل ۴۲.۷ نمودار ساده‌ای از یك شمارگر تناسبی چندسیمی. عبور ذرهٔ باردار ازمجاورت یکی از سیمهای آند بهمنی به‌وجود می‌آورد که به‌عنوان یك علامت منفرد فقط روی همان سیم خوانده می‌شود. بنابراین می‌توان محل ذره را با دقتی درحدود فاصلهٔ بین سیمها تعیین کرد. سیمها و پنجره‌های ورودی وخروجی فوق‌العاده نازك‌اند، به‌طوری که ذره انرژی بسیار کمی را از دست می‌دهد. این آشکارسازها معمولا دریك تلسکوپ، همراه با یك شمارگر ضخیم E که درقسمت انتهایی انرژی ذره را تعیین می‌کند، به‌کار می‌روند.

یك ترتیب تلسکوپی برای نقشه‌برداری از مسیر ذرهٔ حاصل ازیك واکنش هسته‌ای استفاده کنیم. معمولا یك شمارگر MWPC (شکل ۴۲.۷) در اساس از دوصفحه سیمهای جداگانهٔ آند و کاتد تشکیل شده است، که به‌فاصلهٔ ۲ تا ۳ mm از یکدیگر قرارگرفته‌اند. حجم خودشمارگر ممکن است به $1\ m^3$ برسد. ذرهٔ باردار درعبور از اتاقك با یونشهایی که تولید می‌کند سبب ایجاد بهمنی از یونش درحوالی یکی از سیمها می‌شود. سیمها به‌طور جداگانه بررسی می‌شوند، و بدین‌سان با استفاده از علائم خروجی می‌توانیم محل ذره را با دقتی درحدود فاصلهٔ بین سیمها (۲ تا ۳ mm) مشخص کنیم.

قطب‌سنجها

اغلب می‌خواهیم قطبیدگی تابش مورد مشاهده را اندازه بگیریم. برای ذرات با اسپین ۱/۲، مانند الکترونها ونوکلئونها، قطبیدگی به‌معنی جهت بالا یا پایین مؤلفهٔ اسپین نسبت به‌یك محور خاص است. برای فوتونها، معمولا قطبیدگی خطی کلاسیك موردنظر است که به‌کمك بردار $\mathbf{E}$ میدان تابش الکترومغناطیسی تعیین می‌شود.

پراکندگی کامپتون فوتونها، چنانکه درشکل ۴۳.۷ نشان داده شده است فرایندی وابسته به‌قطبش است. بامشاهدهٔ شدت تابش پراکنده درنقاط مختلف حول پراکننده، می‌توانیم

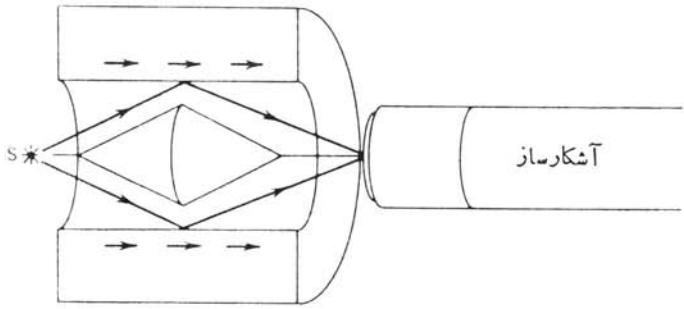


شکل ۴۳.۷ یك قطب‌سنج کامپتون. با حرکت آشکارساز درمختصات استوانه‌ای و به‌ازای مقادیر مختلف ψ، شدت تابش پراکنده به علت بستگی فرایند پراکندگی کامپتون به‌قطبیدگی تغییر می‌کند. با اندازه‌گیری شدت تابش پراکنده در دو یا چند زاویهٔ ψ، می‌توان صفحهٔ قطبش (یا راستای E) را استنتاج کرد.

قطبیدگی‌خطی تابش فرودی را تعیین‌کنیم. روش دیگر، که غالباً برای اندازه‌گیری قطبش دایره‌ای به‌کار می‌رود، برمبنای احتمال پراکندگی فوتونها از الکترونهای قطبیدهٔ مواد مغناطیسی است. دراین مورد، قطبیدگی بااستفاده از تفاوت شدت تابش پراکنده در اثر وارونی میدان، تعیین می‌شود (شکل ۴۴.۷).

دراندازه‌گیری قطبیدگی‌ذرات بااسپین ۱/۲ نیز ازآزمایش پراکندگی‌استفاده‌می‌کنیم. می‌دانیم‌که پراکندگی‌الکترونهای قطبیده ازالکترونهای قطبیده (موجود درموادمغناطیسی) قویاً به‌موازی بودن یا پادموازی بودن اسپینهای آنها بستگی دارد. اصل پاؤلی مانع از پراکندگی در آرایش موازی‌است، ودرنتیجه پراکندگی درآرایش پادموازی به‌شدت مرجح است. (نسبت سطح مقطعهای پراکندگی موازی به پادموازی در انرژیهای‌کم در حدود ۰ تا ۰٫۱ است.) در پراکندگی پوزیترون ـ الکترون، اصل پاؤلی به‌کار نمی‌رود و در انرژیهای‌کم‌مقدار سطح مقطعها با هم برابر است.

قطب‌سنجهای نوکلئونی با استفاده از وابستگی پراکندگی هسته‌ای به‌اسپین، که در فصل ۴ مورد بحث قرارگرفت، کارمی‌کنند. دراینجا احتیاجی به‌پراکندگی اسپینهای‌قطبیده (چنانکه در مورد الکترونها انجام شد) نداریم. برهم‌کنش اسپین ـ مدار هسته‌ای سبب



شکل ۴۴.۷ فرایند پراکندگی کامپتون به‌قطبیدگی الکترونهای مادهٔ پراکننده نیز بستگی دارد. در اینجا مادهٔ پراکنندهٔ آهن آهنربا شده است. وارون‌سازی جهت مغناطیس (با معکوس کردن جریان آهنربای الکتریکی) سبب تغییر شدت تابش مشاهده شده توسط آشکارساز می‌شود، که با استفاده از آن می‌توان قطبش دایره‌ای را تعیین کرد.

وابستگی سطح مقطع به‌اسپین می‌شود، و تعیین قطبیدگی با استفاده از پراکندگی نوترونها یا پروتونها توسط هدف بدون اسپینی مانند ^4He کاملا قابل قبول است. معمولا از این روش برای تحلیل قطبیدگی محصولات واکنشهای هسته‌ای استفاده می‌شود، که آن را در فصل ۱۱ (جلد دوم، ترجمهٔ فارسی) مورد بحث قرار خواهیم‌داد.

مراجع مطالعات تکمیلی

برای یافتن مقالات جامع و روزآمد دربارهٔ آشکارسازهای تابش هسته‌ای به‌کتابهای زیر رجوع کنید:

Glenn F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (New York: Wiley, 1979),

J. B. A. England, *Techniques in Nuclear Structure Physics* (New York: Wiley, 1974).

مشخصات تعداد بسیار زیادی از مراجع و مقالات بدیع را می‌توان در این کتابها پیدا کرد. مرور خیلی جالبی از طیف‌سنجهای مغناطیسی را می‌توان در کتاب دوم خواند.

سایر مراجع و کتابهای درسی عمومی در این زمینه عبارت‌اند از

G. G. Eichholz and J. S. Poston, *Principles of Nuclear Radiation Detection* (London: Butterworths, 1980),

R. E. Lapp and H. L. Andrews, *Nuclear Radiation Physics*, 4th ed. (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1972);

P. W. Nicholson, *Nuclear Electronics* (London: Wiley, 1974);

R. D. Evans, *The Atomic Nucleus* (New York: McGraw-Hill, 1955), Chapter 18-25.

G. Dearnaley and D. C. Northrop, *Semiconductor Counters for Nuclear Radiations* (New York: Barnes and Noble, 1966),

J. R. Birks, *The Theory and Practice of Scintillation Counting* (New York: MacMillan, 1964).

بسیاری از مباحث مربوط به‌آشکارسازها، الکترونیك، و روشها را درکتاب زیر می‌توان دید:

Alpha-, Beta-, and Gamma-Ray Spectroscopy, edited by K. Siegbahn (Amsterdam: North-Holland, 1965),

فصول بسیار جالب این کتاب عبارت‌اند از: فصلهای ۱ و ۲ دربارهٔ برهم‌کنشهای تابش با ماده، فصل۳ دربارهٔ طیف‌سنجها، فصل ۵ دربارهٔ سوسوزنها، فصل۶ دربارهٔ آشکارسازهای ذرات، فصلهای ۷ و ۸ دربارهٔ روشهای تجربی عمومی، وفصل ۱۷ دربارهٔ اندازه‌گیری طول‌عمرهای کوتاه.

جدولهای مقادیر سطح مقطعهای فوتون را می‌توان درمرجع زیر یافت:

E. Storm and H. I. Israel. *Nuclear Data Tables, A* 7, 565(1970),

مقادیر برد الکترونها را می‌توان درمرجع زیر پیدا کرد:

L. Pages, E. Bertel, H. Joffre, and L. Sklavenitis, *Atomic Data*, 4, 1 (1972).

برای مطالعهٔ مروری روشهای اندازه‌گیری طول‌عمرهای هسته‌ای رجوع کنید به:

A. Z. Schwarzschild and E. K. Warburton, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* 18, 265 (1968),

روشهای شناسایی ذرات را می‌توان در مرجع زیر مرور کرد:

F. S. Goulding and B. G. Harvey, *Ann. Rev. Nucl. Sci.*25, 167 (1975).

مسائل

۱. با استفاده از بردهای داده‌شده درشکل ۲.۷، بردهای زیر را محاسبه کند: (الف) یك ذره آلفای ۱۰ MeV در طلا؛ (ب) یك پروتون ۵ MeV در بریلیم؛ (ج) یك پروتون ۱ MeV درآب. بردها را برحسب سانتی‌متر بیان کنید.

۲. برد ذرات ^{3}He و ^{3}H با انرژی ۰٫۴ MeV را درآلومینیم (برحسب‌سانتی‌متر) محاسبه کنید.

۳. کاهش انرژی ΔT پروتونها، دوترونها وذرات آلفا با انرژی بین۱۰ تا ۲۰۰MeV را درعبور از سوسوزن پلاستیکی جامد به‌ضخامت ۲ mm محاسبه کنید. تغییرات

ΔT را برحسب T رسم کنید.

۴. برد پروتونها را در NaI برای انرژیهای بین ۱ تا ۱۰۰ MeV محاسبه و رسم کنید (درصورت لزوم از برون‌یابی شکل ۲.۷ استفاده کنید).

۵. درمحیط مجاورشتابدهنده‌ها یا رآکتورها شارهای عظیمی ازپرتوهای گاما با انرژی ۵ تا ۱۰ MeV وجود دارد. چه ضخامتی ازسرب لازم‌است تا شدت‌فوتون باضریب 10^{12} کاهش داده شود؟

۶. یك چشمهٔ نقطه‌ای ذرات آلفا به‌اکتیویتهٔ ۲۵ μCi با یکی از وجوه یك اتاقك یونش بزرگ درتماس است. چشمه فقط ذرهٔ آلفا با انرژی ۶٫۲۰ MeV گسیل می‌دارد. اگر ذرات آلفایی که وارد اتاقك می‌شوند همهٔ انرژی‌خود را از دست بدهند، جریان تولیدشده در خروجی اتاقك چقدر است؟ (بازدهٔ گردآوری بار اتاقك را ۱۰۰٪ در نظر بگیرید.)

۷. یك شمارگر گایگر که درطی روزکاربردهای مختلف پیدا می‌کند، به‌طور متوسط ۱۰۰ شمارش درثانیه تولید می‌کند. این شمارگر به‌صورت استوانه‌ای به‌قطر ۲ cm و طول ۱۰ cm است که از مخلوط ۹۰٪ آرگون و ۱۰٪ اتانول با فشار ۰٫۱ atm پر شده است. درناحیهٔ گایگر ـ مولر، هرشمارش خروجی از تولید تعداد 10^{10} زوج یون ـ الکترون حاصل‌می‌شود. چه‌مدت طول می‌کشدتا یك‌سوم گاز فرونشانی‌مصرف شود ودرنتیجه تعویض استوانه ضرورت پیداکند؟

۸. طیف ارتفاع تپ یك چشمهٔ رادیواکتیو که فقط فوتونهای تك‌انرژی با انرژی نسبتاً بالا گسیل می‌کند، شامل سه قلهٔ مشخص در ارتفاعات ۷٫۳۸، ۶٫۴۹ و ۵٫۶۰ V است. انرژی پرتوگاما چقدر است؟

۹. فوتون ۶۶۲ keV ناشی از واپاشی ^{137}Cs توسط یك آشکارساز NaI با تفکیك انرژی ۵۳ keV(FWHM) مشاهده شده است. تفکیك انرژی دراندازه‌گیری فوتون ۱٫۸۳۶ MeV که از واپاشی ^{88}Y حاصل می‌شود چقدر است؟

۱۰. انرژی لبه‌های کامپتون را در طیف پرتوگامای ناشی از واپاشی ^{60}Co پیدا کنید (جدول ۲.۷).

۱۱. در واپاشی ^{88}Y، دو فوتون با انرژیهای ۰٫۸۹۸ MeV (در ۹۲٪ واپاشیها) و ۱٫۸۳۶ MeV (در ۱۰۰٪ واپاشیها) گسیل می‌شوند. طیف مورد انتظار پرتوهای گاما را هنگامی که مانند شکل ۲۶.۷ چشمهٔ ^{88}Y درمقابل آشکارساز NaI و Ge قرار گرفته است، رسم کنید.

۱۲. عبارتهای واریانس σ^2 را برای توزیعهای دوجمله‌ای، پواسون، وگاؤسی به‌دست آورید.

۱۳. یك چشمهٔ رادیواکتیو دارای شمارش ۳۸۶۱ در مدت ده‌دقیقه است. پس ازبرداشتن چشمه، زمینه به‌تنهایی ۲۶۴۸ شمارش را در ۳۰ دقیقه نشان دهد. آهنگ شمارش خالص چشمه (شمارش در ثانیه) و خطای آن را تعیین کنید.

۱۴. از یك تکنیسین خواسته‌ایم که قدرت یك‌چشمهٔ رادیواکتیو را باحداکثر دقت ممکن

تعیین کند. تقاضا برای دستگاه شمارش بسیار زیاد است وفقط یك ساعت وقت برای کل اندازه‌گیری وجود دارد. درموارد زیر، وقت موجود را چگونه باید زمانبندی کرد: (الف) آهنگ شمارش خالص ۵ برابر آهنگ زمینه است؛ (ب) آهنگ شمارش خالص درهمان حدود آهنگ شمارش زمینه است؛ (ج) آهنگ شمارش خالص در حدود یك پنجم آهنگ شمارش زمینه است.

۱۵. دریك آزمایش شمارش همفرودی از دوآشکارساز پرتو گاما، یکی ثابت در $\theta = 0°$ ودیگری متحرك در مقادیر مختلف θ، استفاده شده است. چشمه روی محـور دوران آشکارساز دوم وبه‌فاصلهٔ یکسان از دوآشکارساز قرار دارد، وپرتوهای گاما باانرژی ۷۵۰ keV گسیل می‌کند. این فوتونها می‌توانند پس از ورود به یك آشکارساز و شرکت دریك فرایند منفرد پراکندگی کامپتون، به آشکارساز دیگر وارد ودرآنجا جذب شوند. انرژی تابش مشاهده شده درآشکارساز متحرك را برحسب موقعیت آن، وقتی که این پراکندگی رخ می‌دهد، رسم کنید. (توجه: در این آرایش هندسی، θ زاویهٔ پراکندگی کامپتون نیست.)

۱۶. ضخامت یك ورقهٔ فلزی را طی ساخت آن، با مشاهدهٔ تضعیف باریکهٔ فوتونهای عبوری از ورقه تنظیم می‌کنند. چشمه‌ای از فوتونها را دربالای ورقهٔ خارج شده از غلتکها قرار می‌دهند ویك آشکارساز هم در زیر ورقه قرار می‌گیرد. انرژی فـوتون طوری انتخاب می‌شود که تضعیف درضخامت موردنظر ۱۰mm ۰٫۰ درست برابر ۵۰٪ باشد. بازدهٔ آشکارسازی، وقتی که ورقه‌ای درکار نیست، برابر ۱٪ است. برای برنامه‌ریزی کار غلتکها، تعیین ضخامت باید حداکثر در ۱ ثانیه انجام شود و دقت اندازه‌گیری ضخامت باید درحدود ۵٪± باشد. قدرت چشمهٔ موردنیاز را تعیین کنید.

۱۷. شکل ظاهری طیف زمان به‌دامنه (مانند شکل ۳۲.۷)، وقتی که دو تابش دارای انرژی بسیار نزدیك غیرقابل تمایز توسط آشکارساز باشند، چگونه خواهد بود؟

۸

واپاشی آلفا ۱

ذرات آلفا را در ابتدا به‌عنوان کم‌نفوذترین تابشهایی که از مواد طبیعی گسیل می‌شوند شناسایی کردند. درسال ۱۹۰۳، رادرفورد نسبت بار به‌جرم آنها را با استفاده از انحراف ذرات آلفای حاصل از واپاشی رادیم درمیدانهای الکتریکی ومغناطیسی تعیین کرد. علی‌رغم مشکل بودن این آزمایشهای اولیه، نتیجهٔ رادرفورد فقط ۲۵٪ بیش از مقدار پذیرفته شدهٔ فعلی بود. درسال ۱۹۰۹ رادرفورد نشان‌داد که همان‌طور که حدس‌زده می‌شد، ذرات آلفا واقعاً از هسته‌های هلیم تشکیل می‌شوند. درآزمایشهای رادرفورد، ذرات با نفوذ از دیواره‌ای نازك وارد یك اتاقك تخلیه شده می‌شدند و پس‌ازچند روز گردآوری، طیف‌نمایی اتمی وجود گاز هلیم را در اتاقك نشان می‌داد.

بسیاری ازهسته‌های سنگین، مخصوصاً هسته‌های مربوط به‌سریهای رادیواکتیو طبیعی، با گسیل آلفا واپاشیده می‌شوند. گسیل هرنوع نوکلئون دیگر درفرایند واپاشی رادیواکتیو خود به‌خود بسیار به‌ندرت اتفاق می‌افتد. به‌عنوان مثال، گسیل دوتریم در فرایند واپاشی طبیعی ملاحظه نمی‌شود. بنابراین باید دلیل خاصی برای انتخاب گسیل آلفا نسبت به‌سایر مدهای واپاشی وجود داشته باشد. در این فصل به‌بررسی این سؤال می‌پردازیم و فرایند واپاشی آلفا را به تفصیل مطالعه می‌کنیم. همچنین نشان می‌دهیم که طیف‌نمایی آلفا می‌تواند به‌درك ساختار هسته‌ای کمك کند.

۱۰۸ منشأ واپاشی آلفا

گسیل آلفا در نتیجهٔ دافعهٔ کولنی اتفاق می‌افتد. برای هسته‌های سنگین این مطلب به‌طور فزاینده‌ای اهمیت می‌یابد، زیرا آهنگ افزایش نیروی دافعهٔ کولنی (به‌صورت تابعی از Z^2) از نیروی بستگی هسته که تقریباً متناسب با A افزایش می‌یابد بیشتر است.

چرا ذرهٔ آلفا به‌عنوان عامل حمل خودبه‌خود بار مثبت انتخاب شده است؟ منظور از فرایند خودبه‌خود فرایندی است که طی آن مقداری انرژی جنبشی ناگهان بدون دلیل آشکار در سیستم ظاهر می‌شود؛ این انرژی باید ناشی از کاهش جرم سیستم باشد. ذرهٔ آلفا، به‌علت ساختار بسیار پایدار و قویاً مقیدش، درمقایسه بااجزای تشکیل‌دهندهٔ آن جرمی نسبتاً کم دارد. در مواقعی که امیدواریم محصولات فروپاشی حتی‌الامکان سبک و انرژی آزادشده حداکثر مقدار را داشته باشد، باید گسیل این ذره را انتظار داشته باشیم.

برای یک‌نمونهٔ آلفا گسیل ^{232}U (۷۲ سال) می‌توانیم، بااستفاده از جرمهای معلوم، انرژی آزاد شدهٔ ذرات گسیلی مختلف را محاسبه کنیم. نتایج این‌محاسبات درجدول ۱۰۸ خلاصه شده است. باتوجه به‌ذرات درنظر گرفته شده، واپاشی خودبه‌خود از لحاظ انرژی فقط برای‌ذرهٔ آلفا امکان‌پذیر است. برای ذرات اندکی‌سنگین‌تر ازهسته‌های فهرست‌شده، مانند ^{8}Be یا ^{12}C، انرژی فروپاشی مثبت است. اما، نشان خواهیم داد (بخش ۴.۸) که ثابت فروپاشی جزئی گسیل این نوع ذرات سنگین درمقایسهٔ با مقدار آن برای‌گسیل آلفا بی‌نهایت کوچک است. این‌نوع واپاشیها عملا به‌قدری نادرند که هرگز مورد توجه قرار نمی‌گیرند. با توجه به‌این مطلب، برای اینکه هسته‌ای آلفا گسیل باشد، امکان‌پذیر بودن این واپاشی ازلحاظ انرژی‌کفایت نمی‌کند. ثابت فروپاشی نیز نباید خیلی کوچک باشد، زیرا

جدول ۱۰۸ انرژی آزاد شده (مقدار Q) برای مدهای مختلف واپاشی ^{232}U.*

ذرهٔ گسیل‌شده	انرژی آزاد شده (MeV)	ذرهٔ گسیل‌شده	انرژی آزاد شده (MeV)
n	−۷٫۲۶	^{4}He	+۵٫۴۱
^{1}H	−۶٫۱۲	^{5}He	−۲٫۵۹
^{2}H	−۱۰٫۷۰	^{6}He	−۶٫۱۹
^{3}H	−۱۰٫۲۴	^{6}Li	−۳٫۷۹
^{3}He	−۹٫۹۲	^{7}Li	−۱٫۹۴

* این مقادیر براساس جرمهای شناخته‌شده محاسبه شده‌اند.

دراین‌صورت گسیل آلفا چنان به‌ندرت اتفاق می‌افتد که ممکن است هرگز قابل آشکارسازی نباشد. با روشهای امروزی، این بدان معنی است که نیمه‌عمر باید کمتر از 10^{16} y باشد. همچنین، واپاشی بتازا هم اگر ثابت واپاشی جزئی بزرگتری داشته باشد، می‌تواند واپاشی آلفازا را تحت‌الشعاع قرار دهد. اغلب هسته‌های با $A>190$ (و بسیاری از هسته‌های با $150<A<190$) از لحاظ انرژی در برابر گسیل آلفا ناپایدارند ولی فقط نیمی از آنها بقیهٔ شرایط را نیز دارا هستند.

۲.۸ فرایندهای واپاشی آلفازا

گسیل خودبه‌خود یك ذرهٔ آلفا را می‌توان با فرایند زیر نشان‌داد

$$^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X'_{N-2} + \alpha$$

همان‌طور که رادرفورد نشان‌داد، ذرهٔ آلفا هستهٔ ^{4}He است که از دو نوترون و دوپروتون تشکیل‌می‌شود. برای درك فرایند واپاشی، باید پایستگی انرژی، تکانهٔ خطی وتکانهٔ‌زاویه‌ای را بررسی کنیم.

ابتدا پایستگی انرژی در فرایند واپاشی آلفازا را درنظر می‌گیریم. فرض می‌کنیم که هستهٔ واپاشندهٔ اولیه، X، ساکن است. انرژی سیستم اولیه، همان انرژی سکون X یا $m_X c^2$ است. حالت نهایی متشکل از هستهٔ X' و ذرهٔ α است که هردومتحرك‌اند(تاتکانهٔ خطی پایسته‌بماند). بنابراین انرژی‌نهایی کل‌عبارت‌است‌از $m_{X'}c^2+T_{X'}+m_\alpha c^2+T_\alpha$ که در آن T نمایندهٔ انرژی جنبشی ذرات نهایی است. بنابر پایستگی انرژی داریم

$$m_X c^2 = m_{X'}c^2 + T_{X'} + m_\alpha c^2 + T_\alpha \qquad (۱.۸)$$

یا

$$(m_X - m_{X'} - m_\alpha)c^2 = T_{X'} + T_\alpha \qquad (۲.۸)$$

طرف راست معادلهٔ (۲.۸) انرژی خالص آزاد شده در واپاشی است که مقدار Q خوانده می‌شود

$$Q = (m_X - m_{X'} - m_\alpha)c^2 \qquad (۳.۸)$$

واپاشی خودبه‌خود درصورتی امکان‌پذیر است که $Q>0$ باشد. (مقادیر Q واپاشی برای ^{232}U در جدول ۱.۸ فهرست شده است.) مقادیر Q را می‌توان از جداول جرم اتمی محاسبه کرد، زیرا اگرچه‌معادلهٔ (۳.۸) نمایندهٔ‌فرایندی هسته‌ای‌است ولی‌جرمهای‌الکترون دراثر تفریق حذف می‌شوند. اگر جرمها برحسب یکای جرم اتمی (u) و c^2 برابر $931.502\,MeV/u$ درنظر گرفته‌شود، مقادیر Q مستقیماً برحسب MeV به‌دست‌می‌آیند.

مقدار Q همچنین برابر انرژی جنبشی کل پاره‌های حاصل از واپاشی است

$$Q = T_{X'} + T_\alpha \qquad (۴.۸)$$

اگـر هستهٔ اولیه ساکن باشد، تکانهٔ خطی صفر است و برای پایستگی تکانه خطی، X' و α باید تکانه‌های مساوی وغیر هم‌جهت داشته باشند تا تکانهٔ نهایی صفر شود

$$p_\alpha = p_{X'} \qquad (۵.۸)$$

انرژی آزادشده در واپاشی آلفازا درحدود ۵ MeV است. بنابراین برای X' و αداریم $T \ll mc^۲$ ومی‌توان بااطمینان ازسینماتیك نانسبیتی استفاده‌کرد. بانوشتن $T = p^۲/۲m$ و استفاده از معادلات (۴.۸) و (۵.۸) می‌توان انرژی جنبشی‌را برحسب مقدار Q به‌دست آورد

$$T_\alpha = \frac{Q}{(۱ + m_\alpha / m_{X'})} \qquad (۶.۸)$$

به‌علت کوچکی نسبت‌جرمها در مقایسه با ۱ (به‌خاطرداریم که X' نمایندهٔ یك هستهٔ سنگین است)، نوشتن این‌نسبت به‌صورت سادهٔ $۴/(A-۴)$ به‌اندازهٔ‌کافی دقیق است، وبا توجه به $A \gg ۴$ خواهیم داشت

$$T_\alpha = Q(۱ - ۴/A) \qquad (۷.۸)$$

معمولا، ذرهٔ α درحدود ۹۸٪ وهسته‌که بسیارسنگین‌تر است فقط درحدود ۲٪ مقدار Q را به‌خود اختصاص می‌دهد. (این انرژی پس‌زنی پارهٔ سنگین کاملا صرفنظرکـردنی نیست. برای‌مقدار Q حدود ۵ MeV، انرژی‌هستهٔ پس‌زن درحدود ۱۰۰ keV است. این‌انرژی خیلی بیش از انرژی پیوند اتمها در جامدات‌است ودرنتیجه درصورت نزدیك‌بودن‌هستهٔ پس‌زن به‌سطح جسم رادیواکتیو می‌تواند از آن فرارکند و وارد محیط اطراف‌شود. اگر واپاشی آلفازا قسمتی ازیك‌زنجیرهٔ واپاشی باشد، دخترهستهٔ پس‌زن می‌تواند رادیواکتیو باشد. خوشبختانه، برد هسته‌های سنگین پس‌زن در ماده بسیارکوتاه است و می‌توان با یك پوشش‌نازك مانند میلار یا لاك الکل روی چشمهٔ رادیواکتیو ازپخش آنهاجلو گیری‌کرد.)

انرژی جنبشی یك‌ذرهٔ α را می‌توان‌مستقیماً با یك‌طیف‌سنج مغناطیسی اندازه‌گرفت ودرنتیجه مقدار Q واپاشی را تعیین‌کرد. درمواردی‌که جرم عنصر دراز ـ عمر X معلـوم باشد، از این روش می‌توان برای تعیین جرم‌اتمی استفاده‌کرد، ولی به‌علت کوتاه‌بودن‌عمر X' اندازه‌گیری مستقیم جرم آن امکان‌پذیر نیست.

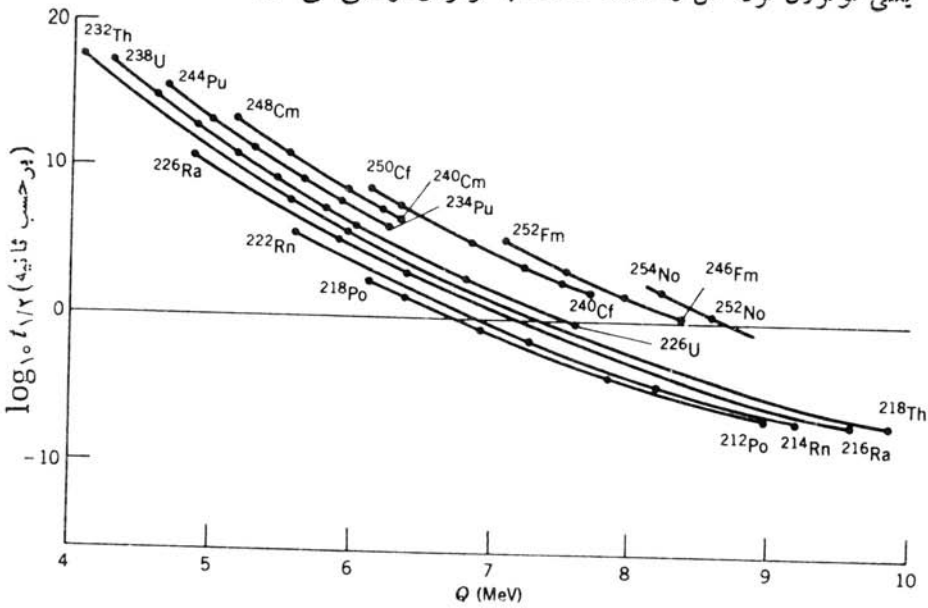
۳.۸ رده‌بندی واپاشی آلفازا

یکی از ویژگیهای واپاشی آلفازا چنان بارز است‌که حتی قبل ازسال ۱۹۱۱ یعنی قبل‌از کشف هسته تـوسط رادرفـورد، مورد توجه قرار گـرفت. گایگر و ناتال متوجه شدند آلفا گسیلهایی که انرژی فروپاشی‌شان زیاد است، نیمه‌عمرهای کوتاه دارند و به عکس.

چنانکه در موارد حدی ^{232}Th (1.4×10^{10} y؛ $Q = 4.08$ MeV) و ^{218}Th (1.0×10^{-7} s؛ $Q = 9.85$ MeV) مشاهده می‌شود، اختلاف بین نیمه‌عمرها به‌طور شگفت‌انگیزی زیاد است. مضرب ۲ در انرژی به معنای وجود مضرب 10^{24} در نیمه‌عمر است! توضیح نظری قاعدهٔ گایگر - ناتال درسال ۱۹۲۸، یکی از اولین پیروزیهای مکانیک کوانتومی بود.

ترسیم نمودار $\log t_{1/2}$ برحسب انرژی Q که شامل کلیهٔ آلفا گسیلها باشد، پراکندگی قابل ملاحظه‌ای را از روند عمومی گایگر - ناتال نشان می‌دهد. اما اگر فقط آلفا گسیلهای با Z یکسان واز این گروه فقط هسته‌های با Z و N زوج را درنظر بگیریم (شکل ۱.۸)، خمهای بسیار همواری به‌دست می‌آیند. هسته‌های زوج - فرد، فرد - زوج و فرد - فرد از روند عمومی پیروی می‌کنند ولی نمودار آنها کاملا هموار نیست ونیمه‌عمر آنها ۲ تا ۱۰۰۰ بار طولانی‌تر از نوع زوج - زوج با Z و Q یکسان است.

هستهٔ ^{235}U (Z زوج، N فرد) یکی از این انواع «بسیار دراز - عمر» جالب توجه است. اگر نیمه‌عمر آن ۱۰۰۰ بار کوتاهتر بود، این هستهٔ مهم در طبیعت وجود نداشت و احتمالا امروز صاحب رآکتورهای هسته‌ای نبودیم! درفصل ۱۳ (جلددوم، ترجمهٔ فارسی) خواهیم دید که همان ویژگیی که سبب عمر طولانی در واپاشی آلفازای ^{235}U می‌شود، یعنی نوترون فرد، آن را مستعد شکافت با نوترون گرمایی می‌سازد.



شکل ۱.۸ رابطهٔ معکوس بین نیمه‌عمر واپاشی آلفازا و انرژی واپاشی که قاعدهٔ گایگر - ناتال خوانده می‌شود. فقط هسته‌های Z زوج و N زوج نشان‌داده شده‌اند. خطوط پر نقاط تجربی را به‌هم وصل می‌کنند.

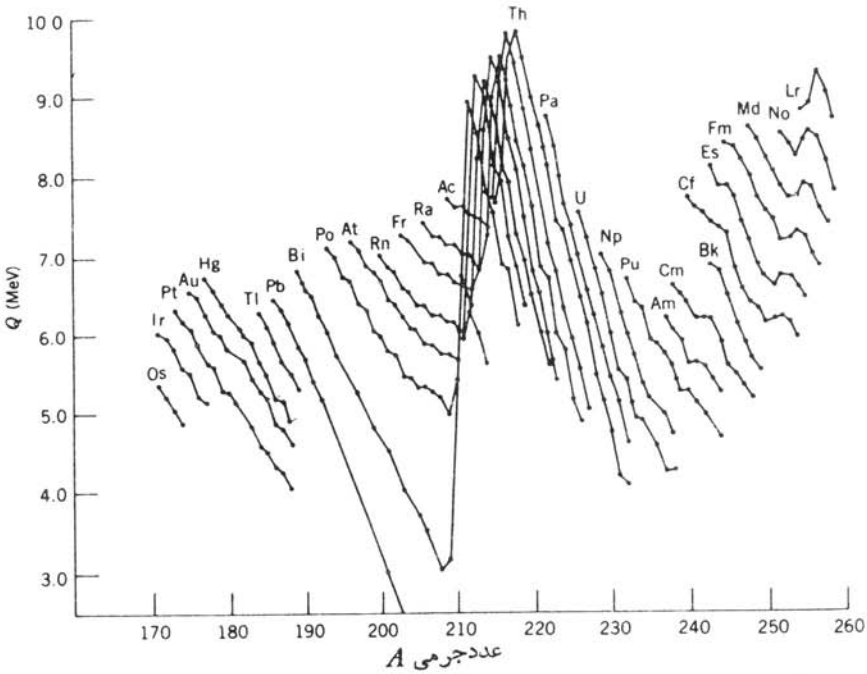
شکل ۲.۸ رابطهٔ سیستماتیك مهم دیگری را برای آلفاگسیلها نشان‌می‌دهد. درمرحلهٔ اول با توجه به‌اطلاعات مربوط به $A>۲۱۲$، ملاحظه می‌شودکه افزودن نوترون به‌هسته سبب‌کاهش انرژی فروپاشی می‌شودکه در این‌صورت بنابر قاعدهٔ گایگر ـ ناتال نیمه‌عمر افزایش می‌یابد، وهسته پایدارتر می‌شود. ناپیوستگی‌بارزی‌را که در نزدیکی $A=۲۱۲$ برای $N=۱۲۶$ می‌بینیم می‌توانیم دلیل‌دیگری برساختار پوسته‌ای هسته بدانیم.

بستگی سیستماتیك Q بـه A با پیش‌بینی فرمول نیمه‌تجربی جرم، معادلهٔ (۲۸.۳)، قابل مقایسه است

$$Q=B(^{۴}\mathrm{He})+B(Z-۲,\ A-۴)-B(Z,\ A) \qquad (۸.۸)$$

$$\cong ۲۸٫۳-۴\,a_{v}+\frac{۸}{۳}a_{s}A^{-۱/۳}+۴a_{c}ZA^{-۱/۳}(۱-Z/۳A)$$

$$-۴a_{sym}\left(۱-\frac{۲Z}{A}\right)^{۲}+۳a_{p}A^{-۷/۴} \qquad (۹.۸)$$



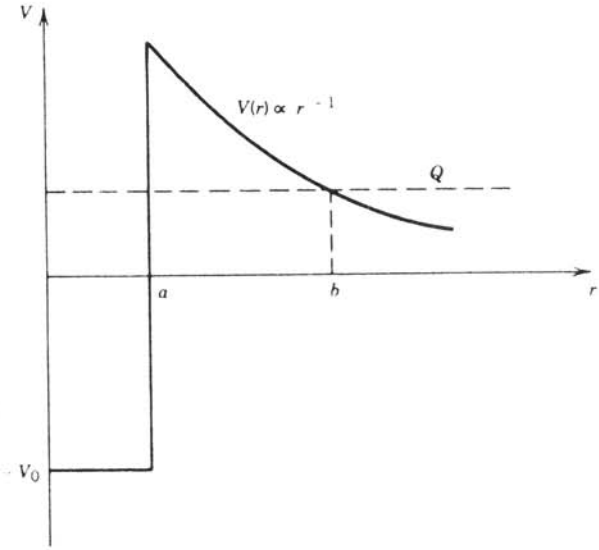
شکل ۲.۸ انرژی آزاد شده در واپاشی‌آلفازا برای زنجیره‌های ایزوتوپی مختلف هسته‌هـای سنگین. برخلاف‌شکل۱.۸ ایزوتوپهای A فرد و A زوج‌هردو نشان‌داده‌شده‌اند، وپراکندگیهای ناشی از فرد وزوج بودن‌کوچك‌است. اثرات بسته‌شدن پوسته در $N=۱۲۶$ (فرورفتگی‌بزرگ درشکل) و $Z=۸۲$ (فاصلهٔ بیش ازمقدار متوسط بین زنجیره‌های Po، Bi، وPb به‌وضوع‌قابل مشاهده است.

درمعادلهٔ (۹.۸) ازتقریب $Z, A \gg 1$ استفاده شده است. این رابطه برای واپاشی آلفازای ^{226}Th مقدار $Q = 6.75\ MeV$ را به‌دست می‌دهد که از مقدار اندازه‌گیری شدهٔ $6.45\ MeV$ چندان دور نیست. نکتهٔ مهمتر دراین رابطه، بازسازی روند عمومی شکل ۲.۸ است: با استفاده از معادلهٔ (۹.۸)، مقدار Q برای ^{232}Th برابر $5.71\ MeV$ (در مقایسه با $Q = 4.08\ MeV$)، و برای ^{220}Th برابر $7.77\ MeV$ (در مقایسه با $Q = 8.95\ MeV$) به‌دست می‌آید. یادآوری می‌شود که پارامترهای فرمول نیمه تجربی جرم چنان انتخاب شده‌اند که این فرمول باانرژی بستگی مشاهده شده در گسترهٔ تمام هسته‌ها به‌تقریب سازگاری داشته باشد. نکتهٔ مهم این است که مقادیر حاصل از این فرمول بامقادیر Q واپاشی توافق تقریبی دارند، وبرای هسته‌های سنگین مقدار $Q > 0$ به‌دست می‌آید. این فرمول همچنین کاهش Q را باافزایش A برای زنجیرهٔ ایزوتوپهایی چون توریم به‌طور صحیح پیش‌بینی می‌کند، اگرچه تغییرات Q برحسب A از مقدار واقعی‌اش کوچکتر است (این رابطه، مقدار $\Delta Q = -0.17\ MeV$ را به‌ازای تغییر واحد در A به‌دست می‌دهد، درحالی‌که برای Th مقدار متوسط مشاهده شده برابر $\Delta Q = -0.40\ MeV$ به‌ازای هر واحد تغییر در A است).

۴.۸ نظریهٔ گسیل آلفا

مشخصات کلی شکل ۱.۸ را می‌توان به‌کمك نظریهٔ کوانتوم مکانیکی که درسال ۱۹۲۸ تقریباً همزمان توسط گاموف از یك‌سو، و گورنی وکاندون ازسوی دیگر عرضه شد، توجیه کرد. طبق این نظریه ذرهٔ α در ناحیه‌ای کروی که توسط هستهٔ دختر تعیین می‌شود، حرکت می‌کند. ویژگی اصلی این مدل یك‌جسمی این است که ذرهٔ α پیش از واپاشی در داخل هستهٔ مادر تشکیل می‌شود. در واقع دلیل چندانی برای وجود ذرهٔ α به‌طور جداگانه در داخل هستهٔ مادر وجودندارد؛ با وجود این، این نظریه مخصوصاً برای هسته‌های زوج-زوج ازکارایی خوبی برخوردار است. موفقیت نظریه، تشکیل پیشینی ذرات α را ثابت نمی‌کند بلکه صرفاً نشان می‌دهد که رفتار آنها با چنین فرضیه‌ای سازگار است.

شکل ۳.۸ تصویری از انرژی پتانسیل بین ذرهٔ α و هستهٔ باقیمانده را برای فواصل مختلف بین مراکز آنها نشان می‌دهد که نموداری مناسب برای بررسی این نظریه است. خط افقی Q انرژی فروپاشی است. توجه کنید که پتانسیل کولنی تا شعاع a گسترش یافته و سپس به‌دلخواه قطع شده است. شعاع a را می‌توان مجموع شعاعهای هستهٔ باقیمانده وذرهٔ α درنظر گرفت. سه ناحیهٔ جالب توجه دراین شکل وجوددارد. درناحیهٔ کروی $r < a$ درداخل هسته قرار داریم و ازچاهی به‌عمق $-V_0$ صحبت می‌کنیم که در آن V_0 عددی مثبت است. از نظر کلاسیك ذرهٔ α می‌تواند دراین ناحیه با انرژی جنبشی $Q + V_0$ حرکت کند ولی نمی‌تواند ازآن بگریزد. ناحیهٔ پوستهٔ حلقوی $a < r < b$ یك سد پتانسیل به‌وجود می‌آورد، زیرا دراین ناحیه انرژی پتانسیل بیش ازکل انرژی قابل استفادهٔ Q است. ازنظر کلاسیك



شکل ۳.۸ انرژی پتانسیل نسبی سیستم متشکل از ذرهٔ α وهستهٔ دختر برحسب فاصلهٔ بین آنها. در داخل حصار هسته در $r=a$، انرژی پتانسیل به‌صورت چاه مربعی نشان داده شده است؛ در بیرون از حصار فقط دافعهٔ کولنی حکمفرماست. ذرهٔ α از a تا b در سد پتانسیل تونل می‌زند.

ذرهٔ α نمی‌تواند از هیچ‌یك از دوطرف وارد این ناحیه شود، همان‌طور که یك توپ تنیس که از ارتفاع معینی سقوط می‌کند نمی‌تواند به‌ارتفاع بالاتر برگردد؛ زیرا در هرموردی لازم خواهد بودکه انرژی جنبشی منفی باشد. ناحیهٔ $r>b$ ازنظر کلاسیك ناحیهٔ مجاز خارج از سد است.

از نظر کلاسیك، مسیر حرکت ذرهٔ آلفا درچاه پتانسیل کروی هربارکه ذره بخواهد از مرز $r=a$ فراتر رود، به‌سرعت وارون می‌شود اما از نظر مکانیك کوانتومی، شانس «نشت» یا «تونل زدن» ازچنین سدی وجود دارد. وجود سد این‌حقیقت را توجیه می‌کند که چرا هسته‌های ناپایدار در مقابل واپاشی آلفازا فوراً واپاشیده نمی‌شوند. ذرهٔ α در هسته باید بارها وبارها با سد برخورد داشته باشد تا بالاخره در آن نفوذکند. برای مثال، در ^{238}U احتمال نشت به‌اندازه‌ای کوچك است که ذرهٔ α به‌طور متوسط باید قبل از فرار تقریباً 10^{38} بار با سدبرخوردکند (با آهنگ تقریبی 10^{21} بار درثانیه وبرای‌مدت تقریباً 10^{9} سال)!

این سد درمورد پراکندگی ذرهٔ α توسط هسته‌ها درجهت معکوس عمل می‌کند [بخشهای ۱.۳و۶.۱۱ (جلد دوم، ترجمهٔ فارسی) را ببینید]. چنانچه انرژی ذرات آلفایی که بر سد پتانسیل فرود می‌آیند خیلی کمتر از ارتفاع سد باشد، پراکندگی معمولا در میدان کولنی صورت می‌گیرد. در انرژیهای کم، تونل‌زدن در سد، به‌صورتی که نیروی هسته‌ای بین ذره وهدف بتواند سبب واکنش هسته‌ای شود، فرایندی نسبتاً غیرمحتمل است.

در تحلیل نظری واکنشهای هسته‌ای توسط ذرات باردار، برای محاسبهٔ احتمال نفوذ در سد از صورتبندیی مشابه واپاشی آلفا استفاده می‌شود. واکنشهای همجوشی، نظیر آنچه سبب آزادشدن انرژی در ستارگان می‌شود، نیز با استفاده از رهیافت نفوذ در سد تحلیل می‌شوند [بخش ۲.۱۴ (جلد دوم، ترجمهٔ فارسی) را ببینید].

ثابت فروپاشی یك نوع هستهٔ آلفا گسیل، بنا بر نظریهٔ یك‌جسمی، به‌صورت زیر است

$$\lambda = fP \qquad (۱۰.۸)$$

که در آن f بسامد برخورد ذرهٔ α به‌سد و P احتمال عبور از سد است.

معادلهٔ (۱۰.۸) یادآور بررسی نیمه کلاسیك است، ونشان می‌دهد که بحث ما برای $r<a$ بسیار شبیه «توپ بیلیارد» است. اما با بررسی جدی مکانیك موجی نیز دراین مورد نتیجهٔ تقریباً مشابهی به‌دست می‌آوریم. کمیت f تقریباً از مرتبهٔ v/a است که در آن v سرعت نسبی ذرهٔ α در داخل هسته‌است. می‌توانیم v را از انرژی جنبشی ذرهٔ آلفا در ناحیهٔ $r<a$ به‌دست آوریم. اگر عمق چاه را برابر $V_0 \approx ۳۵\ \mathrm{MeV}$ بگیریم، برای ذره‌ای با انرژی $Q = ۵\ \mathrm{MeV}$ داریم $f \approx ۶ \times ۱۰^{۲۱}/\mathrm{s}$. بعداً خواهیم‌دید که برای بررسی نظریه، نیازی به‌شناخت دقیق f نیست.

احتمال نفوذ در سد P را باید از محاسبهٔ کوانتوم مکانیکی، مشابه مسئلهٔ یك‌بعدی بخش ۳.۲، به‌دست آورد. ابتدا از نتیجهٔ مسئلهٔ یك بعدی که به‌صورت معادلهٔ (۳۹.۲) است، برای تخمین احتمال P استفاده می‌کنیم. البته، محاسبهٔ منجر به‌معادلهٔ (۳۹.۲) برمبنای سد راستگوشهٔ یك بعدی بود که برای پتانسیل $۱/r$ کولنی مستقیماً قابل‌استفاده نیست، ولی با این کار می‌توانیم دستکم براوردی تقریبی ازمرتبهٔ بزرگی داشته باشیم. این‌نتیجه با معادلهٔ (۳۹.۲)، به پهنای سد و به‌ارتفاع سد (برای سد راستگوشه آن را به‌صورت V_0 در نظر می‌گیریم) که بالاتر از انرژی E ذره است، بستگی دارد. سد کولنی شکل ۳.۸ در $r=a$ دارای ارتفاع B است

$$B = \frac{۱}{۴\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{zZ'e^۲}{a} \qquad (۱۱.۸)$$

دراین رابطه ذرهٔ α دارای بار ze، و هستهٔ دختر که مولد دافعهٔ کولنی است دارای بار $Z'e=(Z-z)e$ است. بنابراین ارتفاع سد ازمقدار $(B-Q)$ بالاتر ازانرژی ذره در $r=a$ تا صفر در $r=b$ تغییر می‌کند، و برای آن‌می‌توان‌ارتفاع‌متوسطی برابر $(B-Q)/۲$ در نظر گرفت. به‌طور مشابه می‌توان یك پهنای متوسط برابر $(b-a)/۲$ انتخاب کرد. بنابراین عامل $k_۲$ در معادلهٔ (۳۹.۲) به‌صورت $\sqrt{(۲m/\hbar^۲)\cdot(B-Q)/۲}$ درمی‌آید. برای یك‌نمونهٔ هستهٔ‌سنگین ($Z=۹۰$، $a=۷٫۵\ \mathrm{fm}$)، ارتفاع‌سد B درحدود $۳۴\mathrm{MeV}$ و درنتیجه $k_۲$ درحدود $۱٫۶\ \mathrm{fm}^{-۱}$ است. شعاع b که در آن ذرهٔ α سد را «ترك می‌کند»

با مساوی گرفتن انرژی ذره و انرژی پتانسیل قابل محاسبه است

$$b=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{zZ'e^2}{Q} \qquad (12.8)$$

برای مورد نمونه‌ای یك هستهٔ سنگین با $Q\approx 6\ \mathrm{MeV}$ داریم $b=42\ \mathrm{fm}$. بنابراین $k_2\cdot\frac{1}{2}(b-a)\gg 1$ است و می‌توان معادلهٔ (۳۹.۲) را به‌صورت تقریبی زیر نوشت

$$P\cong e^{-2k_2\cdot(1/2)(b-a)} \qquad (13.8)$$

زیرا بزرگی عوامل موجود درجلوی تابع نمایی ازمرتبهٔ واحد است. برای موردی که در اینجا بررسی می‌کنیم، داریم $P\sim 2\times 10^{-25}$ ودرنتیجه $\lambda\sim 10^{-3}/\mathrm{s}$ و $t_{1/2}\sim 700\ \mathrm{s}$. یك تغییر مختصر Q و تنزل آن به $5\ \mathrm{MeV}$ مقدار P را به 1×10^{-30} و $t_{1/2}$ را به‌حدود $10^8\mathrm{s}$ تغییر می‌دهد. حتی این محاسبهٔ تقریبی می‌تواند، مطابق شکل ۱.۸، تغییر چندین مرتبه‌ای بزرگی $t_{1/2}$ را برای انرژیهای بین $Q=5\ \mathrm{MeV}$ و $Q=6\mathrm{MeV}$ توجیه کند.

محاسبهٔ دقیق کوانتوم مکانیکی، از لحاظ روح مطلب، بسیار مشابه براورد تقریبی فوق است. می‌توانیم سد کولنی را به‌صورت دنباله‌ای از سدهای راستگوشهٔ بینهایت کوچك با ارتفاع $V(r)=zZ'e^2/4\pi\varepsilon_0 r$ پهنای dr درنظر بگیریم. احتمال نفوذ درهرسد بینهایت کوچك بین r و $r+dr$ عبارت است از

$$dP=\exp\left\{-2\,dr\sqrt{\left(\frac{2m}{\hbar^2}\right)[V(r)-Q]}\right\} \qquad (14.8)$$

احتمال نفوذ درکل سد برابر است با

$$P=e^{-2G} \qquad (15.8)$$

که درآن ضریب گاموف G عبارت است از

$$G=\sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}}\int_a^b[V(r)-Q]^{1/2}dr \qquad (16.8)$$

ضریب گاموف به‌صورت زیر قابل محاسبه است

$$G=\sqrt{\frac{2m}{\hbar^2 Q}}\cdot\frac{zZ'e^2}{4\pi\varepsilon_0}\left[\arccos\sqrt{x}-\sqrt{x(1-x)}\right] \qquad (17.8)$$

که درآن $x=a/b=Q/B$ است. درصورتی که مانند بیشتر واپاشیهای موردنظر $x\ll 1$ باشد، کمیت داخل کروشه درمعادلهٔ (۱۷.۸) برابر $(\pi/2)-2x^{1/2}$ است. بنابراین، نتیجهٔ

محاسبهٔ کوانتوم مکانیکی برای نیمه‌عمر واپاشی آلفازا چنین می‌شود

$$t_{1/2} = 0.693\,\frac{a}{c}\sqrt{\frac{mc^2}{2(V_0+Q)}}\exp\left\{2\sqrt{\frac{2\,mc^2}{(\hbar c)^2 Q}}\,\frac{zZ'e^2}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{\pi}{2}-2\sqrt{\frac{Q}{B}}\right)\right\} \qquad (18.8)$$

نتیجهٔ این‌محاسبه برای ایزوتوپهای زوج Th درجدول ۲.۸ نشان‌داده شده‌است. سازگاری بین نتایج تجربی و نظری دقیق نیست، ولی محاسبه قادر به‌بازتولید روند نیمه‌عمرها در گستره‌ای بیش‌از ۲۰ مرتبهٔ بزرگی با اختلاف ۱ تا ۲ مرتبهٔ بزرگی است. دراین محاسبه جزئیات مهمی‌را نادیده گرفتیم: تابع‌موجهای‌اولیه و نهایی‌هسته را درنظر نگرفتیم(قاعدهٔ طلایی‌فرمی، معادلهٔ (۷۹.۲)، باید برای‌ارزیابی احتمال واپاشی مورد استفاده‌قرار گیرد)، تکانهٔ زاویه‌ای ذرهٔ آلفای خروجی را درنظر نگرفتیم، و هسته‌را کره‌ای به‌شعاع میانگین $1.25\,A^{1/3}$fm فرض‌کردیم. تقریب اخیر برنیمه عمرهای محاسبه شده تأثیر اساسی‌دارد. هسته‌های با $A \gtrsim 230$ شدیداً تغییرشکل‌یافته‌اند ونیمه‌عمرهای محاسبه‌شده نسبت به‌تغییرات کوچك درشعاع میانگینِ فرضی فوق‌العاده حساس‌اند. برای مثال، تغییر شعاع‌میانگین به $1.20\,A^{1/3}$ (تغییر ۴٪ در مقدار a) نیمه‌عمر را با ضریب ۵ تغییر می‌دهد! در حقیقت، به‌علت این‌حساسیت شدید، روش‌کاراغلب معکوس می‌شود ــ یعنی‌نیمه‌عمرهای‌اندازه‌گیری شده غالباً برای استنتاج شعاع هسته مورد استفاده قرار می‌گیرند. آنچه از محاسبه حاصل

جدول ۲.۸ نیمه‌عمرهای محاسبه‌شده برای واپاشی آلفازای ایزوتوپهای Th.

A	Q(MeV)	$t_{1/2}$(s) اندازه‌گیری‌شده	$t_{1/2}$(s) محاسبه شده
۲۲۰	۸.۹۵	10^{-5}	3.3×10^{-7}
۲۲۲	۸.۱۳	2.8×10^{-3}	6.3×10^{-5}
۲۲۴	۷.۳۱	۱.۰۴	3.3×10^{-2}
۲۲۶	۶.۴۵	۱۸۵۴	6.0×10^{1}
۲۲۸	۵.۵۲	6.0×10^{7}	2.4×10^{6}
۲۳۰	۴.۷۷	2.5×10^{12}	1.0×10^{11}
۲۳۲	۴.۰۸	4.4×10^{17}	2.6×10^{16}

می‌شود، با فرض اینکه توزیع بار را دارای لبهٔ تیز درنظر بگیریم، بیشتر شبیه مجموع شعاعهای هستهٔ X' و ذرهٔ α است. سپس این نتیجه را می‌توان برای به‌دست آوردن برآوردی از شعاع هسته به‌کار برد.[1]

اگرچه این نظریهٔ بسیار ساده کاملا صحیح نیست، ولی برآورد خوبی از نیمه‌عمرهای واپاشی به‌دست می‌دهد. همچنین ما را قادر می‌سازد که دلیل عدم تسری واپاشی به‌سایر ذرات سبك را، علی‌رغم مقدار مجاز Q، درك کنیم. برای مثال، در واپاشی $^{220}Th \rightarrow {}^{12}C + {}^{208}Po$ مقدار Q برابر ۳۲٫۱ MeV خواهد شد و بنا برمعادلهٔ (۱۸.۸) برای واپاشی کربن‌زای ^{220}Th داریم $t_{1/2} = 2.3 \times 10^{6} s$. این مقدار با ضریب 10^{13} طولانیتر از نیمه‌عمر واپاشی آلفازاست ودرنتیجه واپاشی به‌سهولت قابل مشاهده نیست.

این مد واپاشی که‌اخیراً مشاهده‌شده است، اولین‌نمونهٔ‌یك‌فرایند واپاشی خودبه‌خود با گسیل ذرهٔ سنگین‌تر از ذرهٔ آلفاست. ^{223}Ra معمولا با گسیل α با نیمه‌عمر ۱۱٫۲ روز واپاشیده‌می‌شود، ولی‌می‌دانیم‌فرایندواپاشی $^{223}Ra \rightarrow {}^{14}C + {}^{209}Pb$ نیز کشف‌شده‌است. احتمال این فرایند بسیار کوچك و درحدود 10^{-9} برابر واپاشی آلفازاست. شکل ۴.۸ نمایانگر کوشش قهرمانانه‌ای است که برای مشاهدهٔ این فرایند به‌کار رفته‌است. تأیید این مطلب که ذرهٔ گسیلی همان ^{14}C است، احتیاج به‌روش $\Delta E \cdot T$ دارد که درفصل ۷ معرفی شد. شکل ۴.۸ انتهای پرانرژی دنبالهٔ هذلولی مورد انتظار را برای مشاهدهٔ کربن نشان می‌دهد. باتوجه به جدول جرمهای اتمی، مقدار Q واپاشی برابر ۳۱٫۸ MeV محاسبه می‌شود که (پس از تصحیح پس‌زنی) انرژی جنبشی ^{14}C را برابر ۲۹٫۸ MeV به‌دست می‌دهد. درمقابل، انرژی گسیل ^{12}C را درحدود ۲۶MeV به‌دست‌می‌آوریم. کل ۱۱مورد واپاشی مشاهده شده در نتیجهٔ شش‌ماه شمارش با یك چشمهٔ ^{223}Ra به‌شدت ۳٫۳ μCi حاصل شده است، و این در حالی بود که این چشمه با ^{227}Ac به نیمه‌عمر ۲۱ سال که عضوی از سری طبیعی اکتینیم با هستهٔ اولیهٔ ^{235}U است درتعادل دیرپا بود.

با محاسبهٔ ضریب گاموف برای‌گسیل ^{14}C، احتمال واپاشی درحدود 10^{-3} برابر احتمال گسیل آلفا به‌دست می‌آید؛ اختلاف بین‌مقادیرنظری وعملی (10^{-9}) ناشی ازفرض تشکیل پیشینی ذره در هسته است. باید به‌خاطر داشته باشیم که نظریهٔ واپاشی آلفازا مبنی براین فرض بودکه ذرهٔ α قبل از واپاشی درهسته تشکیل‌می‌شود. این آزمایش نشان‌می‌دهد که احتمال تشکیل خوشهٔ ^{14}C درهسته نسبت به‌تشکیل پیشینی α برابر 10^{-6} است.[2]

گسیل ^{14}C ازچند هستهٔ دیگر نیز در این ناحیه مشاهده شده است، وگسیل‌پاره‌های واپاشی سنگینتر ازجمله ^{24}Ne هم گزارش شده است.

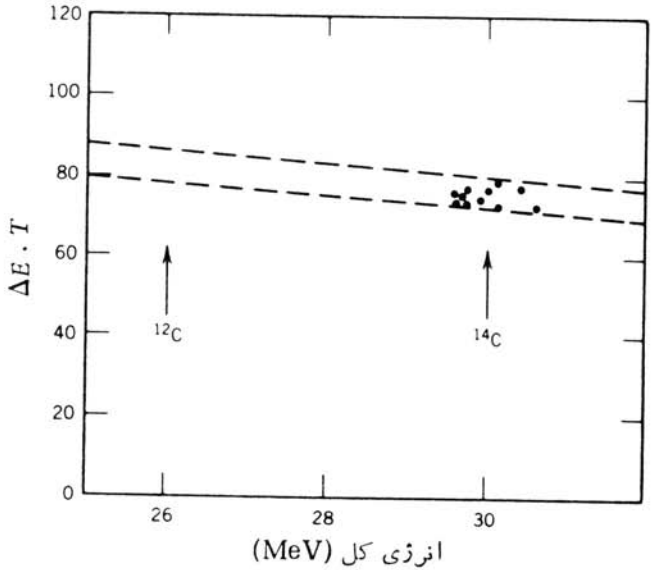
از سوی دیگر، می‌توانیم بااستفاده ازمعادلهٔ (۱۸.۸) وبا قراردادن $z = 1$، نیمه‌عمر

---

1. L. Marquez, *J. Phys. Lett.* 42, 181 (1981).

۲. برای مطالعهٔ شرح این آزمایش رجوع کنید به

H. J. Rose and G. A. Jones, *Nature*, 307, 245 (1984).

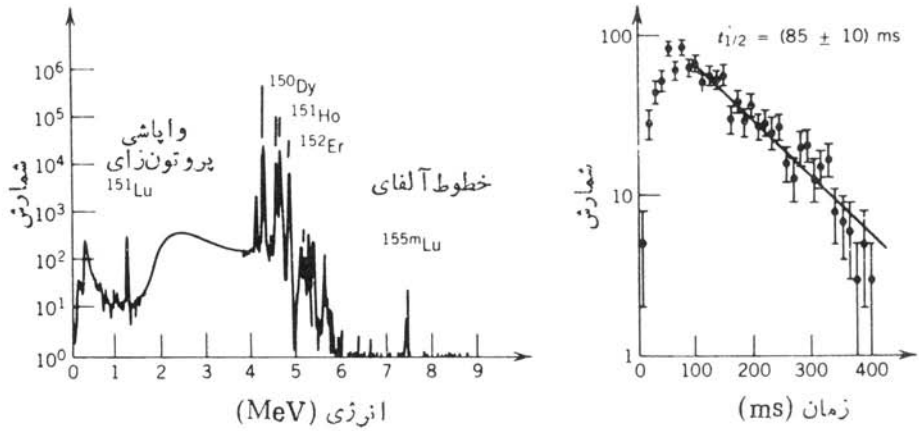


شکل ۴.۸ قسمتی از دنبالهٔهذلولی $\Delta E \cdot T$ که تعداد ذرات مورد مشاهدهٔ ^{14}C را دراثرواپاشی ^{223}Ra نشان می‌دهد. خط‌چینها حدود موردانتظارکربن را نشان‌می‌دهند. آشکارسازی ۱۱ مورد واپاشی ^{14}C در طی مدت ۶ ماه شمارش حاصل شده است.

واپاشی پروتون‌زا یا گسیل خودبه‌خود پروتون را از یك‌هستهٔ ناپایدار به‌دست آوریم. در این‌مورد، ارتفاع سد کولنی نصف ارتفاع متناظر به‌واپاشی آلفازاست، ولی‌دلیل قویتری مانع این‌نوع واپاشیهاست: مقدار Q واپاشی پروتون معمولا منفی‌است وبنابراین باتوجه به پایستگی انرژی این واپاشیها مطلقاً ممنوع‌اند. این نوع واپاشیها اخیراً در تعداد کمی از هسته‌های ناپایدار سرشار از پروتون، طی واکنشهای هسته‌ای بمباران هدف $N \approx Z$ باپرتابه‌های $N \approx Z$، مشاهده‌شده‌اند. واکنش اخیر یك هستهٔسنگین $N \approx Z$ با پیکربندی بسیار ناپایدار تولید می‌کند که با توجه به‌تلاش آن برای رهایی ازپروتون اضافی، گسیل پروتون ازآن به لحاظ انرژی امکان‌پذیر می‌شود. مقدار Q واپاشی پروتون‌زا را می‌توان با مختصراصلاحی درمعادلهٔ (۳.۸) به‌دست‌آورد. دراین‌صورت، مقدار Q را درست‌برابر انرژی جداسازی پروتون، معادلهٔ (۲۷.۳)، با علامت مخالف به‌دست می‌آوریم. بامقدار مثبت Q، واپاشی پروتون به لحاظ انرژی امکان‌پذیر است و درنتیجه دراین حالت انرژی جداسازی پروتون منفی است. بانگاهی به‌جدول جرم‌اتمی[1] معلوم می‌شود که فقط با موارد معدودی‌ازانرژی جداسازی‌منفی‌روبه‌رو می‌شویم، وحتی این‌موارد هم مستقیماً اندازه‌گیری نشده‌اند بلکه با برون‌یابی از هسته‌های پایدارتر به‌دست آمده‌اند.

درآزمایشی‌که هافمن و همکارانش گزارش کرده‌اند[2]، هدفی از ^{96}Ru با پرتابه‌های

1. A. H. Wapstra and G. Audi, *Nucl. Phys.*, A **432**, 1 (1985).
2. Hofmann *et al.*, *Z. Phys. A* **305**, 111(1982).

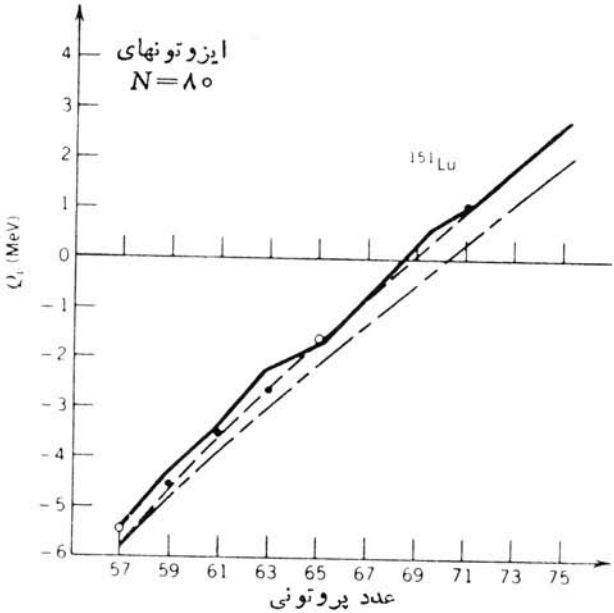


شکل ۵.۸ (چپ) طیف ذرات باردار گسیل شده در واپاشیهای محصولات واکنش هسته‌ای ^{58}Ni+^{96}Ru. قله‌های پس از ۴ MeV نمایندهٔ واپاشیهای آلفازاست؛ قلهٔ ۲٫۱ MeV از گسیل پروتون‌حاصل‌شده‌است. (راست) با توجه‌به‌افت‌قلهٔ‌پروتون درطی‌زمان، نیمه‌عمر واپاشی پروتون‌زا برابر ۸۵ ms به‌دست می‌آید.

^{58}Ni بمباران‌شد. شکل۵.۸ طیف‌ذرات‌سبك‌گسیل شده دراثراین‌واکنش را نشان می‌دهد. قله‌های پرانرژی‌تر مربوط به‌واپاشیهای آلفازا ازهسته‌های ناپایدار تولیدشده درواکنش درحوالی $A=150$ است. قلهٔ ۱٫۲۳۹ MeV، با استفاده‌از روش $\Delta E \cdot T$ که درفصل۷ معرفی شد، به‌عنوان قلهٔ پروتون شناخته شده است. نیمه‌عمر اندازه‌گیری شده، مطابق‌شکل ۵.۸، برابر ۸۵ ms است. براساس یك‌رشته دلایل‌غیرمستقیم، واپاشی مربوط به‌ایزوتوپ ^{151}Lu است؛ متأسفانه واکنشهایی از این نوع،محصولات مختلف متعددی تولید می‌کنند ومشخص‌کردن چشمهٔ تابشهای مشاهده شده معمولا کاری دشوار است. به‌این‌ترتیب، این آزمایش دلیلی بر واپاشی ^{151}Lu $\rightarrow$ ^{150}Yb+p فراهم می‌آورد.

مطالعهٔ واپاشیهایی از این نوع سبب پیشرفت شناخت ما از رده‌بندی جرم هسته‌ای وگسترش حدود قبلی آن می‌شود. به‌عنوان مثال، درموقع انجام این‌کار، ^{151}Lu در مقایسه باآخرین ایزوبار قبل از خودش (^{151}Er) دارای سه پروتون بیش از حد پایداری بود. شکل ۶.۸ مقادیر Q_p استنتاج شده از جرمهای معلوم وبرون‌یابیهای مبتنی‌بر رده‌بندی را نشان می‌دهد. مقدار مربوط به ^{151}Lu درست روی محاسبهٔ نظری قرار می‌گیرد، که این امر اعتماد به‌تعیین هویت ایزوتوپ ومحاسبهٔ نظری را تقویت می‌کند.

با استفاده از معادلهٔ (۱۸.۸)، مقدار نیمه‌عمر درحدود ۱٫۷ μs به‌دست می‌آید که تقریباً ۵ مرتبهٔ بزرگی کوچکتر از حد مورد انتظار است. به‌همین‌دلیل، این‌نظر مطرح‌شده است که تفاوت ساختار هسته‌ای حالات اولیه ونهایی (یا شاید تغییر بزرگ تکانهٔ‌زاویه‌ای دراثر واپاشی که نمونه‌هایی از آن دربخش‌بعدی مورد بحث قرار می‌گیرد) مانع از تحقق واپاشی می‌شود.



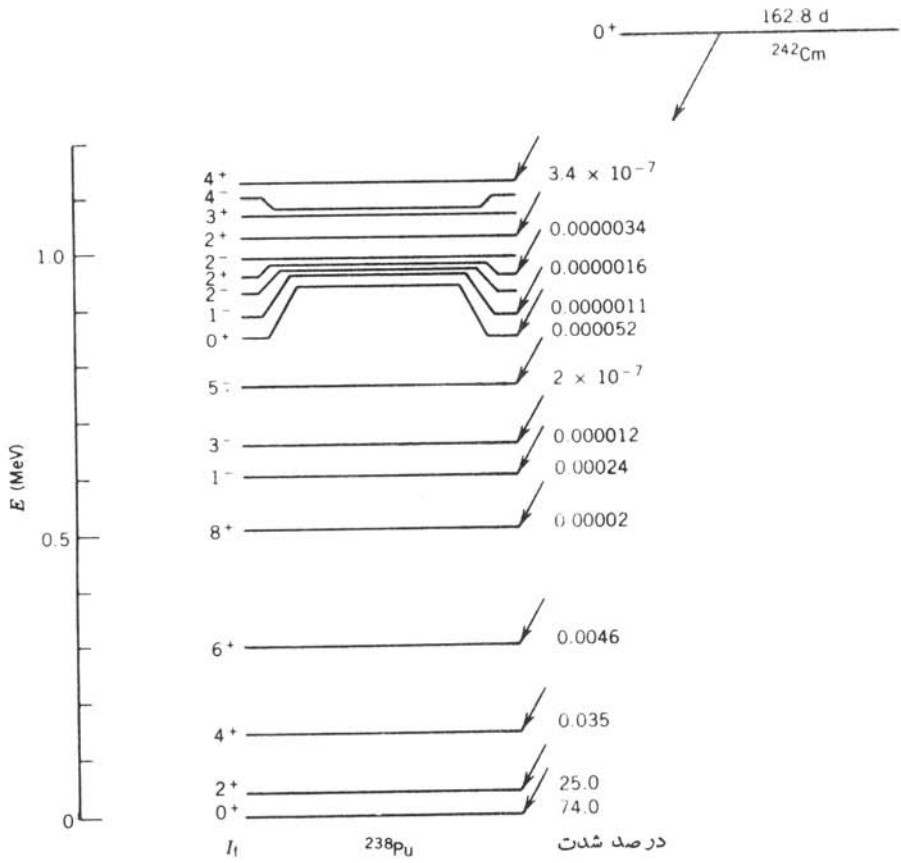
شکل۶.۸ انرژیهایی واپاشی پروتون‌زا درایزوتونهای $N=۸۰$. خطوط پر از محاسبات نظری مبتنی بر فرمولهای جرم هسته‌ای (مانند فرمول نیمه‌تجربی جرم) حاصل‌شده‌اند. انرژی‌واپاشی فقط برای ^{۱۵۱}Lu مثبت است.

۵.۸ تکانهٔ زاویه‌ای و پاریته در واپاشی آلفازا

تاکنون از بحث درمورد تکانهٔ زاویه‌ای ذرهٔ آلفا صرفنظر کرده‌ایم. دریك گذار از حالت اولیه با تکانهٔ زاویه‌ای I_i به‌حالت نهایی I_f، تکانهٔ زاویه‌ای ذرهٔ آلفا می‌تواند درگسترهٔ I_i+I_f تا $|I_i-I_f|$ قرار گیرد. هستهٔ ^{4}He از دو پروتون و دو نوترون تشکیل شده‌است که همهٔ آنها درحالت 1s هستند و براثر جفت‌شدگی تزویجی‌اسپین کل‌شان برابرصفراست. بدین‌ترتیب، اسپین ذرهٔ آلفا برابر صفر وتکانهٔ زاویه‌ای کل آن در فرایند واپاشی از نوع تکانهٔ زاویه‌ای مداری است که آن را با l_α نشان می‌دهیم. بنابراین، تابع موج ذرهٔ α با Y_{lm} نشان داده می‌شود که در آن $l=l_\alpha$ است. درنتیجه، تغییر پاریته درگسیل α به‌صورت $(-1)^{l_\alpha}$ است، و قاعدهٔ گزینش پاریته که‌گذارهای مجاز ومطلقاً ممنوع را با توجه به پایستگی پاریته مشخص می‌کند، چنین می‌شود: اگر پاریته‌های اولیه ونهایی یکسان باشند l_α بایدزوج، و در صورت مختلف‌بودن پاریته‌ها l_α باید فرد باشد.

درمطالعهٔ کاربرد این قواعد باید به خاطر داشته باشیم که یکی از ویژگیهای بسیار مهم واپاشی آلفازا را نادیده گرفته‌ایم، وآن این است که یك حالت اولیه می‌تواند به‌حالتهای نهایی بسیار متعددی در دخترهسته‌منجر شود. این‌خصوصیت‌راگاهی «ساختاردریز»

واپاشی آلفازا می‌نامیم، که البته ربطی به‌ساختار ریز اتمی ندارد. شکل ۷.۸ واپاشی آلفازای ^{242}Cm را نشان می‌دهد. اسپین حالت‌اولیه صفر است، ودر نتیجه‌تکانهٔ زاویه‌ای ذرهٔ آلفا، l_α، برابر تکانهٔ زاویه‌ای حالت هستهٔ نهایی I_f است. چنانکه ملاحظه می‌شود، حالتهای نهایی بسیار متعددی از ^{238}Pu قابل تصور است. واپاشیهای آلفازا، مقادیر Q متفاوت(که ازتفاضل‌مقدارQ واپاشی به‌حالت‌پایه، ۶٫۲۱۶ MeV، وانرژی برانگیختگی حالت برانگیخته به‌دست‌می‌آید) وشدتهای‌مختلف‌دارند. شدت به‌تابع‌موجهای حالات‌اولیه ونهایی وتکانهٔ زاویه‌ای l_α بستگی دارد. درمعادلهٔ (۶۰.۲) دیدیم که «پتانسیل‌مرکز گریز» $l(l+1)\hbar^2/2mr^2$ چگونه باید درمختصات کروی منظورشود. این‌جمله که‌همواره مثبت است، انرژی پتانسیل ناحیهٔ $a<r<b$ را افزایش و درنتیجه ضخامت سدی راکه باید درآن نفوذ شود افزایش می‌دهد. برای مثال حالات 0^+، 2^+، 4^+، 6^+، و 8^+ حالت پایهٔ یك نوار دورانی را درنظر بگیرید. واپاشی به حالت 2^+ به‌دو دلیل دارای شدتی کمتر



شکل۷.۸ واپاشی آلفازای ^{242}Cm به‌حالات برانگیختهٔ مختلف ^{238}Pu. شدت‌هرشاخهٔ‌واپاشی آلفازا درسمت راست تراز داده شده است.

از واپاشی به‌حالت پایه است: اول اینکه «پتانسیل مرکز گریز» ارتفاع سد را به‌میزان ۰٫۵ MeV افزایش می‌دهد، ودوم اینکه انرژی برانگیختگی مقدار Q را به‌اندازهٔ ۰٫۰۴۴ MeV کاهش می‌دهد. به‌همین دلایل، شدت واپاشی طی صعود در طول نوار و رسیدن به‌حالت $^{+}8$ به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد. اگر از نظریهٔ قبلی برای آهنگهای واپاشی استفاده کنیم، با درنظر گرفتن افزایش B مؤثر وکاهش Q، برای شاخه‌های واپاشی به‌طور نسبی براوردهای زیر را به‌دست می‌آوریم: برای حالت $^{+}0$ شدت ۷۶٪؛ برای $^{+}2$ شدت ۲۳٪؛ برای $^{+}4$ شدت ۱٫۵٪؛ برای $^{+}6$ شدت ۰٫۰۷۷٪؛ و برای $^{+}8$ شدت 8.4×10^{-5}٪. این نتایج با شدتهای مشاهده شده توافق دقیق ندارند ولی ایده‌ای تقریبی از منشأ کاهش شدت به‌دست می‌دهند.

در بالای نوار حالت پایه، شدتهای واپاشی آلفازا بسیار کوچك واز مرتبهٔ 10^{-6}٪ شدت واپاشی کل می‌شود. این مسئله ناشی ازهماهنگی ضعیف تابع‌موجهای اولیه ونهایی است ـ بسیاری از این‌حالات برانگیخته از ارتعاشات یا برانگیزشهای ذره‌ای زوج‌شکنی حاصل می‌شوند که هیچ شباهتی به حالت پایهٔ تزویج شدهٔ بدون ارتعاش $^{+}0$ در ^{242}Cm ندارند. باید به‌این نکته هم توجه داشت که برای برخی از حالتها تاکنون هیچ گونه‌شدت واپاشی مشاهده نشده است. این حالتها عبارت‌اند ازحالت $^{-}2$ در انرژیهای ۰٫۹۶۸ و ۰٫۹۸۶ MeV، حالت $^{+}3$ درا نرژی ۱٫۰۷۰ MeV و حالت $^{-}4$ در ۱٫۰۸۳ MeV. واپاشی آلفازا به‌این‌حالتها باتوجه به‌قاعدهٔ گزینش پاریته مطلقاً ممنوع است. برای‌مثال، واپاشی $0 \to 3$ باید دارای $l_\alpha = 3$ باشد که مستلزم تغییر پاریته بین‌حالتهای اولیه ونهایی است. بدین‌سان، واپاشی $^{+}0 \to {}^{-}3$ ممکن وواپاشی $^{+}0 \to {}^{+}3$ غیرممکن است. همین‌طور واپاشیهای $0 \to 2$ و $0 \to 4$ نمی‌توانند سبب تغییر پاریته شوند، و بنابراین واپاشیهای $^{+}0 \to {}^{-}2$ و $^{-}4 \to {}^{+}0$ مجاز نیستند.

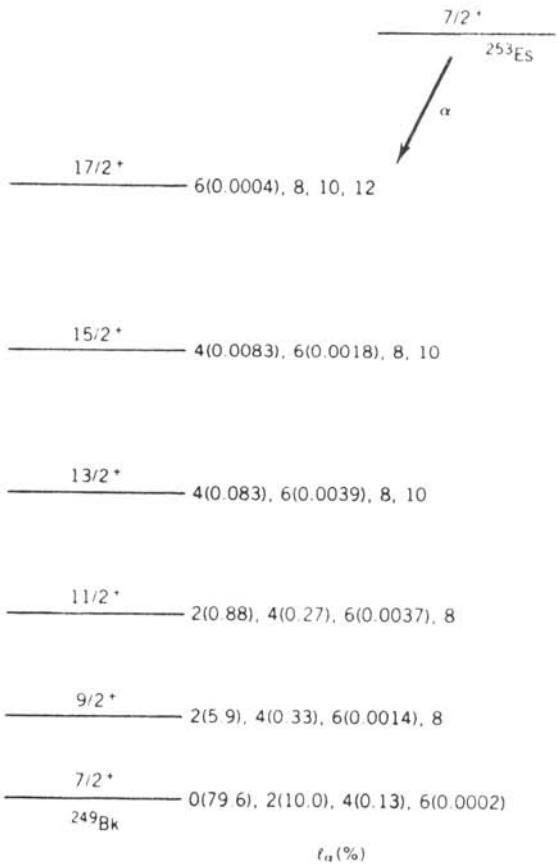
اگر اسپین هیچ‌یك از حالتهای اولیه ونهایی صفر نباشد، مسئله چندان ساده نیست وواپاشیهای مطلقاً ممنوع وجود ندارند. برای مثال در واپاشی $^{+}2 \to {}^{-}2$، l_α باید فرد باشد (به‌علت تغییر پاریته)، وطبق‌قوانین جفت شدگی تکانهٔ زاویه‌ای داریم $0 \leqslant l_\alpha \leqslant 4$. بنابراین، این‌واپاشی تحت‌شرایط l_α مساوی ۱ یا ۳ امکان‌پذیر است. سؤال بعدی که پیش‌می‌آید این است که کدام‌یك ازحالتهای l_α مساوی ۱ یا ۳ مرجح است ومیزان ترجیح چقدراست. بحث قبلی ما منجر به‌این شد که شدت $l_\alpha = 1$ تقریباً به‌اندازهٔ یك مرتبهٔ بزرگی از شدت $l_\alpha = 3$ بیشتر است. اما، اندازه‌گیری انرژی یا شدت واپاشی به تنهایی هیچ اطلاعی از چگونگی تقسیم شدت واپاشی کل بین مقادیر مجاز l_α به‌دست نمی‌دهد. برای تعیین سهم نسبی مقادیر مختلف l، باید توزیع زاویه‌ای ذرات α را اندازه بگیریم. گسیل ذرهٔ α با $l = 1$ را تابع $Y_1(\theta, \phi)$ تعیین می‌کند، درحالی که واپاشی آلفازای $l = 3$ از توزیع $Y_3(\theta, \phi)$ به‌دست‌می‌آید. اصولا، با تعیین‌توزیع فضایی‌این واپاشیها می‌توان اندازه‌های نسبی مقادیر مختلف l را تعیین کرد.

برای انجام این‌آزمایش باید ابتدا اسپین هسته‌های رادیواکتیو آلفازا را، مثلا با

روش به خط کردن دو قطبی مغناطیسی یـا گشتاورهای چارقطبی الکتریکی در یك میدان مغناطیسی یا در یك گرادیان میدان الکتریکی بلورین، همسو کنیم. حفظ همسویی اسپینها مستلزم سردسازی هسته‌ها تا دمایی‌است که در آن حرکت گرمایی برای برهم‌زدن نظم کافی نباشد. دراین‌حال، معمولا به دماهای کمتر از K ۰٫۰۱ نیاز داریم (یعنی کمتر از ۰٫۰۱ درجه بالاتر از دمای صفر مطلق!).

به‌عنوان مثالی از این‌نوع آزمایش، واپاشی ^{253}Es را به‌حالتهای پایهٔ نوار دورانی ^{249}Bk درنظر می‌گیریم. مقادیرمجاز l درشکل ۸.۸ نشان‌داده‌شده‌اند، ونتایج اندازه‌گیری توزیع زاویه‌ای ذرهٔ α به‌ما کمك می‌کنند تا سهم نسبی مقادیر مختلف l_α را تعیین کنیم.

از آنجاکه بسیاری از هسته‌های آلفا گسیل تغییر شکل یافته‌اند، اندازه‌گیری توزیع زاویه‌ای می‌تواند در پاسخ به‌سؤال دیگـر نیز به‌ما کمك کند: در یك هستهٔ پایدار کشیده



شکل ۸.۸ شدت مؤلفه‌های مختلف تکانهٔ زاویه‌ای در واپاشی ^{253}Es. برای $l_\alpha = 8$ و بـالاتر، شدتها معلوم نیستند ولی مقدار آنها را می‌توان فوق‌العاده کوچك گرفت.

(دراز شده)، آیا تعداد آلفاهای گسیل شده از محل قطب بیش از استواست؟ شکل ۹.۸ پاسخ ممکن به این سؤال را در اختیار می‌گذارد: در شعاع بزرگتر قطبی، ذرهٔ α با سد پتانسیل کولنی ضعیفتری روبه‌رو است. و بنابراین باید در سد نازکتر و کوتاهتری نفوذ کند. بنابراین انتظار داریم که گسیل قطبی محتملتر از گسیل استوایی باشد. شکل ۱۰.۸ توزیع زاویه‌ای گسیل آلفا را نسبت به‌محور تقارن نشان می‌دهد. چنانکه می‌بینید، همان‌طور که با توجه به پتانسیل انتظار می‌رود، گسیل ازمحل قطب ۳ تا ۴ بار محتملتر از گسیل از استواست.

۶.۸ طیف نمایی واپاشی آلفازا

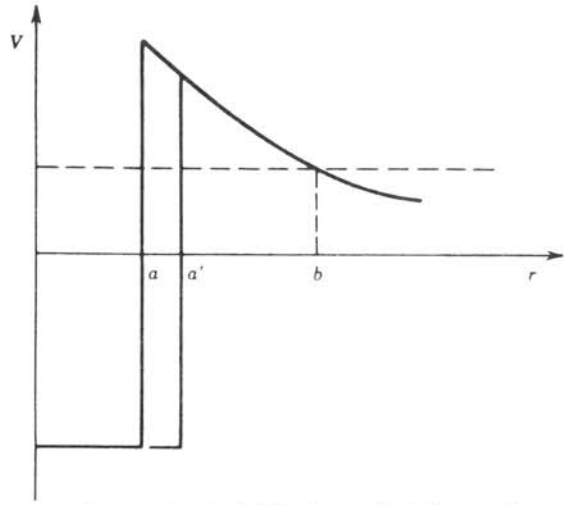
آخرین مطلب مورد بحث در واپاشی آلفازا این است که با مطالعهٔ واپاشی آلفازا چه اطلاعی از ترازهای هسته‌ای به‌دست می‌آوریم.

برای مثال، واپاشی ۵٫۳ ساعتی ^{۲۵۱}Fm را به ترازهای ^{۲۴۷}Cf در نظر می‌گیریم. (ترازهای ^{۲۴۷}Cf در اثر واپاشی بتازای ^{۲۴۷}Es نیز حاصل می‌شوند، ولی نیمه‌عمر این واپاشی برابر ۴٫۷ min و به‌اندازه‌ای کوتاه است که استفاده از آن در بررسی تفصیلی ساختار تراز ^{۲۴۷}Cf خیلی مشکل است.)

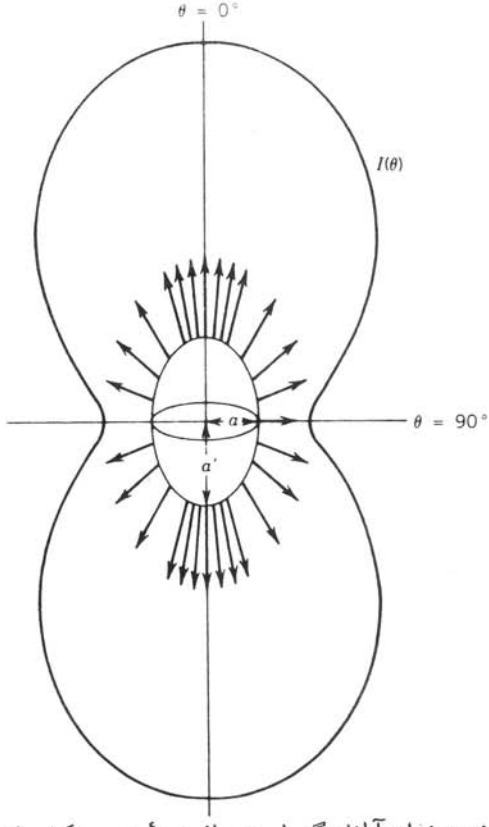
شکل ۱۱.۸ طیف انرژی حاصل از واپاشیهای آلفازای ^{۲۵۱}Fm را نشان می‌دهد. چنانکه می‌بینید، ۱۳ گروه متمایز ذرهٔ آلفا در این طیف قابل تشخیص‌اند، که هر گروه احتمالا واپاشی به‌یك حالت برانگیختهٔ خاص ^{۲۴۷}Cf را نشان می‌دهد. چگونه می‌توانیم این اطلاعات را برای بازسازی طرح تراز ^{۲۴۷}Cf به‌کار ببریم؟ براساس طیف α ابتدا باید انرژی وشدت هر گروه را پیدا کنیم. انرژی درمقایسه با واپاشیهای با انرژی معلوم به‌دست می‌آید (واپاشیهای ناشی از ناخالصی ^{۲۵۲}Fm برای این منظور می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد) وشدت با توجه به‌مساحت سطح هرقله به‌دست می‌آید. نتیجهٔ این تحلیل همراه با خطاهایی که اغلب ناشی از آمار شمارش هر قله است در جدول ۳.۸ نشان‌داده شده‌است. (توجه کنید که قویترین قله‌ها کمترین خطای نسبی را دارند.) برای یافتن انرژیهای واپاشی (یعنی، انرژیهای نسبی حالات هسته‌ای) باید از معادلهٔ (۷.۸) استفاده کنیم، زیرا انرژیهای قابل اندازه‌گیری ذرات آلفا فقط از نوع انرژی جنبشی‌اند. این مقادیر نیز در جدول ۳.۸ نشان‌داده شده‌اند.

حالات برانگیختهٔ مختلف ^{۲۴۷}Cf با گسیل فوتونهای پرتو گاما به‌سرعت به‌حالت پایه واپاشیده می‌شوند، بنابراین برای به‌دست‌آوردن طرح واپاشی اطلاع از انرژیها و شدتهای پرتوهای گاما نیز مفید است. شکل ۱۲.۸ پرتوهای گامای مشاهده شده، و جدول ۴.۸ انرژیها و شدتهای به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد.

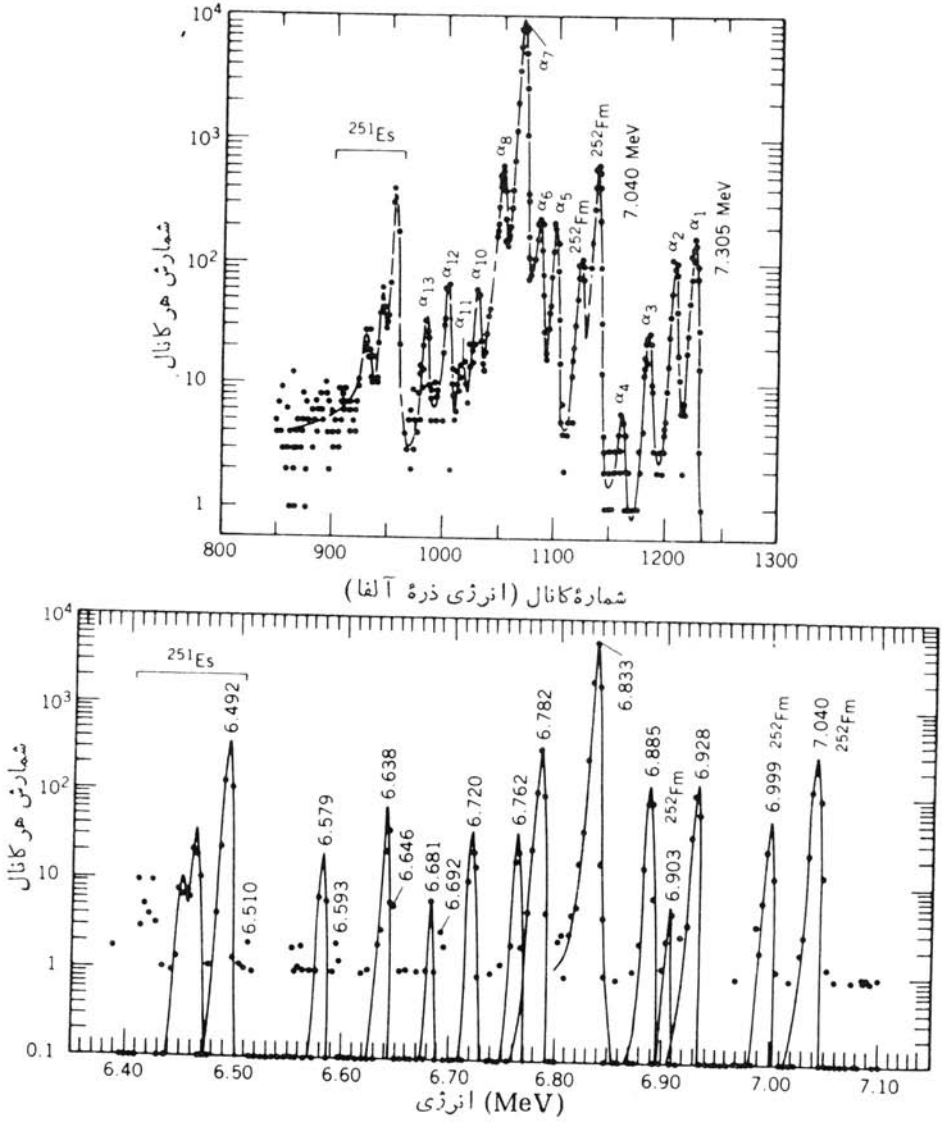
اکنون کار تجسس و ارزیابی ما آغاز می‌شود. دراینجا، چنانکه در مثال بعدخواهیم دید، درحالی که نهایت دقت را به‌خرج می‌دهیم فرض می‌کنیم که بالاترین انرژی واپاشی آلفازا به‌حالت پایهٔ ^{۲۴۷}Cf منجر شود. (این فرض در هسته‌های زوج-زوج بسیار خوب



شکل ۹.۸ دریك هستهٔ تغییرشکل‌یافته، ذرات آلفایی که ازمحل قطبها خارج‌می‌شوند درفاصلهٔ جدایی‌بزرگتر a' وارد سد کولنی می‌شوند، وبنابراین باید در سد کوتاهتر و نازکتری نفوذ کنند. بدین‌سان، احتمال مشاهدهٔ گسیل α درمحل قطبها بیشتر از محل استواست.



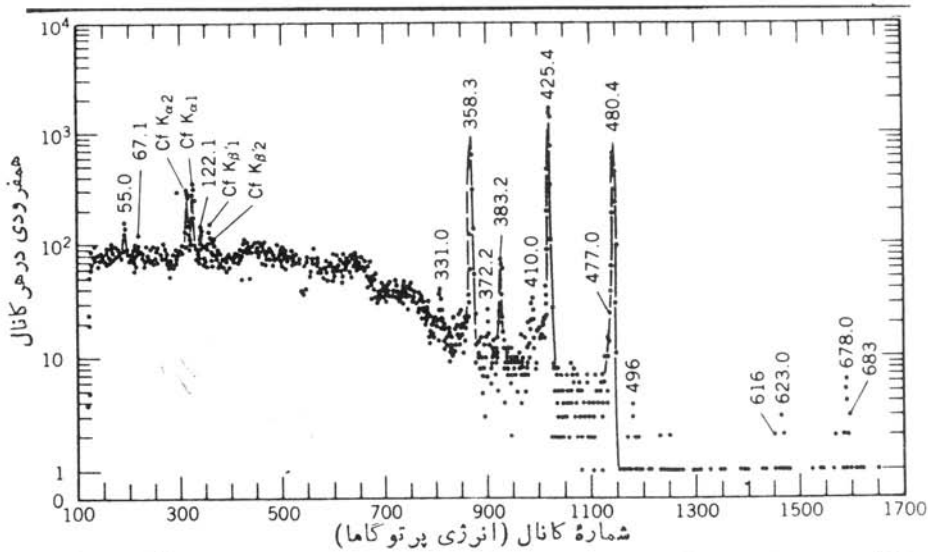
شکل ۱۰.۸ توزیع شدت ذرات آلفای گسیل شده از هستهٔ تغییرشکل یافته‌ای که درمرکز شکل قرار دارد. نمودار قطبی شدت، تأثیر بارز توزیع زاویه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱.۸ طیف آلفای ناشی از واپاشی ^{۲۵۱}Fm. قسمت بالا طیف مشاهده شده توسط یك آشکارساز Si را نشان می‌دهد. تصویر پایین نمایانگر قسمتی از همان طیف است که با طیف‌سنج مغناطیسی مشاهده شده‌است. تفکیك برتر انرژی در این آشکارساز، وجود واپاشی MeV۶٫۷۶۲ را که درطیف بالایی پوشیده می‌ماند پدیدار ساخته است.

جدول ۳.۸ واپاشیهای آلفازای ^{۲۵۱}Fm.

گروه α	انرژی α (keV)	انرژی واپاشی (keV)	انرژی حالت برانگیخته (keV)	شدت α (%)
$\alpha_{۱}$	۷۳۰۵±۳	۷۴۲۳	۰	۱٫۵±۰٫۱
$\alpha_{۲}$	۷۲۵۱±۳	۷۳۶۸	۵۵	۰٫۹۳±۰٫۰۸
$\alpha_{۳}$	۷۱۸۴±۳	۷۳۰۰	۱۲۳	۰٫۲۹±۰٫۰۳
$\alpha_{۴}$	۷۱۰۶±۵	۷۲۲۱	۲۰۲	~۰٫۰۵
$\alpha_{۵}$	۶۹۲۸±۲	۷۰۴۰	۳۸۳	۱٫۸±۰٫۱
$\alpha_{۶}$	۶۸۸۵±۲	۶۹۹۶	۴۲۷	۱٫۷±۰٫۱
$\alpha_{۷}$	۶۸۳۳±۲	۶۹۴۴	۴۷۹	۸۷٫۰±۰٫۹
$\alpha_{۸}$	۶۷۸۲±۲	۶۸۹۲	۵۳۱	۴٫۸±۰٫۲
$\alpha_{۹}$	۶۷۶۲±۳	۶۸۷۲	۵۵۲	۰٫۳۸±۰٫۰۶
$\alpha_{۱۰}$	۶۷۲۰±۳	۶۸۲۹	۵۹۴	۰٫۴۴±۰٫۰۴
$\alpha_{۱۱}$	۶۶۸۱±۴	۶۷۸۹	۶۳۴	۰٫۰۷±۰٫۰۳
$\alpha_{۱۲}$	۶۶۳۸±۳	۶۷۴۵	۶۷۸	۰٫۵۶±۰٫۰۶
$\alpha_{۱۳}$	۶۵۷۹±۳	۶۶۸۶	۷۳۸	۰٫۲۶±۰٫۰۴



شکل ۱۲.۸ طیف پرتوگامای ناشی از ^{۲۵۱}Fm در همفرودی با تمام واپاشیهای آلفازا در گسترهٔ ۶٫۵ تا ۷٫۷ MeV. این طیف با استفاده از آشکارساز Ge(Li) به‌دست آمده است.

جدول ۴.۸ پرتوهای گامای ^{۲۴۷}Cf در پی واپاشی آلفازای ^{۲۵۱}Fm.

انرژی (keV)	شدت (درصد واپاشیها)	انرژی (keV)	شدت (درصد واپاشیها)
۵۵٫۰ ± ۰٫۲	۰٫۵۸ ± ۰٫۰۸	۴۲۵٫۴ ± ۰٫۱	۵۱ ± ۴
۶۷٫۱ ± ۰٫۲	۰٫۲۸ ± ۰٫۰۵	۴۷۷٫۰ ± ۰٫۳	۰٫۵۴ ± ۰٫۰۸
۱۲۲٫۱ ± ۰٫۲	۰٫۲۸ ± ۰٫۰۵	۴۸۰٫۴ ± ۰٫۱	۲۱ ± ۲
۳۳۱٫۰ ± ۰٫۳	۰٫۳۵ ± ۰٫۰۷	۴۹۶ ± ۱	~۰٫۰۸
۳۵۸٫۳ ± ۰٫۱	۱۷ ± ۱٫۵	۶۱۶ ± ۱	~۰٫۰۵
۳۷۲٫۲ ± ۰٫۴	۰٫۲۵ ± ۰٫۰۵	۶۲۳٫۰ ± ۰٫۸	۰٫۰۷ ± ۰٫۰۲
۳۸۲٫۲ ± ۰٫۳	۱٫۲ ± ۰٫۱۳	۶۷۸٫۰ ± ۰٫۸	۰٫۲۶ ± ۰٫۰۶
۴۱۰٫۰ ± ۰٫۳	۰٫۵۰ ± ۰٫۰۷	۶۸۳ ± ۱	~۰٫۰۴

است، زیرا واپاشیهای آلفازای $۰^+ \rightarrow ۰^+$ بسیار قوی هستند وهیچگونه ممنوعیتی دراثر تفاوت تابع‌موجهای حالتهای ابتدایی و انتهایی هسته به‌وجودنمی‌آید. درهسته‌های A فرد، حالتهای پایهٔ ابتدایی و انتهایی ممکن است خصوصیات بسیار متفاوتی داشته باشند، به طوری‌که احتمال واپاشی به‌حالت پایه بسیار ضعیف یا صفر شود.) واپاشی کم‌انرژیتر نسبت به حالت پایه فقط ۵۵ keV تفاوت انرژی دارد. اگر فرض‌کنیم که این واپاشی به‌اولین‌حالت برانگیخته منجرشود، آنگاه بامشاهدهٔ انرژی ۵۵ keV دربین گذارهای گاما بسیارخوشحال خواهیم‌شد، زیرا این گذار نمایندهٔعبور از اولین‌حالت برانگیخته به‌حالت پایه‌است. واپاشی آلفازای بعدی به‌حالت برانگیخته‌ای‌که ۱۲۳ ± ۳ keV بالاتر ازحالت پایه است منجر می‌شود، ودربین پرتوهای گاما هم انرژی ۱۲۲٫۱ keV وجود داردکه‌با گذار از دومین حالت برانگیخته به‌حالت پایه متناظر است. همچنین با انرژی گذار (۵۵٫۰ keV − ۱۲۲٫۱ =) ۶۷٫۱ keV روبه‌رومی‌شویم‌که ناشی ازگذار بین دومین و اولین حالت برانگیخته است.

فرض‌می‌کنیم که این‌سه‌حالت (باانرژیهای‌فرضی‌صفر، ۵۵٫۰ keV، و۱۲۲٫۱ keV) یك نوار دورانی تشکیل می‌دهند، که مطابق بحثی که در بخش ۳.۵ در مورد هسته‌های A فرد تغییرشکل‌یافته مطرح کردیم، دارای حالتهایی با تکانهٔ زاویه‌ای $I = \Omega, \Omega+۱, \Omega+۲, \ldots$ هستندکه درآنها Ω مؤلفهٔ تکانهٔ زاویه‌ای ذرهٔ فرد در امتداد

محور تقارن است. در این‌صورت، تفاوت انرژی بین‌حالت پایه واولین حالت برانگیخته برابر است با

$$\Delta E_{۲۱} \equiv E_{۲} - E_{۱} = \frac{\hbar^{۲}}{۲\mathcal{J}}[(\Omega+۱)(\Omega+۲)-\Omega(\Omega+۱)]$$

$$= \frac{\hbar^{۲}}{۲\mathcal{J}}\, ۲(\Omega+۱) \qquad (۱۹.۸)$$

که در آن انرژی‌حالتهای دورانی را به‌صورت $E=(h^{۲}/۲\mathcal{J})I(I+۱)$ درنظر گرفته‌ایم. به‌همین‌ترتیب، تفاوت انرژی بین حالت پایه ودومین حالت برانگیخته برابراست با

$$\Delta E_{۳۱} \equiv E_{۳} - E_{۱} = \frac{\hbar^{۲}}{۲\mathcal{J}}[(\Omega+۲)(\Omega+۳)-\Omega(\Omega+۱)]$$

$$= \frac{\hbar^{۲}}{۲\mathcal{J}}\, ۲(۲\Omega+۳) \qquad (۲۰.۸)$$

از ترکیب این‌نتایج با مقادیر تجربی، $\Delta E_{۲۱} = ۵۵٫۰\ \mathrm{keV}$ و $\Delta E_{۳} = ۱۲۲٫۱\ \mathrm{keV}$، خواهیم‌داشت $\Omega = ۳٫۵ \pm ۰٫۲$ (یعنی $\Omega = ۷/۲$) و $\hbar^{۲}/۲\mathcal{J} = ۶٫۱۱ \pm ۰٫۰۲\ \mathrm{keV}$. بنا براین، به‌نظرمی‌رسد که این‌سه‌حالت‌یك‌نوار دورانی با $I = ۷/۲, ۹/۲, ۱۱/۲$ را تشکیل می‌دهند. با نتایج به‌دست آمده می‌توان انرژی حالت ۱۳/۲ را پیش‌بینی کرد

$$\Delta E_{۴۱} = \frac{\hbar^{۲}}{۲\mathcal{J}}\left[\frac{۱۳}{۲}\cdot\frac{۱۵}{۲}-\frac{۷}{۲}\cdot\frac{۹}{۲}\right] = ۲۰۱٫۶\ \mathrm{keV}$$

وبرای حالت ۱۵/۲

$$\Delta E_{۵۱} = \frac{\hbar^{۲}}{۲\mathcal{J}}\left[\frac{۱۵}{۲}\cdot\frac{۱۷}{۲}-\frac{۷}{۲}\cdot\frac{۹}{۲}\right] = ۲۹۳٫۳\ \mathrm{keV}$$

ظاهراً حالت ۱۳/۲ از واپاشی بسیار ضعیف $\alpha_{۴}$ حاصل می‌شود، ولی‌واپاشیهای گاما ازآن ممکن است آنچنان ضعیف باشد که اثری از آن درطیف شکل ۱۲.۸ مشاهده نشود. واپاشی به‌حالت ۱۵/۲ هنوز مشاهده نشده است.

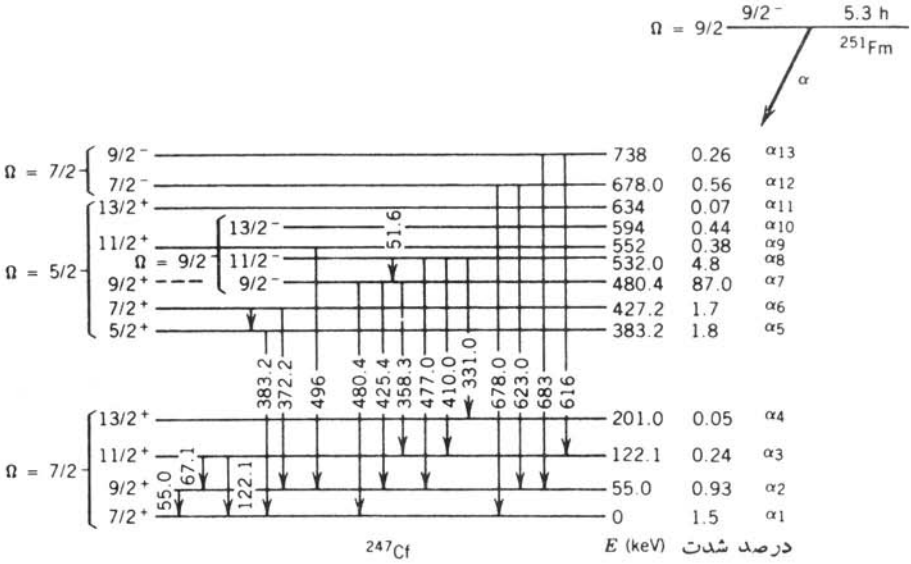
حالات باقیمانده را می‌توان به‌کمك مطالعات همفرودی α - γ تفسیر کرد، که‌در آن به‌طور الکترونیکی گذارهایی از γ را انتخاب می‌کنیم که درفاصلهٔ‌زمانی کوتاهی (دراین مورد درفاصلهٔ ۱۱۰ ns) پس از واپاشی α رخ می‌دهند. از آنجا که این زمان در مقایسه با طول عمر مشخصهٔ حالات هسته‌ای طولانی است، کلیهٔ پرتوهای γ که به‌دنبال واپاشی آلفازا گسیل می‌شوند ثبت‌خواهند شد (حتی آنهایی که مانند گسیل‌دو گامای پیاپی به‌طور غیرمستقیم گسیل می‌شوند). ارتباط همفرودیهای مشاهده شده به‌شرح زیر است:

دریچهٔ همفرودی	پرتوهای گاما (keV)
α_5	۳۸۳٫۲
α_6	۳۷۲٫۲، ۳۸۳٫۲
α_7	۵۵٫۰، ۶۷٫۱، ۱۲۲٫۱، ۳۵۸٫۳، ۴۲۵٫۴، ۴۸۰٫۴
α_8	۳۳۱٫۰، ۳۵۸٫۳، ۴۱۰٫۰، ۴۲۵٫۴، ۴۷۷٫۰، ۴۸۰٫۴
α_{12}	۶۲۳٫۰، ۶۷۸٫۰

واپاشی α_5 منجر به‌حالت برانگیخته‌ای با انرژی ۳۸۳٫۲ keV می‌شود که مستقیماً با گسیل یك پرتو γ به‌حالت پایه می‌رود. واپاشی α_6 منجر به حالتی با انرژی ۴۲۷ keV می‌شود، ولی پرتو گامای همفرود با این انرژی که نمایندهٔ گذار مستقیم به‌حالت پایه‌است، وجود ندارد. اما با گذاری با انرژی ۳۷۲٫۲ keV روبه‌رو می‌شویم که وقتی به ۵۵٫۰keV افزوده شود، مقدار ۴۲۷٫۲ keV که به‌انرژی این حالت بسیار نزدیك‌است حاصل می‌شود. بنا براین، نتیجه می‌گیریم که این حالت برانگیخته باانرژی ۴۲۷٫۲keV به‌اولین‌حالت برانگیخته با انرژی ۵۵٫۰ keV واپاشیده می‌شود. به‌علاوه، یك گذار همفرودی در انرژی ۳۸۳٫۲ keV هم وجود دارد که در این صورت این حالت ۴۲۷٫۲ keV باید با گسیل یك پرتو γ با انرژی ۴۴٫۰keV = ۳۸۳٫۲ − ۴۲۷٫۲ به‌حالت تثبیت‌شدهٔ قبلی در ۳۸۳٫۲keV واپاشیده‌شود؛ این‌پرتوγ هنوزمشاهده‌نشده‌است. واپاشی α_7 به‌حالت ۴۸۰٫۴keV، واپاشی به‌حالت‌پایه وحالتهای ۵۵٫۰و۱۲۲٫۱keV را نشان می‌دهد (۴۸۰٫۴ = ۵۵٫۰ + ۴۲۵٫۴ و ۴۸۰٫۴ = ۱۲۲٫۱ + ۳۵۸٫۳). همین‌طور، واپاشی a_8 به‌حالت ۵۳۲٫۰ keV، نمایانگر گذارهای مستقیم به حالتهای پایینتر (۵۳۲٫۰ = ۲۰۱٫۰ + ۳۳۱٫۰؛ ۵۳۲٫۰ = ۱۲۲٫۱ + ۴۱۰٫۰؛ ۵۳۲٫۰ = ۵۵٫۰ + ۴۷۷٫۰) است، درحالی که‌واپاشی مستقیم به‌حالت‌پایه وجود ندارد. این واپاشی همچنین گذارهای همفرودی ناشی از تراز ۴۸۰٫۴ keV را نشان می‌دهد، که دراین‌صورت باید گذاری باانرژی (۴۸۰٫۴ − ۵۳۲٫۰ =) ۵۱٫۶keV نیزوجود داشته باشد. به‌طور مشابه، سایر واپاشیهای آلفازا و بتازا را بررسی می‌کنیم. شکل۱۳.۸ همین طرحهای واپاشی را نشان می‌دهد.

برای‌حالات بالاتر از نوارحالت‌پایه، تعیین‌اسپین وتکانهٔ زاویه‌ای ذاتی Ω به‌آسانی نواردورانی حالت پایه نیست. برای این‌منظور، به‌اطلاعات دیگری از واپاشیهای گامازا نیاز داریم؛ که اندازه‌گیریهای مربوط به‌آنها در فصل ۱۰ مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

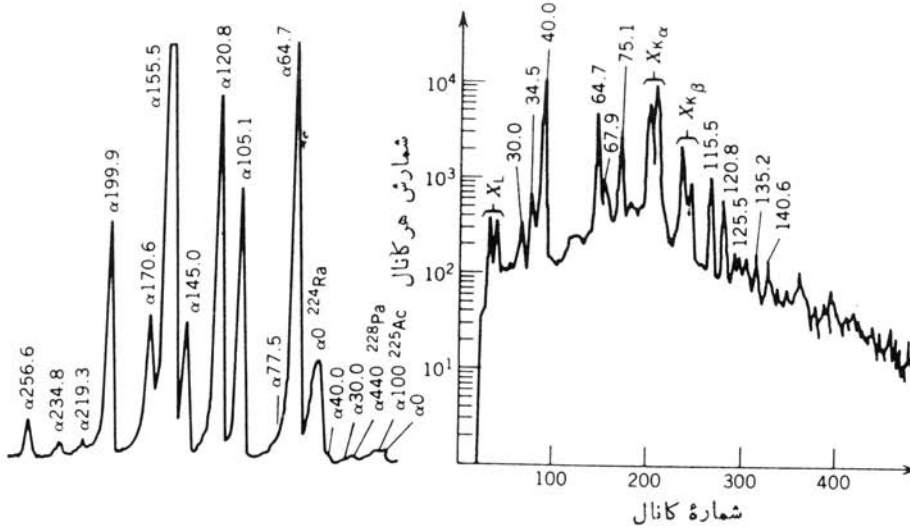
به شاخهٔ قوی α در انرژی ۴۸۰٫۴ keV توجه کنید. دلیل این امر، یکسان‌بودن تابع‌موجهای حالات ابتدایی و انتهایی است ــ که هردوازحالت تك ذره‌ای تغییرشکل‌یافتهٔ



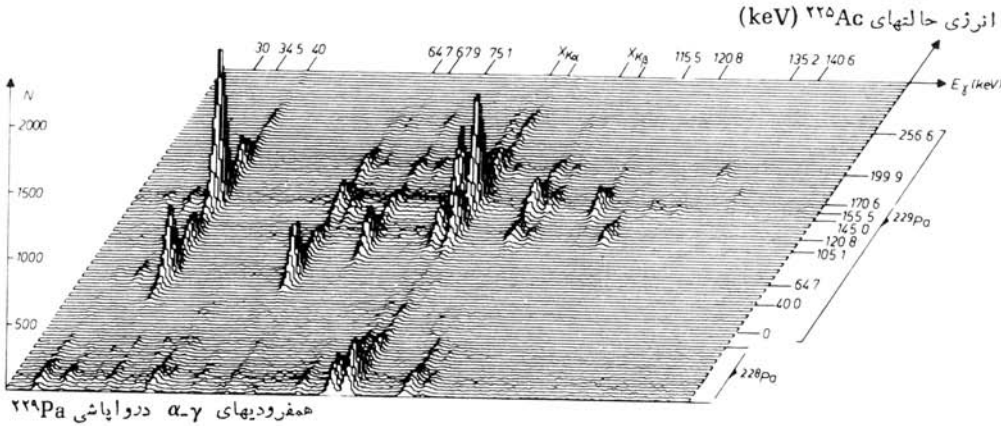
شکل ۱۳.۸ طرح واپاشی ^{251}Fm به‌ترازهـای ^{247}Cf که از طیف‌نمایی α و γ استنتاج شده است. اسپین ترازهای بالاتر با استفاده از تکنیکهای پرتو γ و تبدیل داخلی که در فصل ۱۰ توضیح داده شده‌اند، تعیین شده است.

$\Omega = 9/2$ حاصل می‌شوند ـ ودرنتیجه بیش از ۹۳٪ شدت واپاشی به‌حالتهای به‌اصطلاح نوار «ترجیحی» منتهی می‌شوند. آهنگهای واپاشی‌مشاهده شده را می‌توان بامقادیر حساب شدهٔ حالتهای مختلف تك ذرهٔ تغییرشکل‌یافته‌که با استفاده از تابع‌موجهای نیلسون به‌دست می‌آیند مقایسه‌کرد، که عموماً سازگاری خوبی بین‌اندازه‌گیری ومحاسبه برای هردو نوع واپاشیهای ترجیحی و غیر ترجیحی وجود دارد. همین مقایسهٔ بین نظریه و تجربه است‌که تعیین حالات تك‌ذره‌ای را امکان‌پذیرمی‌سازد، زیرا مقدار ذاتی Ω وکمیت نیلسون‌مستقیماً قابل اندازه‌گیری نیستند.

مثال دیگری از مطالعهٔ طیف‌نمایی هسته‌ای با استفاده از واپاشی آلفازا درشکلهای ۱۴.۸ تـا ۱۶.۸ نشان‌داده شده است. شکل ۱۴.۸ طیفهـای α و γ نـاشی از واپـاشی $^{229}Pa \rightarrow {}^{225}Ac$ را نشان می‌دهد وچنانکه‌می‌بینید، واپاشی به‌حالت‌پایه (که با α_0 نشان داده شده‌است) قابل تأیید نیست. دراین‌مورد هم، همفرودیهای γ ـ α به روشن کردن‌طرح واپاشی کمك می‌کنند، و یك روش بسیار آمـوزندهٔ نمایش همفرودیها را درشکل ۱۵.۸ نشان‌داده‌ایم. هرقله در طیف سه بعدی نمایندهٔ ارتباط همفرودی معینی بین α و γ است‌که روی محورهـا مشخص شده است. برای به‌دست‌آوردن طـرح واپاشی شکل ۱۶.۸ از اطلاعات حاصل از مطالعات همفرودی استفاده شده است. چهارنوار دورانی در ^{225}Ac مشخص شده‌اندکـه عبارت‌اند از نـوارهای دورانـی با پاریتهٔ مثبت ومنفی و مقادیـر

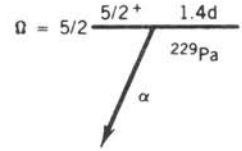


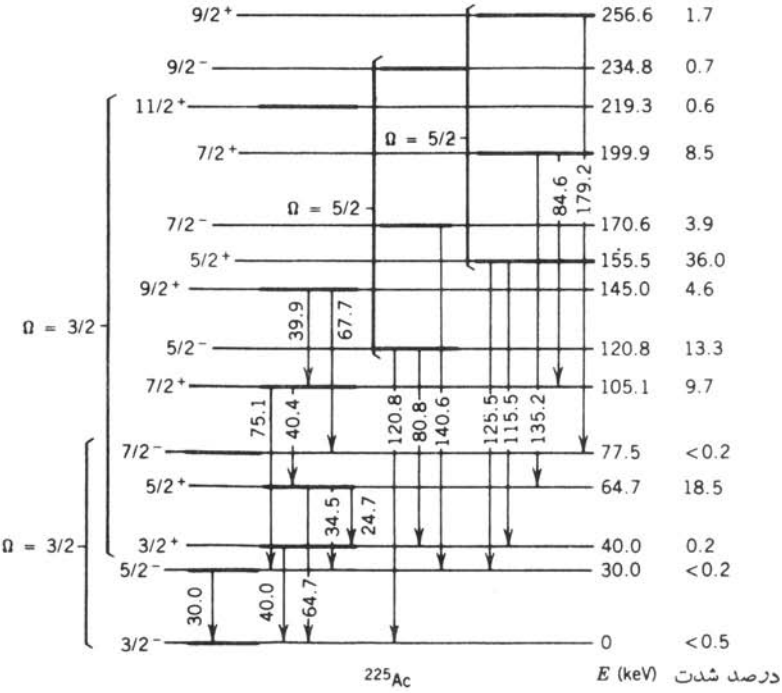
شکل ۱۴.۸ طیفهای α (چپ) و γ (راست) ناشی از واپاشی ^{229}Pa وتبدیل آن به ^{225}Ac. قله‌های α بر حسب انرژی حالتهای برانگیختهٔ ^{225}Ac مشخص شده‌اند؛ بنابراین α۱۰۵٫۱ واپاشی منجر به‌حالت‌برانگیختهٔ ۱۰۵٫۱keV را نشان‌می‌دهد. قله‌های بارز ناشی‌ازناخالصیها نیز مشخص شده‌اند. طیف γ با روش همفرودی با کلیهٔ αها تعیین شده است.



همفرودیهای γ-α دروا‌پاشی ^{229}Pa

شکل ۱۵.۸ نمایش سه‌بعدی (یا دو پارامتری) همفرودیهای γ - α در واپاشی ^{229}Pa. محور افقی نمایانگر انرژی پرتوگاماست که درقسمت بالا نشان داده شده‌است. محور اریب انرژیهای واپاشی آلفازا را نشان می‌دهد، و مقادیر آن نمایندهٔ حالتهای برانگیختهٔ ^{225}Ac است که واپاشی بدانها منجر می‌شود، محور عمودی شدت ارتباط همفرودی را نشان می‌دهد.





شکل ۱۶،۸ طرح واپاشی ^{229}Pa حاصل از طیف‌نمایی α و γ.

$\Omega = ۳/۲, ۵/۲$. به‌هستهٔ واپاشندهٔ ^{229}Pa اسپین - پاریته $(۵/۲)^+$ نسبت داده‌شده‌است، که در نتیجه دراین مورد واپاشی ترجیحی به‌نوار $(۵/۲)^+$ در هستهٔ دختر دارای شدتی در حدود ۴۶٪ است. ممنوعیت شدید تابع‌موجهای هسته‌ای در واپاشی به نوار دورانی حالت پایهٔ $(۳/۲)^-$، به واپاشی بسیار ضعیف (و احتمالا ناموجود) به حالت پایه منجر می‌شود. در این مورد اگر گروه مشاهده شدهٔ α با بیشترین انرژی ($\alpha_{۶۴٫۸}$ یا $\alpha_{۴۰٫۰}$ اگر بادقت بنگریم) را متناظر با گذار به‌حالت‌پایه درنظرمی گرفتیم، مرتکب‌خطا می‌شویم.

مراجع مطالعات تکمیلی

بحثهای مشروحتری از واپاشی آلفازا را می‌توان درفصل ۱۶ کتاب

R. D. Evans, *The Atomic Nucleus* (New York: McGraw-Hill, 1955),

و فصل ۱۳ کتاب

I. Kaplan, *Nuclear Physics* (Reading, MA: Addison - Wesley, 1955),

یافت. برای مروری بر نظریهٔ واپاشی آلفا رجوع کنید به

H. J. Mang, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* 14, 1 (1964),

و بخش «Alpha Decay» J. O. Rasmussen, در فصل ۱۱ کتاب

Alpha-, Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy, edited by K. Siegbahn (Amsterdam: North Holland, 1965),

برای مطالعهٔ کاربرد واپاشی آلفا در طیف‌نمایی هسته‌ای به مقالهٔ F. S. Stephens در کتاب زیر رجوع کنید

Nuclear Spectroscopy, Part A, edited by F. Ajzenberg-Selove (New-York: Academic, 1959).

مسائل

۱. مقدار Q را برای واپاشیهای زیر به‌دست آورید:

(الف) $^{۲۴۷}Bk \rightarrow {}^{۲۴۳}Am + \alpha$؛ (ب) $^{۲۵۱}Cf \rightarrow {}^{۲۴۷}Cm + \alpha$؛

(ج) $^{۲۳۰}Th \rightarrow {}^{۲۲۶}Ra + \alpha$.

۲. برای واپاشیهای مسئلهٔ ۱، انرژی جنبشی و سرعت هستهٔ دختر را پس از واپاشی تعیین کنید.

۳. با استفاده از جرمهای اتمی معلوم، مقدار Q را برای واپاشیهای زیر محاسبه کنید:

(الف) $^{۲۴۲}Pu \rightarrow {}^{۲۳۸}U + \alpha$

(ب) $^{۲۰۸}Po \rightarrow {}^{۲۰۴}Pb + \alpha$

(ج) $^{۲۰۸}Po \rightarrow {}^{۱۹۶}Pt + {}^{۱۲}C$

(د) $^{۲۱۰}Bi \rightarrow {}^{۲۰۸}Pb + {}^{۲}H$

۴. در واپاشی ^{۲۴۲}Cm به ^{۲۳۸}Pu، انرژی بیشینهٔ α برابر $۶۱۱۲٫۹ \pm ۰٫۱$ keV است. با معلوم بودن جرم ^{۲۳۸}Pu، جرم ^{۲۴۲}Cm را محاسبه کنید.

۵. بالاترین انرژی ذرات آلفای گسیل شده در واپاشی ^{۲۳۸}U به ^{۲۳۴}Th برابر ۴۱۹۶ ± ۴ keV است. با استفاده از این مقدار و جرم معلوم ^{۲۳۸}U، جرم ^{۲۳۴}Th را محاسبه کنید.

۶. با استفاده از اصل عدم قطعیت، کمینهٔ سرعت و انرژی جنبشی یك ذرهٔ آلفای محبوس در یك هستهٔ سنگین را برآورد کنید.

۷. (الف) مقادیر Q را در واپاشیهای $^{۲۲۴}Ra \rightarrow {}^{۲۱۲}Pb + {}^{۱۲}C$ و $^{۲۲۴}Ra \rightarrow {}^{۲۱۰}Pb + {}^{۱۴}C$ محاسبه کنید. (ب) نیمه‌عمرهای این دو فرایند واپاشی را برآورد کنید. ^{۲۲۴}Ra یك هستهٔ آلفا گسیل با نیمه‌عمر ۳٫۶۶ روز است.

۸. مقدار Q واپاشی آلفای ^{۲۰۳}Tl، با استفاده از جرم هسته‌های اولیه و نهایی، برابر

MeV ۹۱٫۰ محاسبه‌شده‌است. نیمه‌عمر ^{۲۰۳}Tl را براورد کنید و بگویید چرا ^{۲۰۳}Tl را یك هستهٔ «پایدار» می‌نامیم.

۹. با استفاده از فرمول نیمه‌تجربی جرم، انرژی واپاشی آلفازای ^{۲۴۲}Cf را براورد کنید و آن‌را با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه کنید (شکل ۱.۸).

۱۰. برای واپاشی آلفازای ^{۲۲۶}Ra به ^{۲۲۲}Rn ($Q = ۴٫۸۶۹$ MeV)، مقادیر نیمه‌عمر انتظاری جهت تولید ^{۲۲۲}Rn به‌شعاعهای ۷٫۰، ۸٫۰، ۹٫۰، و ۱۰٫۰ فرمی‌را محاسبه کنید. شعاع متناظر به‌نیمه‌عمر اندازه‌گیری شده (۱۶۰۲ سال) را براورد کنید؛ مقدار R_0 نظیر را استنتاج و تعبیر کنید.

۱۱. با استفاده ازمقیاسی مشابه شکل ۲.۸، معادلهٔ (۹.۸) را رسم کنید ونشان‌دهید که‌روند عمومی‌مقادیر Q باز تولیدمی‌شود. مقادیر مناسب Z را متناظر با هرمقدار A انتخاب کنید.

۱۲. سد پتانسیل کولنی مقابل ذرهٔ α را در واپاشی آلفازای ^{۲۴۲}Cm ($Z = ۹۶$) به ^{۲۳۸}Pu ($Z = ۹۴$)، با مقدار $Q = ۶٫۲۱۷$ MeV، رسم کنید. برای به‌حساب آوردن میزان پخش‌شدگی سطح هسته، فرض کنید $R_0 = ۱٫۵$ fm است. همچنین سد کولنی به‌علاوهٔ گریز از مرکز را برای واپاشی $l = ۲$ به‌اولین حالت برانگیخته (۴۴ keV) نشان‌دهید. حال با استفاده از روشی مشابه معادلهٔ (۱۳.۸)، کاهش احتمال واپاشی را دراثر سد اضافی براورد کنید و نسبت شدتهای انشعاب به حالت پایه و اولین حالت برانگیختهٔ ^{۲۳۸}Pu را به‌دست‌آورید. (کاهش‌مقدار Q برای‌واپاشی به‌حالت برانگیخته را فراموش نکنید.) براورد خود را باشدتهای واقعی درشکل ۷.۸ مقایسه کنید.

۱۳. معادلات (۱.۸) تا (۵.۸) حتی درمکانیك نسبیتی‌هم به‌طور دقیق برقرارند، امامعادلات (۶.۸) و (۷.۸) با استفاده از شکل نانسبیتی انرژی جنبشی به‌دست آمده‌اند. با استفاده از روابط نسبیتی p و T، صورت نسبیتی معادلات (۶.۸) و (۷.۸) را به‌دست آورید وخطای ناشی از چشمپوشی از این تصحیحات را برای ذرهٔ α با انرژی ۶ MeV محاسبه کنید.

۱۴. هستهٔ شدیداً تغییرشکل‌یافتهٔ ^{۲۵۲}Fm را با $\varepsilon = ۰٫۳$ درنظر بگیرید. این هسته به‌شکل بیضیوار دورانی با نیم محور بزرگ $a' = R(۱+\varepsilon)$ و نیم محور کوچك $a = R(۱+\varepsilon)^{-۱/۲}$ است که در آن R شعاع میانگین است. با استفاده از پتانسیلی به‌صورت‌شکل ۹.۸، احتمالات نسبی گسیل ذرات آلفا را در راستاهای قطبی واستوایی براورد کنید.

۱۵. در تصویر نیمه کلاسیك، یك ذرهٔ α با $l = ۰$ در امتداد خطی گسیل می‌شود که از مرکزهسته می گذرد. (الف) ذرات α با $l = ۱$ و $l = ۲$ باید درچه فاصله‌ای ازمرکز هسته گسیل شوند؟ مقدار Q را برای یك هستهٔ سنگین ($A = ۲۳۰$) برابر ۶ MeV فرض کنید. (ب) اگر تمام انرژی پس‌زنی صرف حرکت دورانی هستهٔ دختر شود، انرژی جنبشی دورانی هستهٔ پس‌زده چقدر می‌شود؟

۱۶. با استفاده از اطلاعات موجود دربارهٔ مواد مرجع (جدول ایزوتوپها، جدولهای جرم اتمی)، رشته منحنیهای تغییرات مقدار Q واپاشی آلفازا را برحسب Z، برای وقتی که A ثابت باشد، رسم کنید. از معادلهٔ (۹.۸) برای تحلیل این نمودار استفاده کنید.

۱۷. در واپاشی $^{۲۲۸}Th \rightarrow {}^{۲۲۴}Ra + \alpha$، انرژی ذرهٔ آلفا با انرژی بیشینه برابر ۵٫۴۲۳ MeV و انرژی ذرهٔ بعدی برابر ۵٫۴۳۱ MeV است. (الف) واپاشی باانرژی بیشینه به حالت پایهٔ ^{۲۲۴}Ra منتهی می‌شود. چرا این رویداد فرایندی طبیعی است؟ (ب) مقدار Q این واپاشی را از انرژی اندازه‌گیری شدهٔ α محاسبه کنید. (ج) انرژی اولین حالت برانگیختهٔ ^{۲۲۴}Ra را محاسبه کنید.

۱۸. مقدار Q برای واپاشی $^{۲۳۳}U \rightarrow {}^{۲۲۹}Th + \alpha$ برابر ۴٫۹۰۹ MeV است. انرژی حالات برانگیختهٔ ^{۲۲۹}Th در این واپاشی برابر ۲۹، ۴۲، ۷۲، و ۹۷ keV است. انرژیهای پنج گروه از پرانرژی‌ترین ذرات آلفای گسیل شده در واپاشی ^{۲۳۳}U را محاسبه کنید.

۱۹. انرژی پنج گروه از ذرات آلفای گسیل شده از ^{۲۴۲}Cm (شکل ۷.۸) به‌ترتیب برابر ۶٫۱۱۳، ۶٫۰۷۰، ۵٫۹۷۲، ۵٫۸۱۷ و ۵٫۶۰۹ MeV است. هرحالت از طریق یک گذار γ به‌حالت بلافاصله پایینتر مرتبط می‌شود. انرژیهای پرتوهای گاما را محاسبه کنید.

۲۰. واپاشی آلفازای هسته‌ای با جرم حدود ۲۰۰ دارای دو مؤلفه با انرژیهای ۴٫۶۸۷ و ۴٫۶۵۰ MeV است. هیچیک از این مؤلفه‌ها به حالت پایهٔ هستهٔ دختر منتهی نمی‌شوند، ولی به‌دنبال هریک از آنها پرتوی گامایی با انرژی به‌ترتیب برابر ۲۶۶ و ۳۰۵ keV گسیل می‌شود، وهیچ پرتوی گامای دیگری مشاهده نمی‌شود. (الف) با استفاده از این اطلاعات، یک نمودار واپاشی رسم کنید. (ب) حالت مادرهستهٔ واپاشنده دارای اسپین ۱ و پاریتهٔ منفی، وحالت پایهٔ دختر هسته دارای اسپین صفر و پاریتهٔ منفی است. دراین‌مورد، چرا واپاشی آلفازا مستقیماً به‌حالت پایه منتهی نمی‌شود؟

۲۱. واپاشی آلفازای ^{۲۴۴}Cm با شدت $۱٫۶ \times ۱۰^{-۴}$٪ به حالت برانگیختهٔ $^{+}۰$ هستهٔ ^{۲۴۰}Pu با انرژی ۰٫۸۶۱ MeV منتهی می‌شود، درحالی‌که شدت نسبی واپاشی به‌حالت پایهٔ $^{+}۰$ برابر ۷۶٫۷٪ است نسبت این شدتهای واپاشی را با استفاده از نظریهٔ واپاشی آلفازا محاسبه و آن را با مقادیر تجربی مقایسه کنید.

۲۲. دریک فرایند واپاشی، هسته‌ای به‌جرم‌حدود ۲۴۰ ذرات آلفا باانرژیهای زیر (برحسب MeV) گسیل می کند: $(\alpha_۰)$۵٫۵۴۵، $(\alpha_۱)$۵٫۵۱۳، $(\alpha_۲)$۵٫۴۸۶، $(\alpha_۳)$۵٫۴۹۶، $(\alpha_۴)$۵٫۴۴۳، $(\alpha_۵)$۵٫۴۱۷، و $(\alpha_۶)$۵٫۳۸۹. پرتوهای گامای زیر هم درهستهٔ دختر مشاهده شده‌اند (انرژیها برحسب keV است): $(\gamma_۱)$۲۶، $(\gamma_۲)$۳۳، $(\gamma_۳)$۴۳، $(\gamma_۴)$۵۹، $(\gamma_۵)$۶۰، $(\gamma_۶)$۹۹، $(\gamma_۷)$۱۰۳، و $(\gamma_۸)$۱۲۵. بااستفاده از این اطلاعات وفرض اینکه $\alpha_۰$ به‌حالت پایهٔ هستهٔ دختر منتهی می‌شود، نمودار واپاشی را دراین فرایند رسم کنید.

۲۳. در واپاشی ^{۲۵۳}Es به ^{۲۴۹}Bk که درشکل ۸.۸ نشان داده شده است: (الف) سهم و

شدت واپاشیهای $l_\alpha = ۰, ۲, ۴, ۶$ را درگذار به حالت پایه براورد وآنها را بـا مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه کنید. (ب) با فرض برتری مؤلفهٔ $l_\alpha = ۲$، شدتهای نسبی واپـاشیهای منتهی به حالت $(۹/۲)^+$ و $(۱۱/۲)^+$ را براوردکنید. مقدار Q حالت پایه برابر ۶٫۷۴۷ MeV و حالتهای برانگیخته برابر ۴۲ keV $(۹/۲)^+$ و ۹۴ keV $(۱۱/۲)^+$ است.

۲۴. واپاشی $^{۲۵۳}\mathrm{Es}\ (I = ۷/۲, \pi = +)$ به‌دنباله‌ای ازحالات پاریته منفی هستهٔ $^{۲۴۹}\mathrm{Bk}$ بـا اسپینهای $I = ۳/۲, ۵/۲, ۷/۲, ۹/۲, ۱۱/۲, ۱۳/۲$ منتهی می‌شود. بـرای هرحالت، مقدار مجاز l_α را بیابید.

۹

واپاشی بتازا

گسیل الکترونهای منفی معمولی از هسته یکی از اولین پدیده‌های واپاشی رادیواکتیوی بود که مشاهده شد. فرایند معکوس گیراندازی الکترون مداری توسط هسته، تا سال ۱۹۳۸ مشاهده نشد. در این سال آلوارز پرتوهای x مشخصهٔ گسیل شده در اثر پرشدن جای خالی الکترونهای گیراندازی شده را آشکارسازی کرد. درسال ۱۹۳۴ ژولیو-کوری برای اولین بار فرایند گسیل الکترون مثبت (پوزیترون) در واپاشی رادیواکتیو را، فقط دو سال پس از کشف پوزیترون در پرتوهای کیهانی، مشاهده کردند. سه فرایند فوق ارتباط نزدیك باهم دارند و تحت عنوان مشترك واپاشی بتازا رده‌بندی می‌شوند.

اساسی‌ترین فرایند واپاشی بتازا تبدیل یك پروتون به نوترون و یا یك نوترون به پروتون است. دریك هسته، واپاشی بتازا Z و N را یك واحد تغییر می‌دهد $Z \to Z \pm ۱$، $N \to N \mp ۱$ به‌طوری که $A = N + Z$ ثابت می‌ماند. بنابراین واپاشی بتازا راه ساده‌ای برای «فرولغزیدن» هسته‌های ناپایدار درسهمی جرم (برای مثال، شکل ۱۸.۳) با A ثابت و رسیدن به ایزوبار پایدار است.

برخلاف واپاشی آلفازا، درك واپاشی بتازا آهنگ پیشرفت بسیار کندی داشته است وغالباً نتایج آزمایشی به معماهای جدیدی منجر شده‌اند که نظریه‌های موجود را موردتردید قرار داده‌اند. همان‌طور که آزمایشهای اولیهٔ رادرفورد نشان دادند که ذرات آلفا هسته‌های ^{۴}He هستند، آزمایشهای اولیه درمورد ذرات بتای منفی نشان دادند که این ذرات دارای بار وجرم الکترون معمولی هستند. دربخش ۲.۱ درمورد دلایل عدم حضور الکترونها در

هسته به‌عنوان اجزای سازندهٔ آن بحث کردیم، و بنابراین باید فرایند واپاشی بتازا را به‌صورت «تولید» الکترون با استفاده از انرژی موجود در لحظهٔ واپاشی در نظر بگیریم؛ این الکترون بلافاصله پس از تولید از هسته خارج می‌شود. این مطلب برخلاف واپاشی آلفازاست که طی آن می‌توان فرض کرد که ذره قبلا در هسته موجود بوده است.

بنابراین فرایندهای اساسی واپاشی بتایی به‌قرار زیرند:

$n \rightarrow p + e^-$ (β⁻) واپاشی بتازای منفی

$p \rightarrow n + e^+$ (β⁺) واپاشی بتازای مثبت

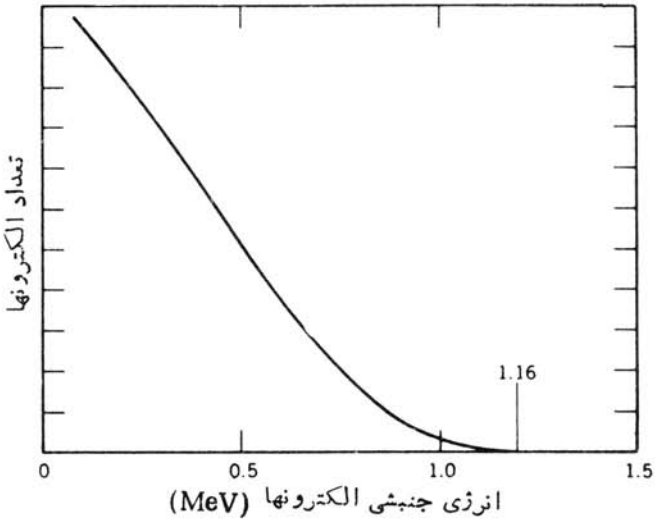
$p + e^- \rightarrow n$ (ε) گیراندازی الکترون مداری

این فرایندها کامل نیستند، زیرا ذرهٔ دیگری را (که یك نوترینو یا پادنوترینو است) در هر مورد باید درنظر گرفت. دو فرایند آخر فقط برای پروتونهای وابسته به هسته رخ می‌دهند؛ واز نظر انرژی برای پروتونهای آزاد یا پروتون اتم هیدروژن ممنوع‌اند.

۱.۹ آزادشدن انرژی در واپاشی بتازا

توزیع پیوستهٔ انرژی الکترونها در واپاشی بتازا یك نتیجهٔ تجربی گیج‌کننده در سالهای دههٔ ۱۹۲۰ بود. ذرات آلفا، با انرژیهای مشخص و خوش‌تعریف که برابر تفاوت انرژی جرمی حالات اولیه ونهایی (منهای تصحیح پس‌زنی) است گسیل می‌شوند. کلیهٔ واپاشیهای آلفازایی که به‌حالات اولیه ونهایی یکسانی مربوط می‌شوند، انرژی جنبشی کاملا یکسان دارند. ذرات بتا توزیع انرژی پیوسته‌ای دارند که از صفر تا حد بالایی (انرژی نقطهٔ پایانی) که برابر تفاوت انرژی حالات اولیه ونهایی است، تغییر می‌کند. اگر واپاشی بتازا مانند واپاشی آلفازا یك فرایند دو جسمی بود، انتظار داشتیم که این ذرات انرژی یکسانی داشته باشند، ولی درواقع کلیهٔ ذرات گسیل شده انرژیی کمتر ازمقدار مورد انتظار دارند. برای مثال، برمبنای تفاوت جرمهای هسته‌ای، انتظار داریم که ذرات بتای ناشی از ^{210}Bi با انرژی جنبشی ۱٫۱۶ MeV گسیل شوند، درحالی که با توزیع پیوسته‌ای از ۰ تا ۱٫۱۶ MeV (شکل ۱.۹) روبه‌رو می‌شویم.

دریك کوشش اولیه برای به‌حساب آوردن این انرژی «گمشده» فرض شد که بتاها واقعاً با انرژی جنبشی ۱٫۱۶ MeV گسیل می‌شوند، ولی قبل از رسیدن به دستگاه آشکارسازی دراثر برخورد با الکترونهای اتمی انرژی خود را از دست می‌دهند. این احتمال با آزمایشهای دقیق به‌وسیلهٔ گرماسنجی که چشمهٔ بتازا را محصور نگه می‌دارد و انرژی واپاشی را باتبدیل آن به گرما اندازه‌گیری می‌کند، منتفی شد. اگر قسمتی ازانرژی به‌الکترونهای اتمی منتقل شده بود، افزایش متناظر در دما ملاحظه می‌شد. این آزمایشها نشان دادند که شکل طیف نشان داده شده درشکل ۱.۹ مشخصهٔ واپاشی خود الکترونهاست وناشی از برهم‌کنشهای بعدی نیست.



شکل ۱۰۹ توزیع پیوستهٔ انرژی الکترونهـای ناشی از واپـاشی بتازای ^{210}Bi(^{210}Bi را در نوشته‌های علمی به‌صورت RaE نیز نشان‌می‌دهند).

برای توجیه این‌طرز آزاد شدن انرژی، پـاؤلی درسال ۱۹۳۱ گسیل ذرهٔ دومی را در فرایند واپاشی مطرح کردکه بعدها فرمی‌آن‌را نوترینو نامید. نوترینو انرژی «گمشده» را همراه می‌برد و به‌واسطهٔ قابلیت نفوذ زیادش در گرماسنج متوقف نمی‌شود. بنابـراین آزمایشهایی از این نوع نمی‌توانند انرژی‌آن‌را ثبت‌کنند. پایستگی بار الکتریکی ایجاب می‌کندکه نوترینو خنثی باشد، وبنابر پایستگی تکانهٔ زاویه‌ای وملاحظات آماری‌درفرایند واپاشی باید اسپین‌آن (مانند الکترون) ۱/۲ باشد.آزمایش نشان می‌دهدکه درحقیقت دو دونوع مختلف نوترینو در واپاشی بتازا گسیل می‌شوند [وانواع دیگری از آن‌هـم در فرایندهای واپاشی دیگر گسیل می‌شوند؛ فصل ۱۸ (جلد دوم، ترجمه فارسی) را ببینید]. این دونوع را نوترینو و پادنوترینو می‌خـوانند و با ν و $\bar{\nu}$ نشان می‌دهند. پادنوتـرینو در واپاشی بتازای‌منفی و نوترینو در واپاشی بتازای مثبت‌و گیراندازی‌الکترون گسیل می‌شود. در بحث واپاشی بتازا، اصطلاح «نوترینو» غـالباً به نوترینو و پادنوترینو هـردو اطلاق می‌شود، اگرچه در نوشتن فرایندهای واپاشی تمایز بین آنهـا ضرورت پیدا می‌کند؛ این مطلب برای مفهوم «الکترون» نیز صادق است.

برای‌بحث پیرامون مقدار انرژی‌آزادشده در واپاشی بتازا، ابتدا واپاشی نوترون آزاد را (که با نیمه‌عمر حدود ۱۰ دقیقه صورت می‌گیرد) درنظر می‌گیریم.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

مانند مورد واپاشی‌آلفازا، مقدار Q را تفاوت انرژیهای جرمی هسته‌های ابتدایی ونهایی تعیین می‌کند

$$Q=(m_n-m_p-m_e-m_{\bar{\nu}})\,c^2 \qquad (۱.۹)$$

برای واپاشیهای نوترون درحال سکون داریم

$$Q=T_p+T_e+T_{\bar{\nu}} \qquad (۲.۹)$$

در حال حاضر انرژی جنبشی پس‌زنی پـروتون T_p را که فقط ۳ر۰ keV است، نادیده می‌گیریم. بنابراین، انرژی واپاشی بین الکترون و پادنوترینو تقسیم می‌شود، و از همین رهگذر می‌توان طیف پیوستهٔ الکترون‌را توجیه کرد. بیشینهٔ انرژی‌الکترونهامتناظر با کمینهٔ انرژی‌پادنوترینوهاست، ووقتی انرژی پادنوترینوها بسیار کوچك و متمایـل به صفر است داریم $Q\approx(T_e)_{max}$. بیشینهٔ انـرژی اندازه‌گیری شدهٔ الکترونهـا در این فرایند برابر ۰ر۰۱۳MeV ± ۰ر۷۸۲ است. بااستفاده ازجرمهای اندازه‌گیری‌شدهٔ نوترون، الکترون، وپروتون می‌توانیم مقدار Q را محاسبه کنیم

$$\begin{aligned}Q&=m_nc^2-m_pc^2-m_ec^2-m_{\bar{\nu}}c^2\\&=۹۳۹ر۵۷۳\ \mathrm{MeV}-۹۳۸ر۲۸۰\ \mathrm{MeV}-۰ر۵۱۱\ \mathrm{MeV}-m_{\bar{\nu}}c^2\\&=۰ر۷۸۲\ \mathrm{MeV}-m_{\bar{\nu}}c^2\end{aligned}$$

بنابراین در محدودهٔ دقت اندازه‌گیری انـرژی بیشینه (در حـدود ۱۳ keV) می‌توانیم پادنوترینو را بی‌جرم‌درنظر بگیریم. چنانکه دربخش ۶.۹ خواهیم‌دید، آزمایشهای‌دیگر حدبالای‌کمتری‌را به‌دست می‌دهند، که به‌هرحال در بحث فعلی جرم نوترینو وپادنوترینو را صفر می‌گیریم.

بااستفاده از پایستگی تکانهٔ خطی می‌توان واپاشی‌بتازا را فرایندی سه‌جسمی درنظر گرفت، ولی این‌مطلب مستلزم اندازه‌گیری‌همزمان تکانهٔ‌هستهٔ پس‌زن وتکانهٔ الکترون‌است. انجام این‌نوع‌آزمایشها مشکل است زیرا هستهٔ‌کم‌انرژی ($T\lesssim$keV) به‌آسانی پراکنده می‌شود، ولی این‌آزمایش درچند مورد انجام شده‌است ونتیجهٔ حاصل ازآنها نشان‌می‌دهد که‌جمع‌برداری تکانه‌های خطی الکترون وهستهٔ پس‌زن با وجود ذرهٔ‌سوم غیرقابل مشاهده، که جرم سکون صفر یا نزدیك به‌صفر دارد و انرژی «گمشده» را با خود می‌برد، سازگار است. جرم ذره هرچه باشد، بنابر این آزمایشها وجود ذرهٔ سوم الزامی است، زیراجمع تکانه‌های الکترون وهسته برخلاف واپاشی دوجسمی مسلماً صفر نیست.

نوترینو به‌علت بی‌جرم بودن با سرعت نور حرکت می‌کند و انرژی‌کل نسبیتی‌آن برابر انرژی جنبشی است؛ دراینجا از علامت E_ν برای نمایش انـرژی نوترینو استفاده می‌کنیم. (مروری بر مفاهیم و روابط سینماتیك نسبیتی را می‌توان درپیوست الف‌یافت.) برای الکترون از انرژی جنبشی T_e وانرژی‌کل نسبیتی E_e هردو استفاده می‌کنیم که طبق رابطهٔ $E_e=T_e+m_ec^2$ به‌هم‌مربوط‌اند. (انرژیهای واپاشی نوعاً از مرتبهٔ میلیون‌الکترون ولت‌است، بنابراین تقریب‌نانسبیتی $T\ll mc^2$ مسلماً برای‌الکترونهای واپاشی معتبر نیست

و بـاید از سینماتیك نسبیتی استفاده کنیم.) هستهٔ پس‌زن انرژی بسیار کمی‌دارد و می‌توان آن‌را به‌طور نانسبیتی بررسی کرد.

نمونه‌ای از فرایند واپاشی بتازا را دریك هسته درنظر می گیریم

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}_{A+1}{}^{A}X'_{N-1} + e^{-} + \bar{\nu} $$

$$ Q_{\beta^-} = [m_N({}^{A}_{Z}X) - m_N({}_{Z+1}{}^{A}X') - m_e]c^2 \qquad (۳.۹) $$

m_N نمایندهٔ جرم هسته‌ها است. برای تبدیل جرم هسته‌ای به‌جرم اتمهای خنثی که درجداول موجودند وبا $m({}^{A}X)$ نشان‌داده می‌شوند، از رابطهٔ زیر استفاده می کنیم

$$ m({}^{A}X)c^2 = m_N({}^{A}X)c^2 + Zm_ec^2 - \sum_{i=1}^{Z} B_i \qquad (۴.۹) $$

که درآن B_i نمایندهٔ انرژی بستگی الکترون iام به‌اتم است، برحسب جرم اتمی داریم

$$ Q_{\beta^-} = \{[m({}^{A}X) - Zm_e] - [m({}^{A}X') - (Z+1)m_e] - m_e\}c^2 + \left\{\sum_{i=1}^{Z} B_i - \sum_{i=1}^{Z+1} B_i\right\} \qquad (۵.۹) $$

توجه کنید که جرمهای الکترون دراین مورد یکدیگـر را خنثی می کنند. با چشمپوشی از تفاوت انرژی بستگی الکترونها، خواهیم داشت

$$ Q_{\beta^-} = [m({}^{A}X) - m({}^{A}X')]c^2 \qquad (۶.۹) $$

که درآن m نمایندهٔ جرم‌اتمهای خنثی است. مقدار Q نمایندهٔ انرژیی‌است که‌بین الکترون ونوترینو تقسیم می‌شود

$$ Q_{\beta^-} = T_e + E_{\bar{\nu}} \qquad (۷.۹) $$

درنتیجه هر ذره فقط وقتی دارای بیشینهٔ انرژی است که انرژی ذرهٔ دیگر صفرشود

$$ (T_e)_{max} = (E_{\bar{\nu}})_{max} = Q_{\beta^-} \qquad (۸.۹) $$

در واپاشی ${}^{210}Bi \rightarrow {}^{210}Po$، با استفاده از جدول جرم داریم

$$ \begin{aligned} Q_{\beta^-} &= [m({}^{210}Bi) - m({}^{210}Po)]c^2 \\ &= (۲۰۹٫۹۸۴۰۹۵\ u - ۲۰۹٫۹۸۲۸۴۸\ u)(۹۳۱٫۵۰۲\ MeV/u) \\ &= ۱٫۱۶۱\ MeV \end{aligned} $$

طبق شکل ۱.۹ داریم $(T_e)_{max} = ۱٫۱۶\ MeV$ که با مقدار مـورد انتظار Q_{β^-} سازگاری دارد. در واقع، این‌سازگاری بین‌دومقدارمستقل‌نیست، مقدار Q_{β^-} دراین‌مورد برای تعیین جرم ${}^{210}Po$ به‌کار رفته است، و جرم ${}^{210}Bi$ با استفاده از ${}^{209}Bi$ و با توجه

به‌گیراندازی نوترون به‌دست آمده است. ازمعادلهٔ (۶.۹) ومقدار اندازه‌گیری‌شدهٔ Q_β- برای تعیین $m(^A X')$ استفاده شده است.

نمونه‌ای از واپاشی پوزیترون‌زا به‌صورت زیر است

$$^A_Z X_N \rightarrow {}_{Z-1}^{A}X'_{N+1} + e^+ + \nu$$

ومحاسبات مشابه مورد قبل نشان می‌دهد که

$$Q_{\beta^+} = [m(^A X) - m(^A X') - 2\, m_e]c^2 \qquad (9.9)$$

دراینجا هم ازجرمهای اتمی استفاده شده‌است. توجه کنید که جرمهای الکترون دراین‌مورد یکدیگر را خنثی نمی‌کنند.

در فرایندهای گیراندازی الکترون، مانند فرایند زیر

$$^A_Z X_N + e^- \rightarrow {}_{Z-1}^{A}X'_{N+1} + \nu$$

برای محاسبهٔ مقدار Q بایدتوجه کنیم که‌اتم X' بلافاصله پس از گیراندازی دریك‌حالت برانگیختهٔ اتمی است. یعنی گیراندازی از یك‌پوستهٔ داخلی مانندپوستهٔ K انجام می‌شود، وبنابراین یك‌جای خالی الکترون درآن‌پوسته به‌وجودمی‌آید. جای‌خالی باگذارهای نزولی الکترون‌پوسته‌های بالاتر به‌سرعت پر می‌شود و درنتیجه پرتوهای x مشخصه گسیل‌می‌شوند. دراین‌صورت، انرژی کل‌یك یا چندپرتو x گسیل‌شده باانرژی بستگی الکترون گیراندازی شده برابر خواهد بود. بنابراین جرم‌اتمی X' بلافاصله پس‌از انجام فرایند به‌اندازهٔ B_n، یعنی به‌اندازهٔ انرژی بستگی الکترون گیرافتادهٔ پوستهٔ n $(n = K, L, \ldots)$، از جرم اتمی حالت پایه بیشتر است. به‌این‌ترتیب، مقدار Q برابر است با

$$Q_\varepsilon = [m(^A X) - m(^A X')]c^2 - B_n \qquad (10.9)$$

واپاشی بتازای مثبت وگیراندازی الکترون هردو سبب تبدیل هستهٔ اولیهٔ $^A_Z X_N$ به‌هستهٔ نهایی ${}_{Z-1}^{A}X'_{N+1}$ می‌شوند، ولی توجه کنید که ممکن است هردو فرایند ازنقطه‌نظر توازن انرژی ممکن نباشند (Q باید برای هر فرایند واپاشی مثبت باشد). هسته‌هایی که برای آنها واپاشی بتازای مثبت از نظر انرژی امکان‌پذیر است، می‌توانند الکترون را هم گیراندازی کنند، ولی‌عکس آن‌حقیقت‌ندارد ــ یعنی‌ممکن‌است برای گیراندازی‌الکترون $Q > 0$ وبرای واپاشی‌بتازای مثبت $Q < 0$ شود. برای واپاشی بتازای مثبت، تفاوت‌جرم انرژی اتمی باید لااقل برابر $2\, m_e c^2 = 1.022\ \mathrm{MeV}$ باشد.

در واپاشی پوزیترون‌زا، عباراتی مانند معادلات (۷.۹) و (۸.۹) نشان می‌دهند که انرژی نوترینو دارای توزیع پیوسته‌ای از صفر تا Q_{β^+} (منهای انرژی قابل چشمپوشی پس‌زنی هسته) است. اما درگیراندازی الکترون، حالت نهایی دوجسمی سبب می‌شود که مقادیر انرژی پس‌زنی و E_ν منحصر به‌فرد باشند. با چشمپوشی از انرژی پس‌زنی، یك نوترینوی تك‌انرژی با انرژی Q_ε گسیل می‌شود.

جدول ۱.۹ نمونه‌هایی ازفرایندهای واپاشی بتازا.

واپاشی	نوع	Q(MeV)	$t_{1/2}$
$^{23}Ne \rightarrow {}^{23}Na + e^- + \bar{\nu}$	β^-	۴٫۳۸	۳۸ s
$^{99}Tc \rightarrow {}^{99}Ru + e^- + \bar{\nu}$	β^-	۰٫۲۹	$۲٫۱ \times ۱۰^5$y
$^{25}Al \rightarrow {}^{25}Mg + e^+ + \nu$	β^+	۳٫۲۶	۷٫۲ s
$^{124}I \rightarrow {}^{124}Te + e^+ + \nu$	β^+	۲٫۱۴	۴٫۲ d
$^{15}O + e^- \rightarrow {}^{15}N + \nu$	ε	۲٫۷۵	۱٫۲۲ s
$^{41}Ca + e^- \rightarrow {}^{41}K + \nu$	ε	۰٫۴۳	$۱٫۰ \times ۱۰^5$y

آنچه گذشت مربوط به‌واپاشیهای بین‌حالات پایهٔ هسته‌ای‌است. اگر حالت‌هسته‌ای نهایی X' یك حالت برانگیخته باشد، مقدار Q باید با درنظرگرفتن‌انرژی برانگیختگی آن‌حالت‌کاهش یابد

$$Q_{ex} = Q_{gr} - E_{ex} \qquad (۱۱.۹)$$

جدول ۱.۹ چند نمونه از واپاشی بتازا، انرژی‌آزاد شده، ونیمه‌عمرآنها را نشان می‌دهد.

۲.۹ نظریهٔ فرمی دربارهٔ واپاشی بتازا

درمحاسبهٔ نیمه‌عمر واپاشی‌آلفازا درفصل ۸ دیدیم‌که احتمال نفوذ در سد، عامل حساسی درتعیین نیمه‌عمرهای واپاشی آلفازاست. در واپاشی بتازای‌منفی وحتی در واپاشی‌بتازای مثبت چنین سدی جهت نفوذ وجود ندارد، وبا محاسبهٔ تقریبی می‌توان نشان‌دادکه عامل نمایی احتمال نفوذ در سد از مرتبهٔ واحد است. تفاوتهای مهم دیگری بین واپاشیهای آلفازا وبتازا وجود دارندکه‌استفاده‌از رهیافتی کاملا متفاوت را برای‌محاسبهٔ احتمال‌گذار در واپاشی بتازا مطرح می‌کنند: (۱) الکترون و نوترینو قبل از فرایند واپاشی وجود ندارند، وبنابراین باید تولیدآنها را درهسته درنظر بگیریم. (۲) الکترون ونوترینو باید به‌طور نسبیتی بررسی شوند. (۳) از این محاسبات باید توزیع پیوسته‌ای برای انرژی الکترونها حاصل شود.

درسال ۱۹۳۴، فرمی برمبنای فرضیهٔ پاؤلی دایر بر وجود نوترینو نظریه‌ای موفق را برای واپاشی بتازا پیشنهاد کرد. مهمترین ویژگیهای واپاشی را از عبارت اساسی احتمال گذار، دراثر برهم‌کنشی که درمقایسه‌با برهم‌کنش تشکیل حالات شبه‌پایدار ضعیف است، می‌توان به‌دست آورد. این مطلب مسلماً برای واپاشی بتازا حقیقت‌دارد، زیرا زمانهای مشخصه (نیمه‌عمرهای ازمرتبهٔ ثانیه وطولانیتر) آن‌بسیار طولانیتر از زمان مشخصهٔ‌هسته‌ای (10^{-20}s) است. نتیجهٔ این محاسبه، با درنظر گرفتن برهم‌کنش مولد واپاشی به‌عنوان یك اختلال ضعیف، قاعدهٔ طلایی فرمی نامیده می‌شود که نتیجهٔ کلی هر آهنگ گذاراست که قبلا به‌صورت معادلهٔ (۷۹.۲) نشان‌داده شد

$$\lambda=\frac{2\pi}{\hbar}\,|V_{fi}|^2\rho(E_f) \qquad (12.9)$$

جزء ماتریس V_{fi} برابر انتگرال برهم‌کنش V در فاصلهٔ بین حالت اولیه وحالت نهایی شبه پایدار سیستم است

$$V_{fi}=\int\psi_f^*V\psi_i\,dv \qquad (13.9)$$

عامل $\rho(E_f)$ چگالی حالتهای نهایی است، که می‌توان آن را به‌صورت dn/dE_f، یعنی تعداد حالات نهایی dn درفاصلهٔ انرژی dE_f نیز نوشت. با افزایش تعداد حالات‌نهایی قابل‌حصول، احتمال وقوع یك‌گذار مشخص افزایش می‌یابد.

فرمی‌شکل ریاضی V را در واپاشی بتازا که انجام محاسبات با استفاده از آن و معادلات (۱۲.۹) و (۱۳.۹) میسر می‌شود، نمی‌دانست. وی درعوض، کلیهٔ‌شکلهای ممکن سازگار با نسبیت‌خاص را درنظر گرفت ونشان‌داد که می‌توان یکی ازپنج عملگر ریاضی O_X راکه درآن X شکل‌عملگر (یعنی خصوصیات تبدیلی آن) است، به‌صورت‌زیرجایگزین V کرد:

$X=$ V(برداری), A(بردار محوری), S(نرده‌ای), P(شبه نرده‌ای), T (تانسوری)

اینکه‌کدام‌یك از اینها درست است، فقط با آزمایشهایی که درآنها تقارنها و خصوصیات فضایی محصولات‌واپاشی بررسی می‌شوند قابل‌تحقیق‌است، وتعیین‌شکل صحیح V — A مدت ۲۰ سال به‌درازا کشید (که‌طی‌آن باچندنتیجه‌گیری نادرست هم روبه‌رو شده‌اند).

تابع‌موج حالت زمانی باید علاوه‌بر هسته شامل الکترون و نوترینو نیز باشد. برای‌گیراندازی الکترون یا نوترینو، شکلها مشابه خواهند بود و تابع‌موج مناسب در حالت اولیه ظاهر خواهد شد. برای واپاشی بتازا جزء ماتریس برهم‌کنش به‌صورت زیر خواهد بود

$$V_{fi}=g\int[\psi_f^*\varphi_e^*\varphi_\nu^*]O_X\psi_i\,dv \qquad (14.9)$$

کـه در آن اکنون ψ_f تابع‌موج حالت نهایی هسته و φ_e و φ_ν تابع‌مـوجهای الکترون و نوترینو هستند. کمیت داخل کروشه نمایندهٔ کل سیستم نهایی پس از واپاشی است. مقدار ثابت g شدت برهم‌کنش را تعیین می‌کند، بار الکترونی e نقش مشابهی در برهم‌کنش بین اتم ومیدان الکترومغناطیسی دارد.

عامل چگالی حالتها (در پایین‌ترین مرتبه) شکل طیف انرژی بتازا را معین می‌کند. برای به‌دست آوردن چگالی حالتها، باید تعداد حالتهای نهایی قابل حصول برای محصولات واپاشی را بدانیم. فرض می‌کنیم که در واپاشی، یك الکترون (یا پوزیترون) با تکانهٔ $\mathbf{p}$ و یك نوترینو (یا پادنوترینو) با تکانهٔ $\mathbf{q}$ قابل حصول باشد. دراینجا فقط شکل طیف انرژی را درنظر داریم، وبنابراین جهتهای $\mathbf{p}$ و $\mathbf{q}$ مورد توجه نیستند. اگر دستگاه مختصاتی را درنظر بگیریم که محورهای آن p_x، p_y، و p_z باشد، مکان هندسی نقاطی که نمایندهٔ مقدار ویژهٔ $|\mathbf{p}|=(p_x^2+p_y^2+p_z^2)^{1/2}$ هستند کره‌ای به‌شعاع $p=|\mathbf{p}|$ است. به‌عبارت دقیقتر، مکان هندسی نقاطی که نمایندهٔ گسترهٔ تکانه‌های بین p و $p+dp$ هستند، پوسته‌ای کـروی به‌شعاع p وضخامت dp خواهد بود که درنتیجه حجمی معادل $4\pi p^2 dp$ خواهد داشت. اگر الکترون درجعبه‌ای به‌حجم V محبوس باشد (این مرحله فقط برای تکمیل بهنجارسازی تابع‌موج درنظر گرفته شده‌است وحجم واقعی درنتیجهٔ نهایی حذف می‌شود)، تعداد حالتهای نهایی الکترون dn_e متناظر با تکانه‌های موجود در گسترهٔ p تا $p+dp$ برابر است با

$$dn_e=\frac{4\pi p^2\,dp\,V}{h^3} \qquad (۱۵.۹)$$

که در آن عامل h^3 بدین منظور اضافه شده است که نتیجه به‌صورت یك عدد محض بدون بعد در آید.[۱] به‌همین ترتیب، تعداد حالتهای نوترینو برابر است با

$$dn_\nu=\frac{4\pi q^2 dq\,V}{h^3} \qquad (۱۶.۹)$$

وتعداد حالتهای نهایی که به‌طور همزمان یك الکترون و یك نوترینو با تکانه‌های مورد نظر دارند، عبارت است از

$$d^2n=dn_e dn_\nu=\frac{(4\pi)^2V^2p^2dp\,q^2dq}{h^6} \qquad (۱۷.۹)$$

تابع‌موجهای الکترون و نوترینو به‌صورت تابع موج ذرهٔ آزاد معمولی هستند که در حجم V بهنجار می‌شوند

---

۱. فضای فاز فضایی شش بعدی است که ازحالتهای موجود فضایی و تکانه (x, y, z, p_x, p_y, p_z) تشکیل می‌شود و واحد حجم در این فضا h^3 است.

$$\varphi_e(\mathbf{r})=\frac{1}{\sqrt{V}}e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}/\hbar}$$
$$\phi_\nu(r)=\frac{1}{\sqrt{V}}e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}/\hbar} \qquad (۱۸.۹)$$

برای الکترونی با انرژی جنبشی $1\,\mathrm{MeV}$ داریم $p=1.4\,\mathrm{MeV}/c$ و $p/\hbar=0.007\,\mathrm{fm}^{-1}$.
بنابراین درحجم هسته، $pr\ll 1$، می‌توان نماها را بسط داد وفقط جملهٔ اول را نگه‌داشت

$$e^{i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}/\hbar}=1+\frac{i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}}{\hbar}+\cdots\cong 1$$
$$e^{i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}/\hbar}=1+\frac{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}}{\hbar}+\cdots\cong 1 \qquad (۱۹.۹)$$

این تقریب به‌نام تقریب مجاز معروف است.

در این تقریب، تنها عامل وابسته به انرژی الکترون یا نوترینو از چگالی حالتها ناشی می‌شود. فرض کنید می‌خواهیم توزیع تکانه وانرژی الکترونهای گسیل شده راتعیین کنیم. آهنگ واپاشی جزئی با الکترونها و نوترینوهای با تکانهٔ موردنظرعبارت است‌از

$$d\lambda=\frac{2\pi}{\hbar}g^2|\mathrm{M}_{fi}|^2(4\pi)^2\frac{p^2\,dp\,q^2}{h^6}\cdot\frac{dq}{dE_f} \qquad (۲۰.۹)$$

که درآن $M_{fi}=\int\psi_f^*O_X\psi_i dv$ جزء ماتریس هسته‌ای است. انرژی نهایی E_f فقط برابر $E_e+E_\nu=E_e+qc$ است‌ودرنتیجه به‌ازای E_e ثابت‌داریم $dq/dE_f=1/c$. تاآنجا که به‌شکل طیف الکترون مربوط است، کلیهٔ عوامل معادلهٔ (۲۰.۹) راکه شامل‌تکانه‌نیستند (از جمله M_{fi} که درحال‌حاضر آن‌را مستقل از p درنظر می‌گیریم) می‌توان به‌صورت‌ثابت C درنظر گرفت، و توزیع حاصل تعداد الکترونهای با تکانهٔ بین p و $p+dp$ را به‌دست می‌دهد

$$N(p)dp=Cp^2q^2dp \qquad (۲۱.۹)$$

اگر Q انرژی واپاشی باشد، با چشمپوشی از انرژی ناچیز پس‌زنی هسته، داریم

$$q=\frac{Q-T_e}{c}=\frac{Q-\sqrt{p^2c^2+m_e^2c^4}+m_ec^2}{c} \qquad (۲۲.۹)$$

و شکل طیف به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

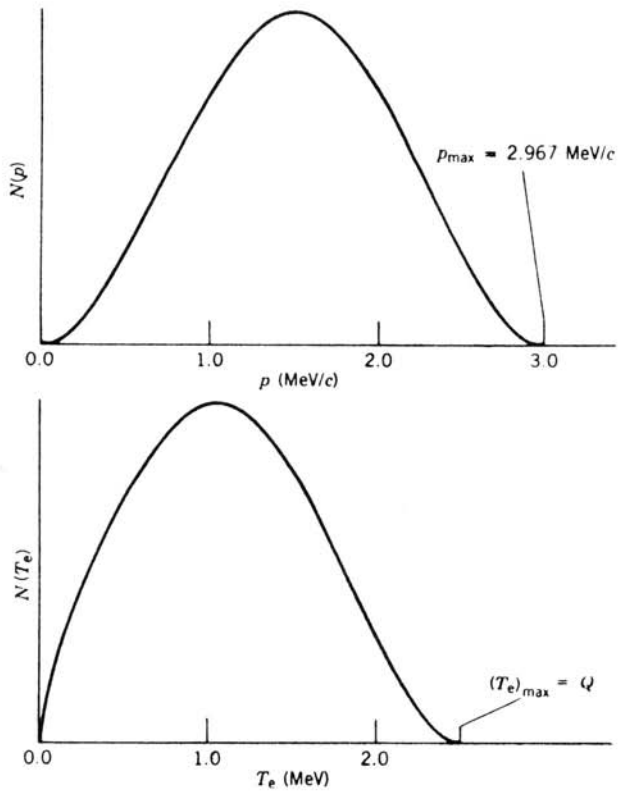
$$N(p)=\frac{C}{c^{2}}\,p^{2}(Q-T_e)^{2} \qquad (۲۳.۹)$$

$$=\frac{C}{c^{2}}\,p^{2}[Q-\sqrt{p^{2}c^{2}+m_e^{2}c^{4}}+m_ec^{2}]^{2} \qquad (۲۴.۹)$$

این تابع در $p=0$ و نیز درنقطهٔ پایانی $T_e=Q$ به‌صفر میل می‌کند، که چگـونگی آن درشکل ۲.۹ نشان‌داده شده است.

اغلب علاقه‌مندیم که توزیع طیف انـرژی الکترونها را تعیین کنیم. اگـر تعداد الکترونهای موجود درفاصلهٔ انرژی T_e و T_e+dT_e را بـا $N(T_e)dT_e$ نشان‌دهیم، با توجه به $c^{2}pdp=(T_e+m_ec^{2})dT_e$، داریم

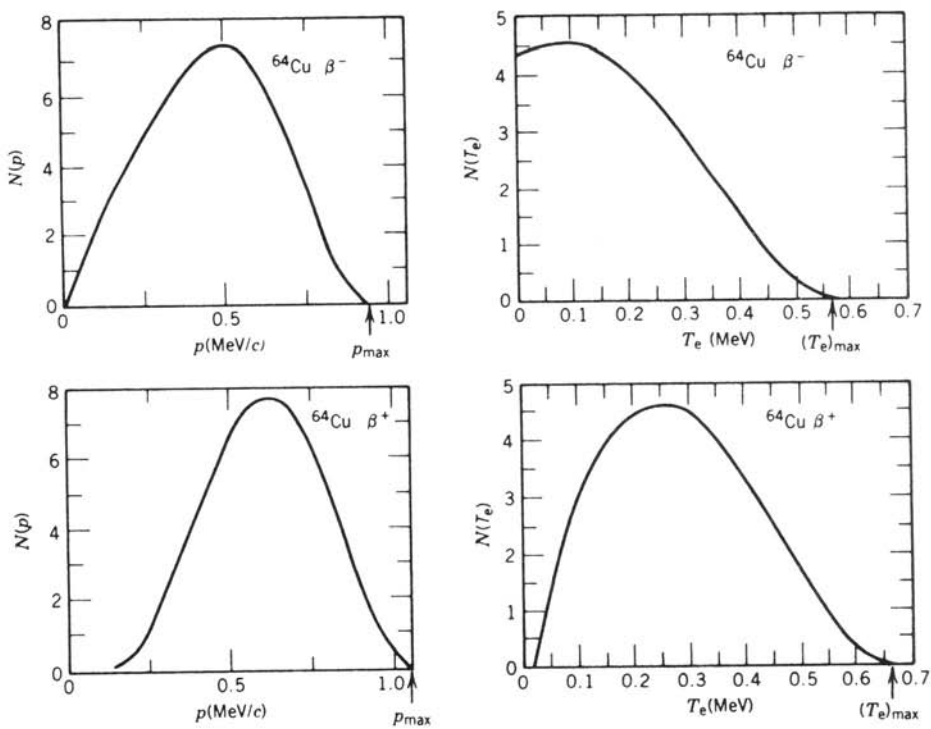
$$N(T_e)=\frac{C}{c^{5}}\,(T_e^{2}+2T_em_ec^{2})^{1/2}(Q-T_e)^{2}(T_e+m_ec^{2}) \qquad (۲۵.۹)$$



شکل ۲.۹ توزیع مورد انتظار انرژی و تکانهٔ الکترون بنا بـر پیش‌بینی معادلات (۲۴.۹) و (۲۵.۹). این توزیعها به‌ازای $Q=2.5\,\mathrm{MeV}$ رسم شده‌اند.

این توزیع نیز که در $T_e = 0$ و $T_e = Q$ صفر می‌شود، در شکل ۲.۹ نشان‌داده شده‌است.

در شکل ۳.۹ واپاشیهای بتازای مثبت ومنفی ^{64}Cu با پیش‌بینیهای نظری مقایسه شده است. چنانکــه می‌بینیم، منظرهٔ کلی شکل ۲.۹ بازتولید شده است، ولی بین نظریه و تجربه تفاوتهای سیستماتیك وجود دارند. این تفاوتها ناشی از برهم‌کنش کولنی بین ذرهٔ β وهستهٔ دختر است. به‌طور نیمه کلاسیك می‌توان منظرهٔ توزیعهای تکانهٔ شکل ۳.۹ را با توجه به‌دافعهٔ کولنی β^+ توسط هسته که تعداد پوزیترونهای کم انرژی را کاهش می‌دهد، و جاذبهٔ کولنی β^- که‌تعداد الکترونهای کم‌انرژی را افزایش می‌دهد، توجیه‌کرد. ازنقطه‌نظر صحیح‌تر کوانتوم مکانیکی، بایدبه‌تغییرات موج تخت‌الکترون، معادلهٔ (۱۹.۹)، که‌دراثر پتانسیل کولنی درون هسته ایجاد می‌شود اشاره‌کرد. محاسبهٔ کوانتوم مکانیکی اثــر میدان کولنی هسته بــرتابع‌موج الکترون از سطح این‌کتاب فراتر می‌رود. این اثر، با افزودن یك عامل اضافی تابع فرمی $F(Z', p)$ یــا $F(Z', T_e)$ که درآن Z' عدد اتمی هستهٔ دختراست، باعث اصلاح طیف می‌شود. بالاخره باید اثر جزء ماتریس هسته‌ای، M_{fi}، را درنظر بگیریم که تاکنون فرض می‌کردیم که تأثیری درشکل طیف ندارد. این تقریب(که تقریب مجاز نیز نامیده می‌شود) معمولا بسیار خوب است، ولی در مواردی تقریب‌بسیار



شکل ۳.۹ طیفهای تکانه وانرژی جنبشی الکترونها وپوزیترونهای گسیل‌شده در واپاشی ^{64}Cu. در مقایسه با شکل ۲.۹، دراثر برهم‌کنشهای کولنی با دخترهسته تفاوتهایی به‌وجودآمده است.

بدی است ــ درحقیقت، در مواردی M_{fi} درتقریب مجازصفر می‌شود وهیچ طیفی به‌دست نمی‌آید! دراین‌موارد، بایدجمله‌های بعدی بسط موج تخت‌معادلهٔ (۱۹.۹) را درنظر بگیریم که وابستگی تکانه‌ای دیگری‌را وارد می‌کند. این‌موارد را، تا اندازه‌ای به‌غلط، واپاشهای ممنوع می‌نامند. این واپاشیها مطلقاً ممنوع نیستند، ولی چنانکه خواهیم دید احتمال وقوع آنهااز واپاشیهای مجاز کمتر ودرنتیجه نیمه‌عمرشان‌طولانیتر است. میزان ممنوعیت گذار، به‌تعداد جملات بسط مـوج تخت برای رسیدن به جـزء ماتریس غیرصفر بستگی دارد. بنابراین اولین جملهٔ پس‌از ۱، واپاشیهای ممنوع اول، وجملهٔ بعدی ممنوع دوم و غیره را به‌دست می‌دهد. دربخش ۴.۹ خواهیم دیدکه چگونه قواعدگزینش تکانه و پاریته انواع واپاشیهای ممکن را محدود می‌کند.

بدین‌سان طیف‌کامل β شامل سه‌عامل زیر است:

۱. عامل‌آماری $p^2(Q-T_e)^2$، که از تعداد حالتهای نهایی‌قابل‌حصول برای ذرات گسیل شده به‌دست می‌آید.
۲. تابع فرمی $F(Z', p)$، که به‌تأثیر میدان‌کولنی هسته مربوط می‌شود.
۳. جزءماتریس‌هسته‌ای $|M_{fi}|^2$، که اثرات مربوط به‌حالتهای اولیه ونهایی‌هسته را منظور می‌کند، و ممکن است یـك وابستگی اضافی تکانهٔ الکترون و نوترینو راهم به‌صورت $S(p, q)$ از جملات ممنوع واردکند

$$N(p) \propto p^2(Q-T_e)^2F(Z', p)|M_{fi}|^2S(p, q) \qquad (۲۶.۹)$$

۳.۹ آزمونهای تجربی «کلاسیك» برای نظریهٔ فرمی

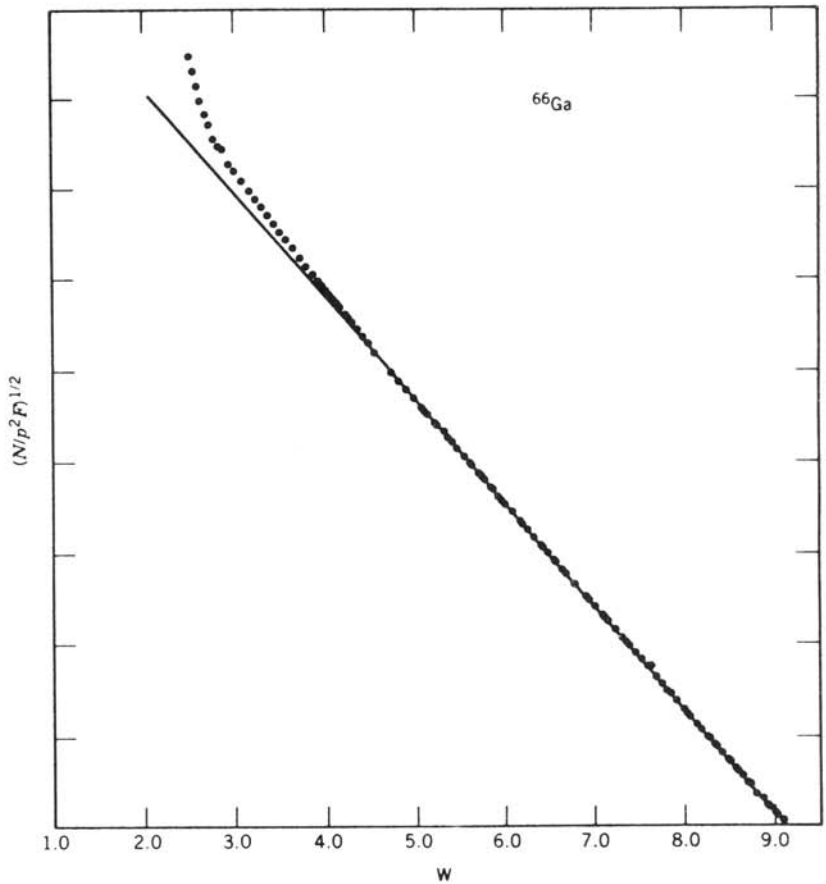
شکل طیف β

در تقریب مجاز، معادلهٔ (۲۶.۹) را می‌توان به‌صورت زیر بازنویسی کرد

$$(Q-T_e) \propto \sqrt{\frac{N(p)}{p^2F(Z', p)}} \qquad (۲۷.۹)$$

با رسم $\sqrt{N(p)/p^2F(Z', p)}$ برحسب T_e خط راستی حاصل می‌شود که محور x را در انرژی واپاشی Q قطع می‌کند. این‌نمودار را نمودار کوری (وگاهی هم نمودارفرمی یا نمودار فرمی ـ کوری) می‌نامند. مثالی‌ازنمودارکوری درشکل ۴.۹ نشان‌داده شده‌است. طیف‌خطی‌این‌نمودار سبب جلب‌اعتماد به‌نظریه به‌همین‌صورتی است‌که تدوین شده است، وروشی‌آسان برای تعیین انرژی نقطهٔ پایان (ودرنتیجه مقدار Q) به‌دست می‌دهد.

در واپاشیهای ممنوع، نمودارکوری استاندارد به صورت خط راست نیست، ولی با رسم $\sqrt{N(p)/p^2F(Z', p)S(p, q)}$ برحسب T_e می‌تـوان خطی‌بـودن را بـدان بازگرداند، که دراینجا تابع S ازوابستگی به‌تکانه و ازجملات مرتبهٔ بالاتر دربسط موج



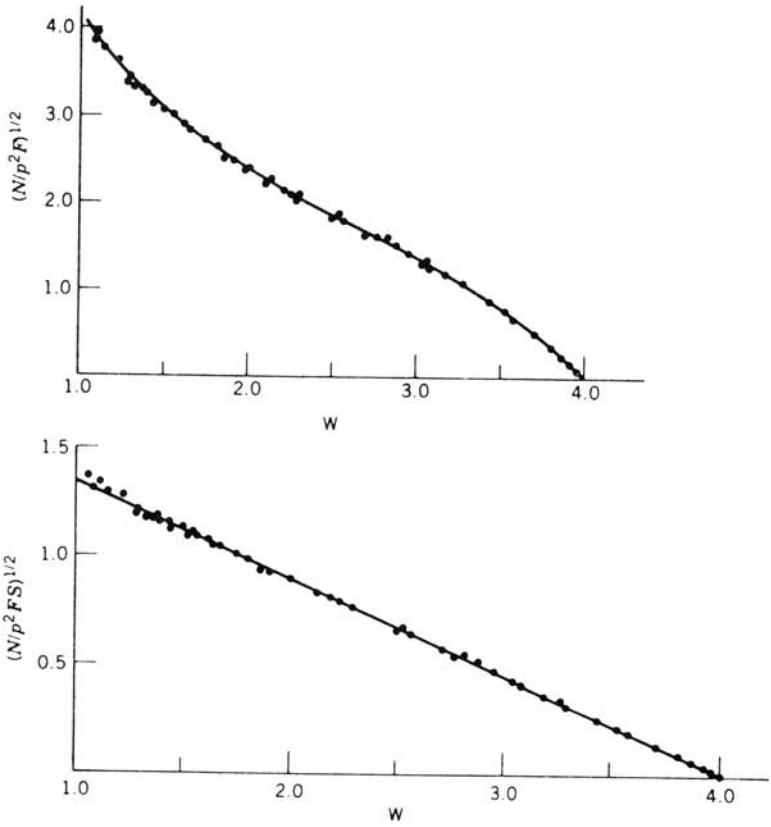
شکل ۴.۹ نمودار فرمی-کوری برای واپاشی مجاز $0^+ \longrightarrow 0^+$ در ^{66}Ga. مقیاس افقی، انرژی کل نسبیتی $(T_e + m_eC^2)$ برحسب m_eC^2 است. انحراف از خط راست در انرژی کم، از پراکندگی الکترونهای کم‌انرژی درداخل چشمهٔ رادیواکتیو ناشی می‌شود.

تخت‌حاصل می‌شود. تابع S را عامل شکل می‌نامند. برای مثال در مورد بعضی واپاشیهای ممنوع اول، این تابع صرفاً به‌صورت p^2+q^2 است.

همان‌طور که در شکل ۵.۹ نشان‌داده شده‌است، بادر نظر گرفتن عامل شکل نموداری خطی به‌دست می‌آید.

آهنگ واپاشی کل

برای پیدا کردن آهنگ واپاشی کل باید از معادلهٔ (۲۰.۹) برای تمام مقادیر تکانهٔ الکترون p، وبا قراردادن تکانهٔ نوترینو مساوی مقداری که از معادلهٔ (۲۲.۹) به‌دست



شکل ۵.۹ نمودار فرمی-کوری تصحیح نشده برای واپاشی بتازای ^{91}Y (بالا). با درنظر گرفتن عامل شکل $S(p, q)$ منظرهٔ خطی بازگردانده می‌شود. برای این‌نوع واپاشیهای ممنوع اول، بااستفاده از عامل‌شکل p^2+q^2 نمودار خطی حاصل می‌شود (پایین).

می‌آید و تابع p است، انتگرال بگیریم. بنابراین، برای واپاشیهای مجاز داریم

$$\lambda=\frac{g^2|M_{fi}|^2}{2\pi^3\hbar^7c^3}\int_0^{p_{\max}}F(Z', p)p^2(Q-T_e)^2\,dp \qquad (۲۸.۹)$$

این انتگرال‌سرانجام فقط به Z' و بیشینهٔ انرژی کل‌الکترون E_0 بستگی خواهد داشت (زیرا $cp_{\max}=\sqrt{E_0^2-m_e^2c^4}$)، وبنابراین بایدآن‌را به‌صورت زیر نشان دهیم

$$f(Z', E_0)=\frac{1}{(m_ec)^3(m_ec^2)}\int_0^{p_{\max}}F(Z', p)p^2(E_0-E_e)^2dp \qquad (۲۹.۹)$$

که درآن مقادیر ثابت برای بی‌بعدکردن f درنظرگرفته شده‌اند. تابع $f(Z', E_0)$ را

انتگرال فرمی می‌نامند، که برای مقادیر مختلف Z' و E_0 درجداول یافت می‌شود.
با توجه به $\lambda = 0.693/t_{1/2}$، داریم

$$ft_{1/2} = 0.693 \frac{2\pi^3\hbar^7}{g^2 m_e^5 c^4 |M_{fi}|^2} \qquad (30.9)$$

کمیت طرف چپ معادلهٔ (۳۰.۹) را نیمه‌عمر طبیعی یا مقدار ft می‌نامند. این کمیت، روشی برای مقایسهٔ احتمالات واپاشی بتازا در هسته‌های مختلف دراختیار می گذارد. معادلهٔ (۲۸.۹) نشان می‌دهد که آهنگ واپاشی به Z' و E_0 بستگی دارد و این وابستگی در f مستتر است، به‌طوری که تفاوت مقادیر مختلف ft را باید به‌علت تفاوت جزء ماتریس هسته‌ها و درنتیجه به‌علت تفاوتهای موجود در تابع موج هسته‌ها دانست.

گسترهٔ نیمه‌عمرهای واپاشی بتازا مانند واپاشی آلفازا بسیار وسیع است ـ به‌طوری که مقادیر ft ازحدود 10^3 تا 10^{20} ثانیه تغییرمی کنند. به‌این‌دلیل، غالباً مقادیر $\log_{10} ft$ (t برحسب ثانیه) داده می‌شود. واپاشیهای باکوتاهترین نیمه‌عمر تطبیقی ($\log ft \simeq 3$–4)را واپاشیهای ابرمجاز می‌نامند. بعضی از واپاشیهای ابرمجاز دارای حالتهای اولیه و نهایی 0^+ هستند که در این‌صورت جزء ماتریس را می‌توان به سهولت محاسبه کرد ($M_{fi} = \sqrt{2}$). همهٔ مقادیر $\log ft$ برای واپاشیهای $0^+ \to 0^+$ باید یکسان باشند. جدول ۲.۹ مقادیر $\log ft$ را برای کلیهٔ گذارهای ابرمجاز شناخته‌شدهٔ $0^+ \to 0^+$ نشان‌می‌دهد. این مقادیر در محدودهٔ خطای تجربی کاملاً ثابت به نظر می‌رسند. بعلاوه، با قراردادن $M_{fi} = \sqrt{2}$ و با استفاده از معادلهٔ (۳۰.۹) می‌توان مقدار ثابت شدت واپاشی بتازا را به‌دست آورد

$$g = 0.88 \times 10^{-4}\ \mathrm{MeV \cdot fm^3}$$

برای آنکه این ثابت با سایر ثابتهای بنیادی بیشتر قابل‌مقایسه باشد، باید آن را به‌صورت بی‌بعد بیان کنیم. بدین‌طریق می‌توانیم آن‌را با ثابتهای بی‌بعد سایر برهم‌کنشها (برای‌مثال، با ثابت ساختار زیر که مشخصهٔ برهم‌کنش الکترومغناطیسی است)مقایسه کنیم. اگر M، L، و T به ترتیب نمایندهٔ ابعاد جرم، طول، و زمان باشند، بعد g به‌صورت $M^1L^5T^{-2}$ است و هیچ ترکیبی از ثابتهای بنیادی $\hbar$ (با بعد $M^1L^2T^{-1}$) و c (با بعد L^1T^{-1})را نمی‌توان برای‌تبدیل g به‌یك ثابت بی‌بعد به‌کار برد. (برای مثال، $\hbar c^3$ دارای بعد $M^1L^5T^{-5}$ و در نتیجه $g/\hbar c^3$ دارای بعد T^3 است.) بنابراین جرم اختیاری m را درنظر می گیریم و نماهای i، j، و k را چنان انتخاب می‌کنیم که $g/m^i\hbar^j c^k$ بدون بعد باشد. بلافاصله یك جواب بامقادیر $i = -2$، $j = 3$، و $k = -1$ به‌دست می‌آید. به‌این ترتیب، نسبت مطلوب که با G نشان‌داده می‌شود برابراست با

$$G = \frac{g}{m^{-2}\hbar^3 c^{-1}} = g\frac{m^2 c}{\hbar^3} \qquad (31.9)$$

جدول ۲.۹ مقادیر ft برای واپاشیهای ابرمجاز $0^+ \to 0^+$.

واپاشی	$ft(s)$
$^{10}C \to {}^{10}B$	۳۱۰۰ ± ۳۱
$^{14}O \to {}^{14}N$	۳۰۹۲ ± ۴
$^{18}Ne \to {}^{18}F$	۳۰۸۴ ± ۷۶
$^{22}Mg \to {}^{22}Na$	۳۰۱۴ ± ۷۸
$^{26}Al \to {}^{26}Mg$	۳۰۸۱ ± ۴
$^{26}Si \to {}^{26}Al$	۳۰۵۲ ± ۵۱
$^{30}S \to {}^{30}P$	۳۱۲۰ ± ۸۲
$^{34}Cl \to {}^{34}S$	۳۰۸۷ ± ۹
$^{34}Ar \to {}^{34}Cl$	۳۱۰۱ ± ۲۰
$^{38}K \to {}^{38}Ar$	۳۱۰۲ ± ۸
$^{38}Ca \to {}^{38}K$	۳۱۴۵ ± ۱۳۸
$^{42}Sc \to {}^{42}Ca$	۳۰۹۱ ± ۷
$^{42}Ti \to {}^{42}Sc$	۳۲۷۵ ± ۱۰۳۹
$^{46}V \to {}^{46}Ti$	۳۰۸۲ ± ۱۳
$^{46}Cr \to {}^{46}V$	۲۸۳۴ ± ۶۵۷
$^{50}Mn \to {}^{50}Cr$	۳۰۸۶ ± ۸
$^{54}Co \to {}^{54}Fe$	۳۰۹۱ ± ۵
$^{62}Ga \to {}^{62}Zn$	۲۵۴۹ ± ۱۲۸۰

دلیل واضحی برای کاربرد m که باید در معادلهٔ (۳۱.۹) مورد استفاده قرار گیرد، وجود ندارد. اگر برهم‌کنش نوکلئون ـ نوکلئون موردنظر باشد، استفاده ازجرم نوکلئون مناسب است که دراین‌صورت ثابت شدت برابر $G = 1.0 \times 10^{-5}$ به‌دست می‌آید. ثابت قابل

مقایسه‌ای که برای توصیف برهم‌کنش پیون - نوکلئون در فصل ۴ به‌کار برده شده و با g_π^2 نشان داده شده است، از مرتبهٔ واحد است. بنابراین، می‌توانیم برهم‌کنشهای اساسی نوکلئون-نوکلئون را برحسب شدت به‌صورت زیر درجه‌بندی کنیم:

پیون - نوکلئون («قوی»)	۱
الکترومغناطیسی	10^{-2}
واپاشی بتازا («ضعیف»)	10^{-5}
گرانشی	10^{-39}

(آخرین مقدار ازتبدیل ثابت گرانش عمومی به‌صورت بدون بعد وبااستفاده ازجرم نوکلئون به‌دست آمده است.) برهم‌کنش واپاشی بتازا یکی از پدیده‌های یك ردهٔ عمومی است که به‌طور جمعی به‌نام برهم‌کنشهای ضعیف شناخته می‌شوند، وهمهٔ آنها با پارامتر شدت g مشخص می‌شوند. نظریهٔ فرمی آنچنان موفقیت قابل‌توجهی در توصیف این پدیده‌ها دارد که غالباً آنها را به‌عنوان مثالهایی از برهم‌کنش عمومی فرمی موردبحث قرارمی‌دهند. با وجود این، نظریهٔ فرمی ازچند جهت نمی‌تواند برخی از جزئیات برهم‌کنش ضعیف را تشریح کند (این جزئیات در بحث فعلی واپاشی بتازا حائز اهمیت نیستند). نظریه‌ای که برهم‌کنش ضعیف را با استفاده از ذرات تبادلی توصیف می‌کند (همان‌طور که درمورد نیروی قوی در فصل ۴ بحث شد)، در توصیف این‌خصوصیات موفق‌تر است. این ذرات تبادلی که اخیراً کشف شده‌اند (و به نام نامبارك بوزونهای برداری میانه معروف‌اند) با تفصیل بیشتری درفصل ۱۸ مورد بررسی قرار می‌گیرند.

جرم نوترینو

نظریهٔ فرمی بر مبنای فرض جرم سکون صفر برای نوترینو استوار است. با نگاه سطحی ممکن است اندازه‌گیری جرم سکون نوترینو برای اثبات صحت این نظریه آسان به نظر آید. با توجه مجدد به‌معادلات (۱.۹) و (۲.۹) ویا معادل آنها برای هسته‌های $A>1$، بلافاصله روشی برای آزمودن این فرض به‌دست می‌آوریم. می‌توانیم مقدار Q واپاشی (به‌انضمام مقدار احتمالا غیر صفر جرم نوترینو) را از معادلهٔ (۶.۹) یا (۹.۹) محاسبه کنیم، ومی‌توانیم‌مقدار Q را همانند معادلهٔ (۸.۹) ازانرژی‌بیشینهٔ ذرات بتا اندازه‌بگیریم. بدین‌سان، با مقایسهٔ این دومقدار می‌توان جرم نوترینو را استنتاج کرد.

به‌این‌طریق می‌توان‌نتیجه گرفت که جرم سکون نوترینو کوچکتر ازحدود $1\,\mathrm{keV}/c^2$ است، ولی نمی‌توان از این حد فراتر رفت، زیرا مقادیر جرم اتمی اندازه‌گیری شده که برای محاسبهٔ Q به‌کار می‌روند دارای دقتهایی از مرتبهٔ keV هستند، و خطاهای تجربی انرژیهای نقاط پایانی نیز ازمرتبهٔ keV خواهند بود. در روش بهتر تعیین جرم نوترینو، از شکل طیف بتا در نواحی نزدیك به‌حد بالا استفاده می‌شود. اگر $m_\nu \neq 0$ باشد، معادلهٔ

(۲۲.۹) دیگر دقیقاً معتبر نیست. اما اگر $m_\nu c^2 \ll Q$ باشد، درقسمت اعظم طیف بتای مشاهده شده $E_\nu \approx qc$ است و نوترینو را می‌توان در تقریب حدی نسبیتی $E_\nu \gg m_\nu c^2$ مورد بررسی قرارداد. دراین‌حالت، معادلهٔ (۲۲.۹) تقریب بسیارخوبی است وجرم نوترینو تأثیر ناچیزی خواهد داشت. اما در نزدیکی نقطهٔ پایان طیف β، انرژی نوترینو به‌صفر می‌رسد وانتظار داریم که درنقطه‌ای $E_\nu \sim m_\nu c^2$ شود، که دراین‌صورت محاسبهٔ قبلی عامل آماری برای شکل طیف نادرست است. در نزدیکی نقطهٔ پایان، انرژی جنبشی نوترینو از این‌مقدار هم کمترمی‌شود و می‌توانیم آن را به‌طور نانسبیتی بررسی کنیم. بنابراین داریم $q^2 = 2 m_\nu T_\nu$ و

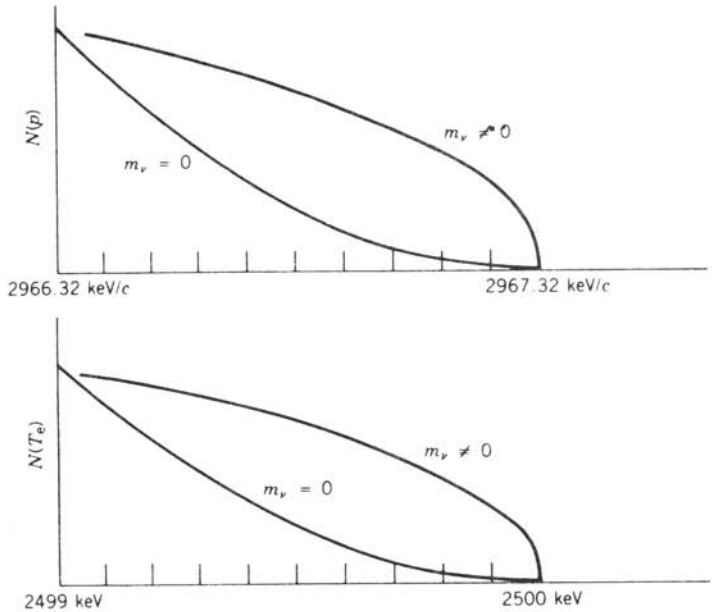
$$N(p) \propto p^2[Q - \sqrt{p^2c^2 + m_e^2c^4} + m_ec^2]^{1/2} \qquad (۳۲.۹)$$

که باهمان روش به‌کار رفته درتعیین معادلهٔ (۲۴.۹) حاصل می‌شود، جز اینکه برای $m_\nu > 0$ باید درحد نانسبیتی از $dq/dE_f = m_\nu/q$ استفاده کنیم. همچنین داریم

$$N(T_e) \propto (T_e^2 + 2T_em_ec^2)^{1/2}(Q - T_e)^{1/2}(T_e + m_ec^2) \qquad (۳۳.۹)$$

کمیت داخل کروشه درمعادلات (۳۲.۹) و (۲۴.۹) که درست برابر $(Q - T_e)$ است، در نقطهٔ پایان صفر می‌شود. بنابراین اگر درنقطهٔ پایان $m_\nu = 0$ باشد داریم $dN/dp \to 0$، در حالی که اگر $m_\nu > 0$ باشد خواهیم داشت $dN/dp \to \infty$. یعنی طیف تکانه برای $m_\nu = 0$ باشیب صفر، و برای $m_\nu > 0$ با شیب بی‌نهایت به‌نقطهٔ پایان میل می‌کند. شیب طیف انرژی، dN/dT_e، نیز رفتاری‌مشابه دارد. بنابراین، می‌توانیم با بررسی‌شیب‌طیف درنقطهٔ‌پایان، چنانکه در شکل ۶.۹ مشاهده می‌شود، حد جرم نوترینو را مورد مطالعه قرار دهیم. متأسفانه $N(p)$ و $N(T_e)$ نیز در این نقطه به صفر میل می‌کنند، و ما باید شیب اطلاعات مربوط به‌کمیتی را بررسی کنیم که به‌طور پیوسته به‌صفر میل کند (و در نتیجه از نظر آماری با شرایط بدتری روبه‌رو می‌شویم).

جالبترین اندازه‌گیری تجربی از این نوع، انتخاب یك موردواپاشی با مقدار Q کوچك است (به‌طوری‌که بزرگی نسبی اثر محسوستر شود) و نیز موردی‌که‌حالتهای‌اتمی قبل و بعد از واپاشی بخوبی شناخته شده باشند، که دراین‌صورت تصحیحات مهم ناشی‌از تأثیر حالتهای مختلف اتمی قابل‌محاسبه‌اند. (اثرات حالتهای اتمی دربیشتر آزمایشهای مربوط به‌واپاشی بتازا ناچیزند، ولی درمواردی‌که درجستجوی اثر کوچکی هستیم این اثرات حائزاهمیت می‌شوند.) واپاشی ^3H (تریتیم)، با توجه به‌هردو معیار، مورد مناسبی برای بررسی است. مقدار Q دراین واپاشی نسبتاً کوچك است (۱۸٫۶ keV)، و تابع موجهای اتمهای تك الکترونی هم بخوبی شناخته شده‌اند. (درحقیقت، محاسبهٔ حالت‌یون حاصل ^3He یك مسئلهٔ استاندارد درمکانیك‌کوانتومی مقدماتی است.) شکل ۷.۹ بخشی‌از نتایج تجربی خیلی دقیق را نشان می‌دهد. لانگر وموفات‌که نخستین پژوهشگران در این زمینه بودند حد بالای $m_\nu c^2 < 200$ eV را گزارش کردند، اما برگویست در دو دههٔ

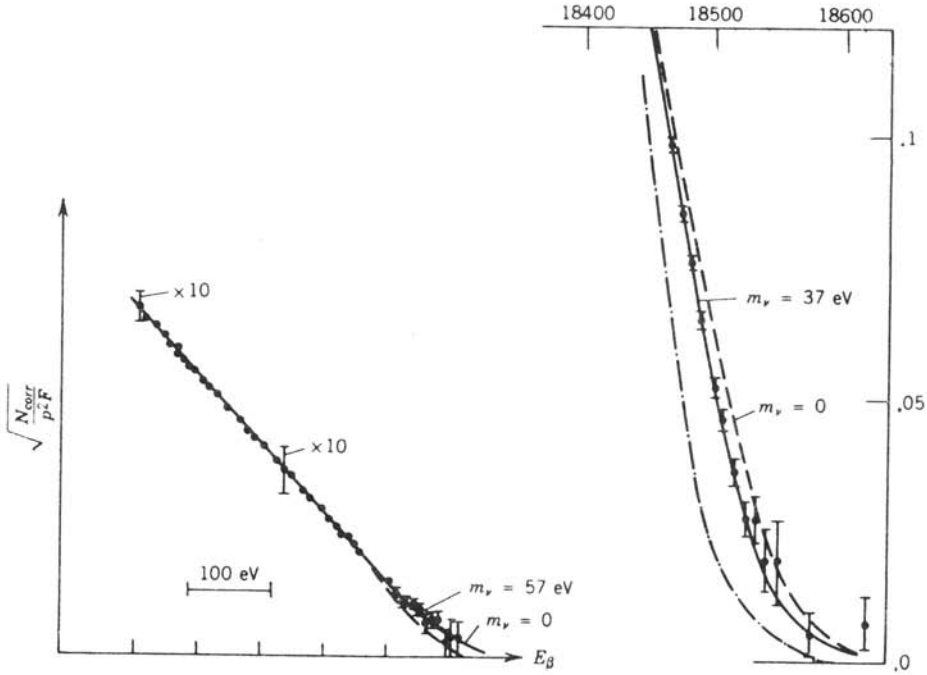


شکل ۶.۹ نمودار گسترش یافتهٔ حد فوقانی (یا ناحیهٔ آخرین keV) طیفهای تکانه و انرژی شکل ۲.۹. ضرایب بهنجارش اختیاری‌اند، اما نکتهٔ قابل‌توجه تفاوت شکل طیفها برای حالتهای $m_\nu = 0$ و $m_\nu \neq 0$ است. شیب منحنی در نقطهٔ پایان، برای $m_\nu = 0$ برابر صفر و برای $m_\nu \neq 0$ بی‌نهایت است.

بعد این‌حد را به ۶۰ eV تقلیل داد.[1] یکی از نتایج آزمایشهای اخیر جرم غیرصفر احتمالی نوترینو را بین ۱۴ تا ۴۶eV براورد کرده است،[2] درحالی‌که سایر نتایج حدبالاتر حدود ۲۰ eV را مطرح می‌کنند. درحال‌حاضر، چند آزمایش برای حل این‌مسئله‌وکاهش احتمالی حدبالای جرم نوترینو در دست اجراست.

چرا این همه‌کوشش صرف پیگیری این اندازه‌گیریها شده است؟ جرم نوترینو در دو حوزهٔ ظاهراً نامرتبط فیزیك تأثیری بسیار مهم دارد. اگر نوترینوجـرم داشته باشد، بنابر فرمولبندی‌نظری «الکتروضعیف» که برهم‌کنشهای‌ضعیف والکترومغناطیسی‌را جنبه‌های مختلف یك نیروی اساسی می‌داند، تبدیل نوترینوهای الکترونی یعنی نوترینوهایی که در واپاشی بتازا گسیل می‌شوند، به‌سایر نوترینوها که نوترینوهای τ وموئون‌نامیده می‌شوند [فصل۱۸، (جلددوم،ترجمهٔفارسی)]، مجازاست. این تبدیل‌می‌تواند توجیه کنندهٔ این نکته باشد که تعداد نوترینوهای خورشیدی مشاهده شده فقط در حدود یك سوم مقدار پیش‌بینی‌شده برمبنای نظریه‌های فعلی همجوشی خورشیدی است. ازسوی دیگر، به‌نظر می‌رسد که مقدار مادهٔ موجود درجهان بیش از آن است که حتی با قویترین تلسکوپها مشاهده می‌شود. این

1. K. E. Bergkvist, *Nucl. Phys.* B39, 317 (1972).
2. V. A. Lubimov et al, *Phys. Lett.* B94, 266 (1980).



شکل ۷.۹ تعیین تجربی جرم نوترینو با استفاده از واپاشی بتازای تریتیم (^3H). اطلاعات سمت چپ با جرم صفر توافق دارند و نمایانگر حد بالای ۶۰eV هستند. به نظر می‌رسد که اطلاعات جدیدتر مقدار غیرصفری درحدود ۳۰eV را مطرح می‌کنند. اما، این اطلاعات باید با توجه به تفکیک دستگاه اندازه‌گیری و اثرات حالت اتمی تصحیح شوند و ممکن است با جرم صفر سازگار باشند.

ماده بی‌فروغ است، یعنی هیچ تابشی گسیل نمی‌کند. بنابر نظریهٔ کیهانشناسی مهبانگ، که تقریباً تمام پدیده‌های اخترشناختی مشاهده شده را تبیین می‌کند، جهان حاضر باید پر از نوترینوهای ناشی از جهان آغازین باشد و تراکم کنونی آن به‌حدود $10^8/m^3$ برسد. اگر این نوترینوها بی‌جرم باشند، نمی‌توانند جاذبهٔ گرانشی لازم برای «بسته» شدن جهان (یعنی توقف و معکوس شدن انبساط آن) را فراهم سازند، ولی آنها با جرم سکونی به کوچکی ۵eV می‌توانند چگالی جرم - انرژی مورد نیاز را تأمین کنند. بنابراین مطالعهٔ جرم نوترینو نه تنها بر فیزیک هسته‌ای و ذرات بنیادی، بلکه بر فیزیک خورشیدی و کیهانشناسی نیز تأثیر مستقیم و فوری خواهد گذاشت.

۴.۹ قواعد گزینش تکانهٔ زاویه‌ای و پاریته واپاشیهای مجاز

در تقریب مجاز، به جای تابع موجهای الکترون و نوترینو از مقادیر این تابعها در مبدأ

استفاده‌شده‌است. یعنی فرض کرده‌ایم که الکترون و نوترینو در $r = ۰$ به‌وجود می‌آیند. در این حالت، این ذرات نمی‌توانند هیچگونه تکانهٔ زاویه‌ای مداری با خود حمل کنند، و تنها تغییر تکانهٔ زاویه‌ای هسته باید از اسپینهای الکترون و نوترینو ناشی شود که مقدار هریك از آنها برابر $s = ۱/۲$ است. این دو اسپین می‌توانند باهم موازی (با مقدار کل $S = ۱$) یا پادموازی (با مقدار کل $S = ۰$) باشند. اگر اسپینها پادموازی باشند (که به واپاشی فرمی معروف است)، در تقریب مجاز ($l = ۰$) تغییری در اسپین هسته صورت نمی‌گیرد: $\Delta I = |I_i - I_f| = ۰$. اگر اسپینهای الکترون و نوترینو موازی باشند (که واپاشی گاموف ـ تلر نامیده می‌شود)، تکانهٔ زاویه‌ای کل منتقل شده در تقریب مجاز برابر ۱ واحد است و در نتیجه I_i و I_f از طریق برداری به‌طول ۱ واحد باهم جفت شده‌اند: $\mathbf{I}_i = \mathbf{I}_f + ۱$. این موضوع فقط در صورتی امکان‌پذیر است که $\Delta I = ۱$ یا $\Delta I = ۰$ باشد (جز حالت $I_i = ۰$ و $I_f = ۰$ که در این صورت فقط گذار فرمی می‌تواند وجود داشته باشد).

اگر الکترون و نوترینو حامل تکانهٔ زاویه‌ای مداری نباشند، پاریتهٔ حالتهای اولیه و نهایی باید یکسان باشد زیرا پاریتهٔ مربوط به تکانهٔ زاویه‌ای مداری l به‌صورت $(-۱)^l$ است.

بنابراین قواعد گزینش برای واپاشیهای بتازای مجاز به‌صورت زیر است

$$\Delta I = ۰, ۱ \qquad \Delta\pi \text{ (تغییر پاریته)} = \text{نه}$$

نمونه‌هایی از واپاشیهای بتازای مجاز عبارت‌اند از:

$$^{۱۴}\mathrm{O} \rightarrow {}^{۱۴}\mathrm{N}^*$$

این واپاشی $۰^+ \rightarrow ۰^+$ به‌حالت برانگیختهٔ $^{۱۴}\mathrm{N}$ باید صد درصد از نوع فرمی باشد (زیرا $۰^+ \rightarrow ۰^+$ نمی‌تواند از طریق واپاشی گاموف ـ تلر که حامل یك واحد تکانهٔ زاویه‌ای است صورت گیرد). مثالهای $^{۳۴}\mathrm{Cl} \rightarrow {}^{۳۴}\mathrm{S}$ و $^{۱۰}\mathrm{C} \rightarrow {}^{۱۰}\mathrm{B}^*$ نمونه‌های دیگری از این نوع‌اند که در هردو گذار داریم $۰^+ \rightarrow ۰^+$.

$$^{۶}\mathrm{He} \rightarrow {}^{۶}\mathrm{Li}$$

این واپاشی $۰^+ \rightarrow ۱^+$ است که باید صددرصد یك گذار گاموف ـ تلر باشد. سایر واپاشیهای مجاز گاموف ـ تلر خالص عبارت‌اند از $^{۱۳}\mathrm{B} \rightarrow {}^{۱۳}\mathrm{C}\ [(۳/۲)^- \rightarrow (۱/۲)^-]$، $^{۲۳۰}\mathrm{Pa} \rightarrow {}^{۲۳۰}\mathrm{Th}^*(۲^- \rightarrow ۳^-)$، و $^{۱۱۱}\mathrm{Sn} \rightarrow {}^{۱۱۱}\mathrm{In}[(۷/۲)^+ \rightarrow (۹/۲)^+]$.

$$n \rightarrow p$$

در این مورد داریم $\Delta I = ۰[(۱/۲)^+ \rightarrow (۱/۲)^+]$، و بنابراین قواعد گزینش فرمی (F) و گاموف ـ تلر (GT) هردو صادق‌اند. این یك نمونه از گذار «مخلوط» F+GT است، که در آن سهم دقیق F و GT با توجه به تابع موجهای اولیه و نهایی تعیین می‌شود. برای

سهولت نسبت y دامنه‌های فرمی و گاموف ـ تلر (یعنی اجزای ماتریس) را به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$y=\frac{g_F M_F}{g_{GT} M_{GT}} \qquad (۳۴.۹)$$

که‌در آن M_F و M_{GT} اجزای حقیقی ماتریس‌هسته‌ای‌فرمی و گاموف ـ تلر هستند. با تعریف g_F و g_{GT} به‌صورت ثابتهای مشابه با ثابت g در معادلهٔ (۲۸.۹)، تغییر شدت واپاشیهای فرمی و گاموف ـ تلر امکان‌پذیر می‌شود. (در آهنگ واپاشی باید به‌جای $g^2|M_{fi}|^2$ مقدار $g_F^2|M_F|^2+g_{GT}^2|M_{GT}|^2$ را قرار دهیم.) در اینجا فرض می‌کنیم که g_F همان مقدار g مربوط به واپاشیهای ابرمجاز فرمی ($0^+ \to 0^+$) را داراست. برای واپاشی نوترون، می‌توان جزء ماتریس فرمی را به‌سهولت محاسبه کرد: $|M_F| = 1$. چون آهنگ واپاشی با $g_F^2 M_F^2(1+y^{-2})$ متناسب است، آهنگ واپاشی‌نوترون محاسبهٔ نسبت y را امکان‌پذیر می‌سازد و درنتیجه به‌دست می‌آوریم 0.467 ± 0.003. یعنی ۸۲درصد ازاین واپاشی از نوع گاموف ـ تلر و ۱۸٪ از نوع فرمی است.

به طور کلی، تابع‌موجهای اولیه و نهایی هسته باعث پیچیدگی عملیات در محاسبهٔ M_F و M_{GT} می‌شوند، اما این محاسبه برای یك گروه خاص واپاشی ساده است. این گروه‌همان گروه واپاشیهای آینه‌ای است که قبلا در بخش ۱.۳ بررسی شدند. در واپاشیهایی مانند $^{41}_{21}Sc_{20} \to {}^{41}_{20}Ca_{21}$ که بیست‌ویکمین پروتون به‌صورت بیست‌ویکمین نوترون درمی‌آید، تغییری در تابع‌موج صورت نمی‌گیرد. تابع‌موجهای اولیه و نهایی، بجز تفاوتهای آینه‌ای ناشی از برهم‌کنش کولنی، مشابه یکدیگرند و محاسبهٔ M_F و M_{GT} به‌سهولت انجام می‌شود. مقادیر g_F و M_F برای این واپاشیها بامقادیر مربوط به‌نوترون آزاد برابر است.

این‌نتیجه ممکن است تاحدی تعجب‌آور باشد زیرا نوکلئون دریك‌هسته به‌هیچ‌وجه مانند نوکلئون آزاد عمل نمی‌کند. زیرا در این‌حالت، ابر مزونی‌که نوکلئون را احاطه کرده است در واکنشهای تبادلی با نوکلئونهای مجاور شرکت دارد. فرضیهٔ عدم تغییر برهم‌کنشهای فرمی نوکلئونهای موجود در هسته در اثر مزونهای اطراف، فرضیهٔ جریان برداری پایسته (CVC) نامیده می‌شود. (اصطلاح «بردار» مربوط به خصوصیات تبدیلی عملگری است که بخش فرمی واپاشی را ایجاد می‌کند، بخش گاموف ـ تلر از برهم‌کنشی که از نوع «بردار محوری» است ناشی‌می‌شود.) فرضیهٔ CVC را می‌توان با مقایسه با برهم‌کنش الکترومغناطیسی درك کرد. بارالکتریکی دراثرتبدیل $p \leftrightarrow n+\pi^+$ که‌بخشی از برهم‌کنش تبادلی‌است که پروتون می‌تواند درآن‌شرکت‌کند، تغییر نمی‌کند. بارالکتریکی دراین برهم‌کنش پایسته و برهم‌کنش کولنی بدون تغییر است. (الکترونهایی‌که با نیروی کولنی در قید هسته‌اند ازاین تبدیل بی‌خبرند.) از طرف دیگر، برهم‌کنشهای مغناطیسی، چنانکه درمورد گشتاورهای مغناطیسی مدل پوسته‌ای در بخش ۱.۵ بحث کردیم، دراثرتبدیل

جدول ۳.۹ نسبت اجزای ماتریس فرمی به‌گاموف‌تلر.

	واپاشی	$=g_F M_F/g_{GT}M_{GT}$	%F	%GT
واپاشیهای آینه‌ای	$n \to p$	۰٫۴۶۷ ± ۰٫۰۰۳	۱۸	۸۲
	$^{3}H \to {}^{3}He$	۰٫۴۷۹ ± ۰٫۰۰۱	۱۹	۸۱
	$^{13}N \to {}^{13}C$	۱٫۷۷۹ ± ۰٫۰۰۶	۷۶	۲۴
	$^{21}Na \to {}^{21}Ne$	۱٫۴۱۶ ± ۰٫۰۱۲	۶۷	۳۳
	$^{41}Sc \to {}^{41}Ca$	۰٫۹۴۹ ± ۰٫۰۰۳	۴۷	۵۳
واپاشیهای غیر آینه‌ای	$^{24}Na \to {}^{24}Mg$	−۰٫۰۲۱ ± ۰٫۰۰۷	۰٫۰۴۴	۹۹٫۹۵۶
	$^{41}Ar \to {}^{41}K$	+۰٫۰۲۷ ± ۰٫۰۱۱	۰٫۰۷۳	۹۹٫۹۲۷
	$^{46}Sc \to {}^{46}Ti$	−۰٫۰۲۳ ± ۰٫۰۰۵	۰٫۰۵۳	۹۹٫۹۴۷
	$^{52}Mn \to {}^{52}Cr$	−۰٫۱۴۴ ± ۰٫۰۰۶	۲	۹۸
	$^{65}Ni \to {}^{65}Cu$	−۰٫۰۰۲ ± ۰٫۰۱۹	<۰٫۰۴	>۹۹٫۹۶

$p \leftrightarrow n + \pi^+$ دستخوش تغییراتی اساسی خواهندشد. در واپاشی بتازا، مزونهای اطراف تأثیری بر g_F (مانندبار الکتریکی) ندارند، درحالی که g_{GT} (مانند گشتاورهای مغناطیسی) ممکن است دراثر ابر مزونی تغییر کند. دربعضی هسته‌ها، این تغییر می‌تواند به ۲۰ تا ۳۰٪ برسد. جزء ماتریس M_{GT} نیز متناسب باحالت خاص‌مدل پوسته‌ای نوکلئونی که در گذار شرکت دارد تغییر می کند.

جدول ۳.۹ خلاصهٔ مقادیر نسبت y دامنه‌های فرمی به‌گاموف ـ تلر را برای بعضی هسته‌های آینه‌ای، بادرنظرگرفتن فرضیهٔ CVC (g_F نسبت به‌مقدارمتناظر با واپاشی نوترون بدون تغییر می‌ماند) و $|M_F| = ۱$، نشان می‌دهد. این مقادیر ازآهنگهای واپاشی به‌دست آمده‌اند.

برای واپاشیهایی که درآنها تابع‌موجهای اولیه و نهایی بسیار با هم متفاوت‌اند، جزء ماتریس فرمی صفر است، وبنا براین اندازه‌گیری نسبت y برای این واپاشیها راهی برای تعیین میزان خلوص تابع‌موجها به‌دست می‌دهد. جدول ۳.۹ بعضی‌از مقادیر مشخصهٔ

γ را برای گذارهای هسته‌های غیر آینه‌ای نیز نشان می‌دهد. این مقادیر از اندازه‌گیری توزیع زاویه‌ای ذرات β نسبت به‌جهتی خاص (مشابه مطالعات مربوط به‌واپاشیهای آلفازا که درفصل ۸ بررسی شد) به‌دست آمده‌اند. همچنانکه مشاهده می‌شود، این مقادیر عموماً کوچك‌اند که این امر نمایانگر ممنوعیت گذارهای فرمی و در نتیجه خلوص نسبی تابع موجهاست.

واپاشیهای ممنوع

«ممنوع» نامیدن واشیها تا اندازه‌ای بی‌مسمی است. احتمال این واپاشیها معمولا کمتر از واپاشیهای مجاز است (وچنانکه درفصل بعد بررسی خواهدشد، عموماً نیمه‌عمر طولانیتری دارند). ولی اگر اجزای ماتریس مجاز صفر شوند، واپاشیهای ممنوع تنها واپاشیهای ممکن خواهند بود.

محتملترین واپاشی ممنوع هنگامی رخ می‌دهد که حالتهای اولیه ونهایی پاریته‌های مخالف داشته باشند، وبنابراین قاعدهٔ گزینش واپاشی مجاز نقض خواهد شد. برای تغییر پاریته، الکترون و نوترینو باید با تکانهٔ زاویه‌ای مداری فرد نسبت به‌هسته گسیل شوند. برای مثال، یك فرایند واپاشی ۱ MeV را درنظر می‌گیریم. اگر همهٔ انرژی واپاشی به‌الکترون داده‌شود، تکانهٔ آن ۱٫۴ MeV/c وبیشینهٔ تکانهٔ زاویه‌ای آن نسبت به‌هسته‌برابر $pR = ۸٫۴\ \mathrm{MeV}\cdot\mathrm{fm}/c$ خواهد شد (دراینجا R شعاع یك‌هستهٔ معمولی وبرابر ۶ fm در نظر گرفته شد). این مقدار تکانهٔ زاویه‌ای برحسب واحد $\hbar$، معادل $pR/\hbar = ۰٫۰۴$ می‌شود. بنابراین، درحالی‌که احتمال واپاشی با $l = ۱$ کمتر از $l = ۰$ است، واپاشیهای با $l = ۳, ۵, ۷, \ldots$ بسیار نامحتمل خواهندبود، ودرحال‌حاضرفقط می‌توانیم‌واپاشیهای ممنوع با $l = ۱$ را در نظر بگیریم. این واپاشیها را واپاشیهای ممنوع اول می‌نامند و مانند واپاشیهای مجاز دارای نوع فرمی، با اسپینهای الکترون و نوترینو پادموازی ($S = ۰$)، و نوع گاموف ـ تلر بااسپینهای موازی ($S = ۱$) هستند. باتوجه به‌جفت‌شدگی $S = ۰$ با $l = ۱$ برای واپاشیهای فرمی، کل تکانهٔ زاویه‌ای انتقال یافته در واپاشی بتازا برابریك‌واحد می‌شود، به‌طوری‌که $\Delta I = ۰$ یا $\Delta I = ۱$ (ولی بدون حالت $۰ \to ۰$). در جفت‌شدگی $S = ۱$ با $l = ۱$ برای واپاشیهای گاموف ـ تلر، کل‌مقدار تکانهٔ‌زاویه‌ای انتقال‌یافته برابر ۰، ۱، یا ۲ واحد می‌شود، به‌طوری‌که $\Delta I = ۰, ۱, ۲$. بنابراین قاعدهٔ گزینش برای واپاشیهای ممنوع اول به‌صورت زیر است

$$\Delta I = ۰,\ ۱,\ ۲ \qquad \Delta\pi = \text{آری}$$

برخلاف سادگی نسبی واپاشیهای مجاز، دراین حالت با شش جزء ماتریس مختلف برای واپاشیهای ممنوع اول روبه‌رو می‌شویم، وتحلیل آهنگهای واپاشی یا توزیعهای زاویه‌ای بسیار پیچیده می‌شود. ما فقط چند مورد از واپاشیهای ممنوع اول را ذکر می‌کنیم.

$$^{17}N \rightarrow {}^{17}O \qquad \left(\frac{1}{2}^{-} \rightarrow \frac{5}{2}^{+}\right)$$

$$^{76}Br \rightarrow {}^{76}Se \qquad (1^{-} \rightarrow 0^{+})$$

$$^{122}Sb \rightarrow {}^{122}Sn^{*} \qquad (2^{-} \rightarrow 2^{+})$$

گذارهای با $\Delta I \geqslant 2$ وبدون تغییر پاریته، در هیچیك از طرق قواعد گزینش مجاز یاممنوع اول امکان‌پذیر نیستند. برای این گذارها باید گسیل β با $l = 2$ را درنظر بگیریم، درنتیجه‌این نوع‌واپاشیها را واپاشی‌ممنوع‌دوم می‌نامند. وقتی $S = 0$ یا $S = 1$ را با $l = 2$ جفت کنیم، می‌توانیم اسپین هسته را به‌هرمقدار از $\Delta I = 0$ تا $\Delta I = 3$ (البته با چند استثنا مانند $0 \rightarrow 0$ و $1/2 \rightarrow 1/2$) تغییر دهیم. موارد $\Delta I = 0, 1$ درحوزهٔ قواعد گزینش واپاشیهای مجاز قرار دارند، و انتظار داریم‌که سهم جملات مربوط به‌واپاشیهای ممنوع دوم در آنها ناچیز (شاید درتوزیعهای زاویه‌ای از مرتبهٔ 10^{-3} تا 10^{-4} و درشکل طیف از مرتبهٔ 10^{-6} تا 10^{-8}) باشد. باکنارگذاشتن این‌موارد، قواعد گزینش برای‌واپاشیهای ممنوع دوم به‌صورت زیر است

$$\Delta I = 2, 3 \qquad \Delta\pi = \text{نه}$$

نمونه‌هایی از واپاشیهای ممنوع دوم عبارت‌اند از

$$^{22}Na \rightarrow {}^{22}Ne \quad (3^{+} \rightarrow 0^{+})$$

$$^{137}Cs \rightarrow {}^{137}Ba \quad \left(\frac{7}{2}^{+} \rightarrow \frac{3}{2}^{+}\right)$$

باادامهٔ این فرایند، به‌واپاشیهای ممنوع سوم ($l = 3$) می‌رسیم که قواعد گزینش آن در واپاشیهـای ممنوع اول‌هم رعایت نمـی‌شود و به‌صورت «$\Delta I = 3$ یـا $\Delta I = 4$» و «$\Delta\pi =$ آری» درمی‌آید.

$$^{87}Rb \rightarrow {}^{87}Sr \left(\frac{3}{2}^{-} \rightarrow \frac{9}{2}^{+}\right)$$

$$^{40}K \rightarrow {}^{40}Ca \ (4^{-} \rightarrow 0^{+})$$

در شرایط بسیار استثنایی، حتی واپاشیهای ممنوع چهارم ($l = 4$) نیز می‌تواند رخ دهد که قاعدهٔ گزینش آن به‌صورت «$\Delta I = 4$ یا $\Delta I = 5$» و «$\Delta\pi =$ نه» است

$$^{115}In \rightarrow {}^{115}Sn \left(\frac{9}{2}^{+} \rightarrow \frac{1}{2}^{+}\right)$$

در بخش بعد خواهیم دید کـه هرچه مرتبهٔ ممنوعیت بالاتـر باشد، احتمال واپاشی کمتر می‌شود. هسته در صورت امکان ترجیح می‌دهد کـه از طریق فرایند مجاز یـا ممنوع اول واپاشیده شود، و مراتب بالاتـر معمولا به قدری ضعیف‌اند کـه مشاهده نمی‌شوند. فقط در صورتی که هیچ مد واپاشی دیگری امکان‌پذیر نباشد، موارد بسیار نادر ممنوع سوم و چهارم را می‌توان مشاهده کرد.

۵.۹ نیمه‌عمرهای تطبیقی وواپاشیهای ممنوع

نیمه‌عمرهای واپاشی‌بتازا گسترهٔ بسیار وسیعی را، از چند میلی‌ثانیه تا حدود 10^{16} سال، دربـرمی‌گیرند. بخشی از این تغییرات به‌علت مطابقت ضعیف تـابع‌موجهای ابتدایی و نهایی هسته است، ولی مشکل می‌توان تصور کرد که تابع‌موجهای هسته‌ای از چنان خلوص وپیکربندی خاصی برخوردار باشند که این اثر بتواند بیش از اندکی از این‌تغییرات ۲۶ مرتبهٔ بزرگی را توجیه کند.

منشأ اصلی این تغییرات نیمه‌عمر، مشکل نسبی تولید ذرات بتا ونوترینو درحالتی با تکانهٔ زاویه‌ای $l > 0$ است. همان‌طور که دربخش قبل دیـدیم، نمونهٔ (کلاسیك) تکانهٔ زاویه‌ای ذرات بتا باانرژی ۱ MeV دارای مقدار بیشینه‌ای از مرتبهٔ $l \sim 0.04\hbar$ است. یعنی، احتمال گسیل الکترون و نوترینو در حالت با عدد کوانتومی $l > 0$ بسیار کوچك است.

می‌توان این تخمین کیفی را با درنظر گـرفتن تابع‌مـوجهای الکترون و نوترینو، به‌صورت امواج تخت $e^{i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}/\hbar}$، به شکل کمی‌تر درآورد. با بسط این تابع نمایی داریم $1+(i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r})/\hbar+(1/2)[(i\mathbf{p}\cdot\mathbf{r})/\hbar]^2+\dots$. واپاشیهای‌مجاز ازهمان‌جملهٔ‌اول‌این‌بسط (پس ازقرارگرفتن بین‌تابع موجهای ابتدایی ونهایی‌هسته وبا درنظرگرفتن جملات‌اسپینی مناسب) حاصل می‌شوند. درصورتی‌که تابع موجهای هسته سبب صفرشدن این‌جمله شوند (مثلا وقتی‌که پاریته‌ها وضعیت متقابل‌داشته باشند)، باید جملهٔ بعدی را درنظر بگیریم که دراین‌صورت سهم هسته (بجز اسپین) عبارت است از $\int \psi_f^* \mathbf{r} \psi_i dv$. واپاشیهای ممنوع اول از همین جملات حاصل می‌شوند. چنانکه دیدیم، مقدار متوسط $\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}/\hbar$ با انتگرال‌گیری روی تمام حجم‌هسته به‌دست می‌آید که از مرتبهٔ ۰.۱ است. چون احتمال گذار بامجذور مقدار انتگرال متناسب است، احتمال واپاشیهای ممنوع اول فقط در حـدود 10^{-4} برابر واپاشیهای مجاز خواهد بود.

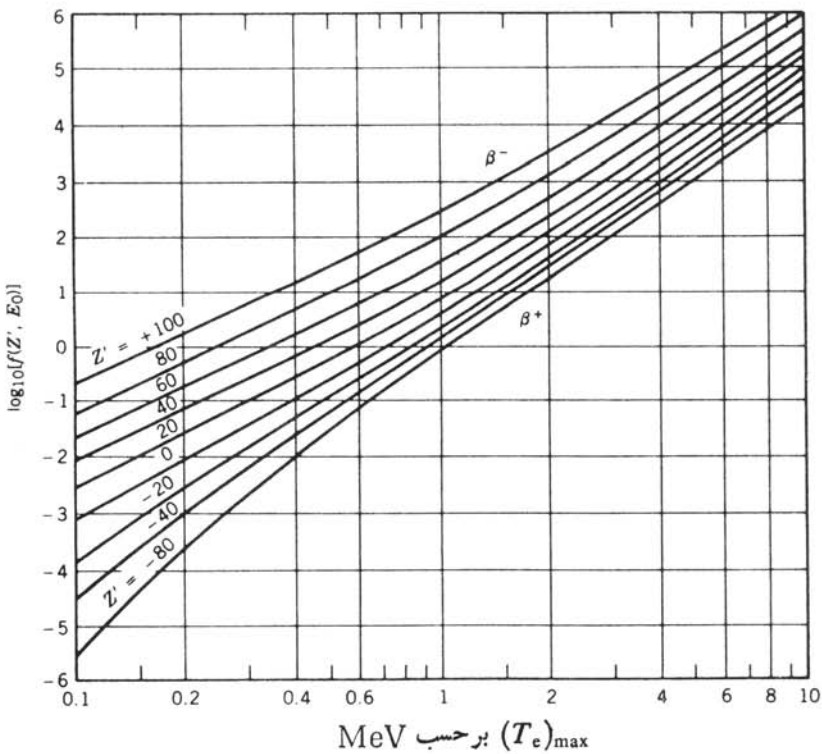
همچنین این انتگرال بجز درحالتی‌که حالتهای اولیه و نهایی پاریتهٔ مخالف داشته باشند برابر صفر می‌شود، که می‌توان آن‌را بـا نوشتن $\mathbf{r}$ به‌صورت $Y_1(\theta, \phi)$ نشان‌داد. این مطلب، چنانکه دربخش قبل دیدیم، بار دیگـر قاعدهٔ گزینش «آری $\Delta\pi = $» را برای واپاشیهای ممنوع اول به‌دست می‌دهد.

هرجملهٔ بعدی دربسط شکل‌نمایی موج تخت، مرتبهٔ بالاتری ازممنوعیت رابه‌دست

می‌دهد واحتمال گذار متناظر به هـریك از آنها با ضریب $(\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}/\hbar)^{۲}$ یا حدود $۱۰^{-۴}$ از احتمال مربوط به‌جملهٔ قبلی کوچکتر است.

برای مقایسهٔ نیمه‌عمر گذارهای مختلف بتا، ابتدا باید برای تغییرات احتمال واپاشی بتازا که دراثر تفاوت عدد اتمی Z' هستهٔ دختر یا تفاوت انرژی نقطهٔ پایان $E_{\circ}$ حـاصل می‌شود، تصحیحی را در نظـر بگیریـم. این عمل بـا استفاده از تـابع انتگرال فرمی $f(Z', E_{\circ})$ که دربخش ۳.۹ تعریف شد، انجام می‌گیرد. اگر نیمه‌عمر جزئی را برای فرایند واپاشی خاصی بدانیم، می‌توانیم $f(Z', E_{\circ})$ را ازمنحنیهایی نظیر منحنیهای شکل ۸.۹ تعیین کنیم. حاصلضرب $ft_{۱/۲}$ را نیمه‌عمر تطبیقی یا مقدار ft می‌گویند، که معمولا به‌صورت $\log_{۱۰}ft$ داده می‌شود ودرآن $t_{۱/۲}$ همواره برحسب ثانیه است.

به‌عنوان مثال، واپاشی بتازای منفی ^{۲۰۳}Hg را درنظر می‌گیریم. نیمه‌عمر آن برابر ۴۶٫۸ روز است، بنابراین داریم $\log_{۱۰}t_{۱/۲}=۶٫۶$. مقدار Q برای واپاشی آن وتبدیل به ^{۲۰۳}Tl برابر ۰٫۴۹۱ MeV است. اما چون ۱۰۰ درصد واپاشیها به تراز برانگیختهٔ



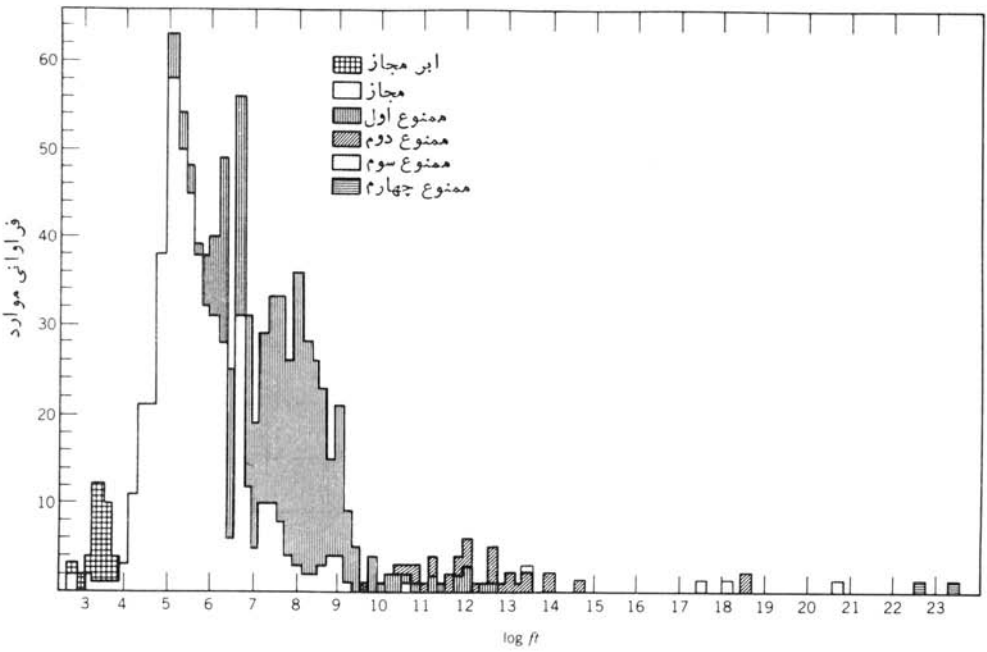
شکل ۸.۹ انتگرال فرمی که با معادلهٔ (۲۹.۹) تعریف شده است. عدد اتمی Z' مربوط به هستهٔ دختر است؛ منحنیهای با Z' مثبت برای واپاشی بتازای منفی و Z' منفی برای واپاشی بتازای مثبت درنظر گرفته شده‌اند.

۲۷۹ keV در ^{۲۰۳}Tl منجر می‌شود، انرژی نقطهٔ پایان برابر ۰٫۲۱۲ MeV − ۰٫۲۷۹ = ۰٫۴۹۱ خواهد شد. با توجه به‌شکل ۸.۹ می‌دانیم $\log_{۱۰} f = -۰٫۱$ ودر نتیجه داریم

$$\log_{۱۰} ft = \log_{۱۰} f + \log_{۱۰} t_{۱/۲} = -۰٫۱ + ۶٫۶ = ۶٫۵$$

به‌عنوان دومین مثال، واپاشی بتازای مثبت ^{۲۲}Na به‌حالت‌پایهٔ $^{۲۲}Ne(Z' = ۱۰)$ را درنظر می‌گیریم. نیمه‌عمر برابر ۲٫۶۰ سال است، ولی نسبت انشعاب به حالت پایه فقط ۰٫۰۶ درصد است. بنابراین نیمه‌عمرجزئی برابر $۲٫۶۰y/۶ \times ۱۰^{-۴}$، و در نتیجه $\log_{۱۰} t_{۱/۲} = ۱۱٫۱$ است. مقدار Q واپاشی β^+ برابر ۱٫۸ MeV است، بنابراین، با توجه به شکل ۸.۹ مقدار $\log_{۱۰} f = ۱٫۶$ و $\log_{۱۰} ft = ۱۱٫۱ + ۱٫۶ = ۱۲٫۷$ خواهدشد.

درمجموعه‌های گردآوری شده برای اطلاعات واپاشی هسته‌ای، مقادیر $\log ft$ مستقیماً داده می‌شوند. ما می‌توانیم نوع واپاشی (مجاز یا ممنوع nام) را برمبنای قواعد گزینش تکانهٔ زاویه‌ای وپاریته تعیین کنیم، وسپس مقادیر تجربی $\log ft$ را بامرتبهٔ‌ممنوعیت مرتبط سازیم. شکل ۹.۹ مقادیر تجربی $\log ft$ را برحسب مرتبهٔ ممنوعیت برای انواع



شکل ۹.۹ توزیع تجربی مقادیر لگاریتم نیمه‌عمرهای تطبیقی ($\log ft$).

مختلف واپاشی نشان می‌دهد. میزان تأثیر مراتب مختلف دراین شکل بخوبی قابل‌مشاهده است، به‌طوری‌که هر درجهٔ ممنوعیت اضافی مقدار $\log ft$ را در حدود ۳٫۵ افزایش می‌دهد که این امر نمایانگر کاهش احتمال گذار به‌مقدار ۳×۱۰^{-۴} است. (در هر نوع واپاشی‌نیز پراکندگی قابل‌ملاحظه‌ای وجود دارد، که قسمت‌عمدهٔ آن شاید مربوط به‌اثرات تابع موجهای هسته‌های ابتدایی ونهایی باشد.)

مقدار $\log ft$ برای بیشتر واپاشیهای مجاز درگسترهٔ ۳٫۵ تا ۷٫۵، و برای اغلب واپاشیهای ممنوع اول درگسترهٔ ۶٫۰ تا ۹٫۰ قرار می‌گیرد. تعداد واپاشیهای ممنوع‌دوم که شناخته شده‌اند نسبتاً کمتر است ومقدار $\log ft$ برای‌آنها درحدود ۱۰ تا ۱۳ است، و مقدار مربوط به‌واپاشیهای ممنوع سوم نیز (کـه منحصر به‌چهار مورد است) درگسترهٔ ۱۴ تا ۲۰ قرار دارد. دومورد واپاشی ممنوع چهارم هم شناخته شده‌اندکه مقدار $\log ft$ درآنها درحدود ۲۳ است.

ارزش مجموعه‌های اطلاعاتی از این‌نوع، به قابلیت پیش‌بینی آنها خلاصه‌می‌شود. برای مثال، اگر نمودار یك واپاشی ناشناخته را مطالعه کنیم ومقدار $\log ft = ۵٫۰$ را به‌دست آوریم، معلوم می‌شودکه واپاشی به احتمال زیاد از نوع مجاز است، و از این‌رو می‌توان پاریتهٔ یکسانی را به‌حالتهای ابتدایی ونهایی هسته نسبت‌داد و نتیجه‌گیری کردکه تفاوت اسپین آنها حداکثر برابر یـك واحد است. ارزش این نتیجه‌گیریها در بـررسی طیف‌نمایی بتا دربخش ۱۰.۹ نشان‌داده شده است.

۶.۹ فیزیك نوترینو

یکی‌ازفرایندهایی‌که با واپاشی‌بتازا رابطهٔ نزدیك‌دارد، گیراندازی‌نوترینو (یاپادنوترینو) است:

$$\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^{+}$$

$$\nu + n \rightarrow p + e^{-}$$

این فرایند را گاهی واپاشی بتازای معکوس می‌نامند.

ابتدا علت وقوع این فرایندها وعدم وقوع فرایندهایی مانند گیراندازی نـوترینو توسط پروتون یا گیراندازی پادنوترینو توسط نوترون را مـورد بحث قـرار می‌دهیم. الکترونها و نوترینوها متعلق به‌گروهی از ذرات به‌نام لپتونها هستند، وپادذره‌های e^{+} و $\bar{\nu}$ به‌گروه دیگری به نام پادلپتونها تعلق دارند. برمبنای مشاهدهٔ بسیاری از فرایندها و عدم مشاهدهٔ برخی دیگر، قانونی به‌عنوان قانون پایستگی لپتونها استنتاج‌شده است. بنابراین قانون، تعدادکل لپتونها منهای پادلپتونها در دوطرف فرایندواپاشی یا واکنش بایدیکسان باشد. برای مشاهدهٔ موارد نقض این قانون تعداد زیادی آزمایش حساس انجام شده‌است، ولی تاکنون هیچگونه نقضی مشاهده نشده‌است. در واکنش $\nu + p \rightarrow n + e^{+}$ که درآن

اصل پایستگی بار الکتریکی و تعداد نوکلئون رعایت‌شده است، عددلپتونی پایستگی‌ندارد ودرنتیجه ،طبق درك کنونی‌ما از فرایندهای بنیادی، مطلقاً ممنوع است.

عـدم مشاهدهٔ چنین واکنشهایـی در حقیقت یکی از بهترین دلایلـی است که ما را بـه اختلاف واقعـی بین ذرات ν و $\bar{\nu}$ رهنمون می‌شود. الکتـرون و پـوزیترون از نظر بار الکتریکی (و خصوصیاتی مانند گشتاور مغناطیسی که به‌بار الکتریکی بستگی دارد) با یکدیگر تفاوت دارند. امـا ν و $\bar{\nu}$ ذراتی هستند کـه بار الکتریکی ندارند (و به عنوان ذرات نقطه‌ای بی‌بار، گشتاور مغناطیسی آنهـا نیز برابر صفر است). بنابراین ذرات در برابر واکنشهای الکترومغناطیسی، کـه غالباً برای تمیزدادن بین ذرات و پادذرات به‌کار می‌روند، مصونیت دارند.

همان‌طور که دربخش۱.۹ دیدیم، وجود نوترینو به‌دلیل صادق‌نبودن قوانین‌جاافتادهٔ پایستگی انرژی وتکانه در واپاشی بتازا مطرح شد. مشاهـدهٔ مستقیم نوترینو تا ۲۵ سال پس‌ازپیشنهاد اولیهٔ پاؤلی تحقق‌پذیر نبود. برای درك مشکل گیراندازی نوترینوی گریزپا، احتمال واکنش‌گیراندازی نوترینو را براورد می‌کنیم. مشابه معادلهٔ (۲۷.۴)، سطح‌مقطع واکنش $\bar{\nu}+\mathrm{p}\rightarrow\mathrm{n}+\mathrm{e}^{+}$ را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$\sigma=\frac{\text{احتمال وقوع واکنش برای هر اتم هدف}}{\text{شار فرودی } \bar{\nu}} \qquad (۳۵.۹)$$

احتمال واکنش‌را می‌توان بااستفاده ازقاعدهٔ طلایی فرمی، همانند معادلهٔ (۱۲.۹)، محاسبه کرد. برای جزء ماتریس V_{fi}، مشابه محاسبه‌ای کـه برمبنای تقریب مجاز انجام دادیـم و به‌معادلهٔ (۲۰.۹) رسیدیـم، عبارت $(1/V)gM_{fi}$ را در نظر می‌گیریم. با چشمپوشی از پس‌زنی نوترون، چگالی‌حالات نهایی‌فقط مربوط به‌الکترون می‌شودکه با معادلهٔ (۱۵.۹) داده شده است. بـالاخره، با استفاده از شکل مـوج تخت بـا معادلهٔ (۱۸.۹) و با توجه به‌اینکه کمیت $\hbar k/m$ همان سرعت ذرهٔ فرودی است‌که برای نوترینوها برابر c می‌شود، می‌تـوانیم شکل معادلهٔ (۲۶.۴) را بـرای شار فرودی $\bar{\nu}$ به‌کار ببریـم و سطح مقطع را به صورت زیر به‌دست‌آوریم

$$\sigma=\frac{\frac{2\pi}{\hbar}\cdot\frac{g^{2}}{V^{2}}|M_{fi}|^{2}\frac{4\pi p^{2}dpV}{h^{3}dE}}{c/V} \qquad (۳۶.۹)$$

با استفاده از $dp/dE=E/c^{2}p$ داریم

$$\sigma=\frac{2\pi}{\hbar c}g^{2}|M_{fi}|^{2}\frac{4\pi pE}{c^{2}h^{3}} \qquad (۳۷.۹)$$

برای براورد عددی، از جزء ماتریسی‌که برای واپـاشی بتازای نـوترون در بخش ۴.۹ به‌دست‌آوردیم،یعنی $g^{2}|M_{fi}|^{2}=g_{\mathrm{F}}^{2}(1+y^{-2})\simeq 5.6\,g_{\mathrm{F}}^{2}$؛ وبرای g_{F} ازمقدارحاصل

از واپاشیهای بتازای ابرمجاز استفاده می‌کنیم. انرژی نوترینوی فرودی را برابر ۲٫۵MeV انتخاب کردیم که تااندازه‌ای بیش از کمینهٔ انرژی ۱٫۸ MeV لازم برای شروع واکنش است (چون $m_pc^2 > m_nc^2$ است، باید انرژی اضافی لازم را از طریق پاد نوترینوی فرودی تأمین کنیم)، و درنتیجه انرژی الکترون برابر ۱٫۲۱ MeV خواهد بود. پس از قراردادن همهٔ مقادیر عددی، سطح مقطع حاصل برابر $1.2 \times 10^{-43}\,cm^2 = 1.2 \times 10^{-19}\,b$ می‌شود. با براورد احتمال گیراندازی نوترینو درعبور از جسم جامدی که حاوی 10^{24} پروتون درهر cm^3 است، می‌توان به کوچکی غیرقابل تصور این سطح مقطع (در مقایسه با سطح مقطع ۲۰ بارنی پراکندگی نوکلئون - نوکلئون در انرژیهای کم) پی برد. سطح مقطع واکنش نوترینو با هر پروتون درحدود $10^{-43}\,cm^2$ است. با توجه به اینکه نوترینو در عبور از $1\,cm^3$ ماده با حدود 10^{24} پروتون روبه‌رو می‌شود، احتمال واکنش در حجم $1\,cm^3$ از جسم جامد برابر $(10^{-43}\,cm^2)(10^{24}\,cm^{-3}) = 10^{-19}\,cm^{-1}$ است، یعنی احتمال واکنش نوترینو درعبور از هرسانتی‌متر ماده درحدود 10^{-19} است. نوترینو برای آنکه احتمال گیراندازی معقولی داشته باشد باید از $10^{19}\,cm$ ماده، که قطری در حدود ۱۰ سال نوری خواهد داشت، عبور کند. بنابراین تعجب‌آور نیست که جستجو برای یافتن آن ۲۵ سال به‌درازا کشیده باشد!

آشکارسازی تجربی در واقع از طریق یك رشته آزمایشهای زیرکانه و پر دردسر انجام شد که درسالهای دههٔ ۱۹۵۰ توسط راینز وکووان به‌عمل آمد. آنها ازیك رآکتور هسته‌ای به‌عنوان چشمهٔ $\bar{\nu}$ استفاده کردند. زیرا محصولات شکافت که سرشار از نوترون‌اند، دراثر واپاشی بتای منفی، ذرات $\bar{\nu}$ گسیل می‌دارند. آهنگ گسیل متوسط درحدود $6\,\bar{\nu}$ در هرشکافت است، وشار خالص $\bar{\nu}$ دراین آزمایشها به‌حدود 10^{13} پادنوترینو درهرسانتی‌متر مربع در ثانیه می‌رسید. راینز وکووان از یك سوسوزن مایعی، که سرشار از پروتونهای آزاد بود وترکیبی از Cd هم درآن وارد شده بود، به‌عنوان آشکارساز استفاده کردند. گیراندازی $\bar{\nu}$ توسط پروتون به‌تولید یك نوترون ویك پوزیترون منجرمی‌شود؛ پوزیترون درمادهٔ سوسوزن به‌سرعت نابود می‌شود ($e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$) و درخشی نورانی به‌وجود می‌آورد. نوترون تولید شده در محلول به حرکت درمی‌آید و به تدریج کند می‌شود تا اینکه سرانجام جذب هستهٔ Cd، که سطح مقطع گیراندازی بزرگی برای نوترون‌دارد، می‌شود. پس از گیراندازی نوترون، هستهٔ ^{114}Cd در یك حالت بسیار برانگیخته قرار دارد که به‌سرعت یك پرتو گامای باانرژی ۹٫۱MeV از خود گسیل خواهد کرد. بنابراین، علامت مشخصهٔ $\bar{\nu}$ وجود یك علامت نورانی حاصل از نابودی پوزیترون (فوتونهای ۰٫۵۱۱ MeV)، و متعاقب آن گسیل یك پرتو گامای ۹٫۱ MeV پس از گذشت $10\,\mu s$ (زمان لازم برای کند شدن و گیرافتادن نوترون) است. بااستفاده از مخزنی که حاوی $10^6\,cm^3$ از مایع سوسوزن بود، راینز وکووان در هرساعت باچند واقعه که می‌توانستند حاکی از گیراندازی $\bar{\nu}$ باشند، روبه‌رو می‌شدند. برای قطعی ساختن ارتباط این وقایع با گیراندازی $\bar{\nu}$، آزمایشهای اضافی بسیاری ضرورت پیدا کردند که به‌دنبال آنها این نتیجهٔ اجتناب‌ناپذیر حاصل شد که: $\bar{\nu}$ یك ذرهٔ واقعی است ونه‌مخلوقی ذهنی که فقط ازخیال پردازیهای

بارور پاؤلی و فرمی ناشی شده باشد.

برای نمایش امکان‌ناپذیر بودن گیراندازی $\bar{\nu}$ توسط نوترونها، دیویس و همکارانش آزمایشی انجام‌دادند. آنها برای‌مشاهدهٔ واکنش $\bar{\nu}+{}^{37}\mathrm{Cl}\rightarrow e^{-}+{}^{37}\mathrm{Ar}$ از یك‌مخزن بزرگ CCl_4 و یك رآکتور به‌منظور تولیدپادنوترینو استفاده کردند. دیویس باخالی کردن دوره‌ای مخزن وجستجوی هسته‌های رادیواکتیو ${}^{37}\mathrm{Ar}$ درگاز تخلیه شده، نتیجه‌گرفت که واکنش انجام نمی‌شود. نتیجهٔ منفی این آزمایش نشان‌داد که ذرات ν و $\bar{\nu}$ ذراتی واقعاً متفاوت‌اند.

بنابراین‌متفاوت بودن ν و$\bar{\nu}$ قطعی‌است، ولی‌تاکنون مشخص‌نکرده‌ایم که چه‌خاصیت بنیادیی باعث تمایز این‌دو ذره می‌شود. از نظر تجربی، یك‌خصوصیت وجود دارد: بردار اسپین کلیهٔ پادنوترینوها با بردار تکانهٔ آنها موازی است، درحالی‌که برای نوترینوهااین بردار درخلاف‌جهت تکانه است. این خصوصیت که هلیسیته نامیده می‌شود، به‌صورت‌زیر تعریف شده است

$$\hbar=\frac{\mathbf{s}\cdot\mathbf{p}}{|\mathbf{s}\cdot\mathbf{p}|} \qquad (۳۸.۹)$$

که مقدارآن برای $\bar{\nu}$ برابر ۱+ و بـرای ν برابر ۱− است. (غالباً گفته می‌شود که $\bar{\nu}$ «راست‌دست» و ν «چپ‌دست» است، زیرا حرکت تقدیمی $\mathbf{s}$ حول $\mathbf{p}$ برای‌پادنوترینوها ردهایی‌مشابه شیارهای یك‌پیچ راست‌گرد وبرای نوترینوها ردهایی‌مشابه یك‌پیچ‌چپ‌گرد ایجاد می‌کند.) برای الکترونهای حاصل از واپاشی بتازا نیز خصوصیتی مشابه وجـود دارد، که بنابرآن هلیسیتهٔ الکترونهای منفی برابر $h=-v/c$ وهلیسیتهٔ الکترونهای‌مثبت برابر $h=+v/c$ می‌شود. اما این یك خصوصیت ذاتی برای‌کلیهٔ الکترونهـای مثبت و منفی نیست، بلکه فقط مربوط به‌الکترونهایی است کـه در واپـاشی بتازا گسیل می‌شوند. الکترونهای اتمی و همین‌طور پـوزیترونهای ناشی از تـولید زوج $(\gamma\rightarrow e^{+}+e^{-})$ هیچیك هلیسیتهٔ خاصی ندارند. اما نوترینوها و پادنوترینوها همگی دارای هلیسیتهٔ معین هستند، وهمیشه باپادنوترینوهای «راست‌دست» ونوترینوهای«چپ‌دست» روبه‌رومی‌شویم.

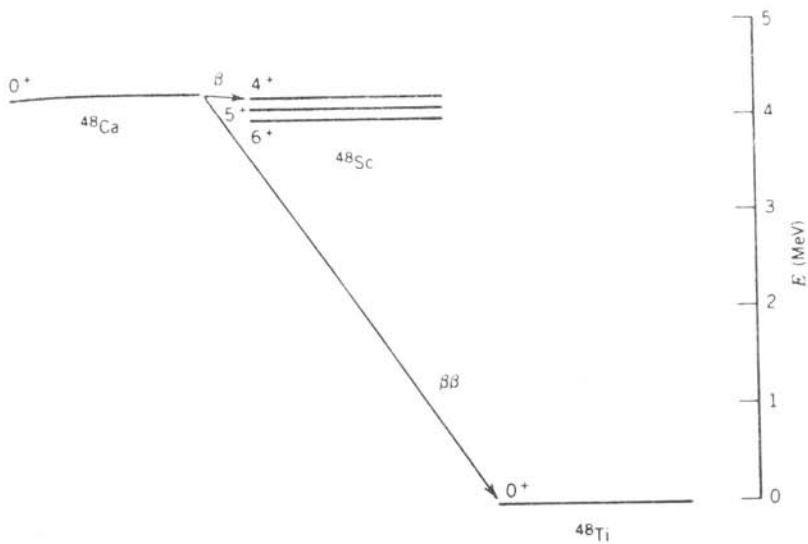
دیویس برای مشاهدهٔ نوترینوهای‌گسیل شده از خورشید دراثر فرایند همجوشی‌از روش مشابهی استفاده‌کرد. (همجوشی هسته‌های سبك، محصولاتی تولید می‌کندکه کمبود نوترون دارند و در اثر واپاشی بتازای مثبت، به جای $\bar{\nu}$، ν گسیل می‌کنند.) برای ایجاد حفاظ دربرابر پرتوهای‌کیهانی و احتراز از فرایندهای ناشی ازآن (که در آزمایشهای اولیه‌اش مسئله‌آفرین بودند)، دیویس مخزن CCl_4 را درته معدنی به‌عمق ۱۵۰۰ m قرار داد وبرای مدتی بیش از ۱۰ سال به شمارش این نوترینوهای خورشیدی پرداخت. این نوترینوها از این‌نظر حائزاهمیت‌اندکه مستقیماً ازقلب خورشیدکه درآن واکنش هسته‌ای رخ می‌دهد، به‌سوی ما می‌آیند. از طرف دیگر، نوری‌که از خـورشید به ما می‌رسد از سطح خورشیدسرچشمه می‌گیرد وحاوی اطلاعات نسبتاً کمی درمورد فرایندهـایی است

که درقلب خورشید رخ‌می‌دهند. آهنگ انتظاری تبدیل ^{37}Cl به ^{37}Ar توسط نوترینوهای خورشیدی در مخزن دیـویس درحدود یك اتم در هر روز است؛ اما به‌رغم سالهـا تلاش قهرمانانه، آهنگ مشاهده‌شده فقط درحدود یك‌سوم‌مقدار انتظاری‌است که این امرمی‌تواند نمایانگر دو نوع‌خطا باشد: (الف) خطا در فرضهای اولیهٔ‌مربوط به‌آهنگ گسیل نوترینو از خورشید (ودرنتیجه نارسایی نظریهٔ موجود در مورد فرایندهای خورشیدی)، یا (ب) وجود خطا درنظریه‌های فعلی دربارهٔ خواص نوترینو.

۷.۹ واپاشی دوبتایی

واپاشی ^{48}Ca را درنظر بگیرید (شکل ۱۰.۹). مقدار Q واپاشی بتازای منفی در تبدیل به ^{48}Sc برابر ۰٫۲۸۱ MeV است، ولی‌فقط حالتهای $^{+}4$، $^{+}5$ و $^{+}6$ در ^{48}Sc برای واپاشی قابل‌حصول هستندکه واپاشیهای ممنوع چهارم یا ششم را ایجاب می‌کنند. اگراز تخمین تجربـی $\log ft \sim 23$ برای واپـاشیهای ممنوع چهارم استفاده‌کنیم (بـا توجه به‌شکل ۸.۹ و $\log f \simeq -2$)، مقدار $\log t \sim 25$ یا $t_{1/2} \sim 10^{25}$s(10^{18}y) خواهدبود. بنابراین «پایدار» دانستن هستهٔ ^{48}Ca نباید تعجب‌آور باشد.

یـك طـریقـهٔ ممـکـن دیـگـر بـرای واپـاشی، واپـاشی دوبتـایی ($\beta\beta$) $^{48}Ca \rightarrow {}^{48}Ti + 2e^{-} + 2\bar{\nu}$ است. این یك فرایند مستقیم است، و محتاج حالت میانی ^{48}Sc نیست. (درحقیقت، در ادامهٔ بحث می‌بینیم که در بیشتر واپاشیهای دوبتایی ممکن،



شکل ۱۰.۹ واپاشی ^{48}Ca. واپاشی ابرمجاز $\beta\beta$ به ^{48}Ti شق دیگر واپاشی تك‌بتایی ممنوع چهارم به ^{48}Sc است.

انرژی حالت میانی بیش ازحالت اولیه است وحصول به‌آن ازنقطه‌نظر انرژی غیرممکن است.) برتری این فرایند بر فرایند تک‌بتایی (در این مورد) ماهیت $0^+ \to 0^+$ گذار است، که آن‌را به‌جای ممنوع چهارم در ردهٔ ابرمجاز قرار می‌دهد.

با بازنویسی معادلهٔ واپاشی تک‌بتایی (۳۰.۹) به‌صورت زیر می‌توانیم براوردی تقریبی از احتمال این واپاشی را به‌دست‌آوریم

$$\lambda_\beta = \left(\frac{m_e c^2}{\hbar}\right)\left\{f g^2 \frac{m_e^4 c^2 |M_{fi}|^2}{2\pi^3 \hbar^6}\right\} \qquad (۳۹.۹)$$

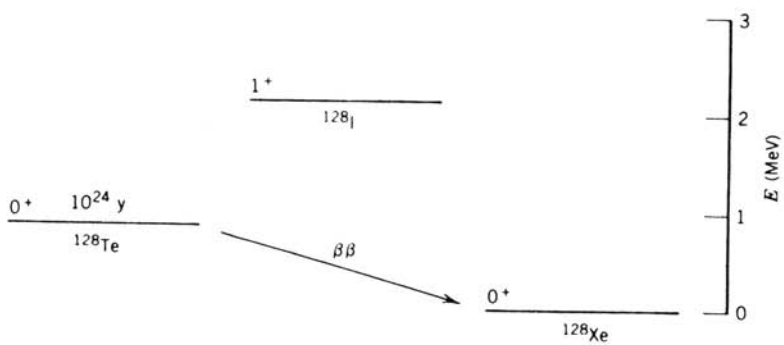
مقدار تقریبی جملهٔ اول برابر $0.8 \times 10^{21} s^{-1}$ است که می‌تواند به‌عنوان عامل مقیاس ابعادی در نظر گرفته شود. جملهٔ باقیمانده بی‌بعد است و حاوی کلیهٔ اطلاعات مربوط به‌واپاشی‌بتازا واحتمالهای گذارهسته‌ای‌است. مقدار آن برابر f 1.5×10^{-25} (بااستفاده از $|M_{fi}| = \sqrt{2}$) است.

آهنگ واپاشی دوبتایی تقریباً از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید

$$\lambda_{\beta\beta} = \left(\frac{m_e c^2}{\hbar}\right)\left\{f g^2 \frac{m_e^4 c^2 |M_{fi}|^2}{2\pi^3 \hbar^6}\right\}^2 \qquad (۴۰.۹)$$

که نیمه‌عمری ازمرتبهٔ 10^{17} سال را مشخص می‌کند وباواپاشی تک‌بتایی قابل مقایسه‌است (اگرچه نباید این محاسبهٔ ساده را چندان جدی گرفت).

واپاشی دوبتایی همچنین می‌تواند در مواردی رخ‌دهد که حصول به‌حالت میانی در مد واپاشی‌منفرد امکان‌پذیر نیست. مورد ^{128}Te را درنظر بگیرید که درشکل ۱۱.۹ نشان‌داده شده است. مقدار Q برای واپاشی $^{128}I \to {}^{128}Te$ منفی وبرابر $-1.26\ MeV$ است، و بنابراین این واپاشی امکان‌پذیر نیست. درحالی‌که واپاشی دوبتایی $^{128}Te \to {}^{128}Xe$ با $Q = 0.87\ MeV$ ازنقطه‌نظر انرژی ممکن‌است. درحقیقت، چنین‌موقعیتهایی‌محتملترین



شکل ۱۱.۹ واپاشی تک‌بتایی ^{128}Te از نقطه‌نظر انرژی ممنوع است، ولی واپاشی دوبتایی وتبدیل آن به‌^{128}Xe ممکن‌است. برای‌اطلاع‌از جرم‌نسبی‌این‌هسته‌ها به‌شکل ۱۸.۳ رجوع کنید.

موارد مشاهدهٔ واپاشیهای دوبتایی هستند، زیرا ما تمایلی نداریم که مورد واپاشی متوالی را از طریق یك حالت میانی که از نقطه‌نظر انرژی قابل حصول باشد بررسی کنیم.

برای مشاهدهٔ واپاشی دوبتایی دو روش اساسی وجود دارد. روش اول، روش طیف‌نمایی جرمی است که در آن به جستجوی دختر هسته‌های پایدار در کانیهایی که عمر زمین‌شناختی معینی دارند می‌پردازیم. برای مثال، با مشاهدهٔ فراوانی اضافی ^{۱۲۸}Xe (نسبت به‌فراوانی آن در Xe جو) در یك صخرهٔ حاوی تلوریم، می‌توانیم نیمه‌عمر واپاشی دوبتایی ^{۱۲۸}Te وتبدیل آن را به ^{۱۲۸}Xe براورد کنیم. با فرض معقول طویل بودن نیمه‌عمر واپاشی دوبتایی، در مقایسه با عمر T صخره، تعداد هسته‌های Xe ناشی از واپاشی دوبتایی برابر است با

$$N_{Xe} = N_{Te}(۱ - e^{-\lambda T}) \cong N_{Te}\frac{۰٫۶۹۳\,T}{t_{۱/۲}} \qquad (۴۱.۹)$$

و در نتیجه

$$t_{۱/۲} \cong ۰٫۶۹۳\,T\frac{N_{Te}}{N_{Xe}} \qquad (۴۲.۹)$$

تعداد هسته‌های Te و Xe را می‌توان با روش طیف‌نمایی جرمی تعیین، و در نتیجه نیمه‌عمر واپاشی دوبتایی را پیدا کرد. بعضی از مقادیر به‌دست آمده از این روش عبارت‌اند از

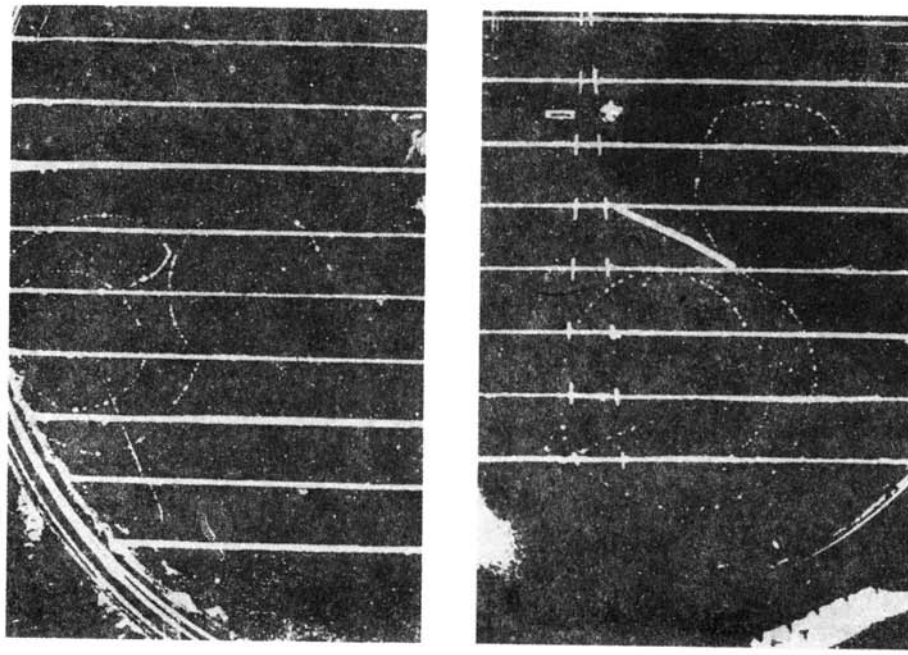
$$^{۱۲۸}Te \rightarrow {}^{۱۲۸}Xe \qquad (۳٫۵ \pm ۱٫۰) \times ۱۰^{۲۴}\,y$$

$$^{۱۳۰}Te \rightarrow {}^{۱۳۰}Xe \qquad (۲٫۲ \pm ۰٫۶) \times ۱۰^{۲۱}\,y$$

$$^{۸۲}Se \rightarrow {}^{۸۲}Kr \qquad (۱٫۷ \pm ۰٫۳) \times ۱۰^{۲۰}\,y$$

بدیهی است که نیمه‌عمرهای طولانی مانع از آشکارسازی مستقیم واپاشی دوبتایی می‌شوند. زیرا واپاشی انتظاری یك مول از نمونه، در بدترین مورد یك واپاشی در سال و در بهترین شرایط یك واپاشی در روز است. آزمایشهای مربوط به‌چنین آهنگ شمارش پایینی به‌شدت از شمارشهای زمینهٔ ناشی از رادیواکتیویتهٔ طبیعی و پرتوهای کیهانی متأثر خواهد بود، و ایجاد حفاظ در برابر این شمارشهای ناخواسته مستلزم مهارت فوق‌العادهٔ آزمایشگر و هزینهٔ بیشتر است. برای مثال، به‌آزمایشی که زیر صخره‌ای به‌ضخامت ۴۰۰۰ متر در تونل زیر مون‌بلان در مرز فرانسه و ایتالیا انجام شده است، باید اشاره کرد.

در آزمایشی که اخیراً توسط موئه و لوئنتال گزارش شده است، برای آشکارسازی واپاشی دوبتایی از رگه‌های ^{۸۲}Se در یك اتاقك ابر استفاده شده است. شکل ۱۲.۹ نمونه‌هایی از این فرایند را نشان می‌دهد که در آن دو الکترون گسیل می‌شوند. در این شکل، مسیر یك ذرهٔ α که از همان محل سرچشمه گرفته است نیز برای مقایسه نشان داده شده است. این فرایند شاید از زمینهٔ رادیواکتیو طبیعی، و به‌احتمال زیاد از واپاشی ^{۲۱۴}Bi در سری



شکل ۱۲.۹ تصویر یك فرایند در اتاقك ابر که تصور می‌رود از واپاشی دوبتایی ^{82}Se حاصل شده‌است. خطوط افقی رگه‌های مادهٔ چشمهٔ ^{82}Se هستند. واپاشی دوبتایی، زوج‌ردهای خمیده‌ای را که‌از یکی از رگه‌های میانی تصویر سمت‌چپ ناشی می‌شوند به‌وجودآورده است. فرایندهای زمینه‌ای ناشی‌از رادیواکتیویتهٔ طبیعی نیز درتصویر دیده می‌شوند. این فرایندها شامل تولید دوالکترون‌متوالی واپاشی بتازا (مانند واپاشیهای زنجیری رادیواکتیو طبیعی درشکل ۱۰.۶) و تولید یك ذرهٔ α است. به مسیر این دو الکترون و ذرهٔ α که از نقطهٔ مشترکی در نزدیکی مرکز تصویر سمت راست سرچشمه گرفته‌اند توجه‌کنید. یك میدان مغناطیسی عمود برصفحهٔ تصویر سبب خمیدگی ردها می‌شود، به‌طوری که می‌توان تکانهٔ الکترون را تعیین کرد.

اورانیم، ناشی شده‌است. آزمایش دقیقتری ازجستجوی فرایندهای دوبتایی توسط الیوت، هان، و موئه گزارش شده است.[1] آنها توانسته‌اند تقریباً ۳۰ فرایند واپاشی دوبتایی را طی مدت بیش از ۳۰۰۰ ساعت اندازه‌گیری کنند. حد پایین نیمه‌عمر دوبتایی حاصل درحدود 1.5×10^{20} y است که با نتیجهٔ ژئوشیمیایی مذکور دربالا سازگاری دارد.

اگرچه روش مستقیم بسیار مشکل ودر معرض‌خطاهای سیستماتیك بسیار است، ولی تعقیب این‌مطالعات فوق‌العاده حائزاهمیت است زیرا به‌مسئلهٔ حساس پایستگی لپتون [که دربارهٔ آن با تفصیل بیشتر درفصل۱۸ (جلددوم، ترجمهٔ‌فارسی) بحث خواهد شد] می‌تواند پاسخ دهد. اگر ν و $\bar{\nu}$ واقعاً ذراتی متمایز نباشند (یعنی، اگر با یکدیگر جفت شوند و یا

1. Elliott, Hahn, and Moe, *Phys. Rev. Lett.*, **56**, 2582 (1986).

ترکیب خطی ذرات بنیادی دیگری باشند)، واپاشی دوبتایی «بدون نوترینو» امکان‌پذیر خواهد بود:

$$^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}_{Z+2}^{A}X''_{N-2} + 2\,e^{-}$$

(اساساً، می‌توانیم فرایندرا به‌طریق زیر درنظر بگیریم: واپاشی بتازای نخست از طریق حالت میانی مجازی ${}_{Z+1}^{A}X'_{N-1}$ که از نقطه‌نظر انرژی غیرقابل‌دسترسی است، انجام می‌گیرد. سپس $\bar{\nu}$ گسیل شده به ν تبدیل می‌شود ومجدداً توسط حالت میانی مجازی جذب می‌شود $\nu + {}_{Z+1}^{A}X'_{N-1} \rightarrow e^{-} + {}_{Z-2}^{A}X''_{N-2}$. بنابراین، این‌فرایند سرانجام منجر به گسیل دوبتا می‌شود بدون آنکه نوترینویی گسیل شده باشد.)

آزمایشی که برای جستجوی واپاشی دوبتایی بدون نوترینو طرح شده بود درمورد ^{76}Ge به‌اجرا درآمد. دراین‌آزمایش از یك‌آشکارساز Ge هم به عنوان چشمهٔ هسته‌های واپاشنده و هم آشکارساز این واپاشیها استفاده شد. کل انرژی قابل استفادهٔ واپاشی ۲٫۰۴ MeV است و اگر هر دو الکترون درآشکارساز متوقف شوند، یك واقعهٔ منفرد با انرژی ۲٫۰۴ MeV ثبت می‌شود. مشکل کار در این‌آزمایش، کاهش زمینه (ناشی از رادیواکتیویتهٔ طبیعی، آلوده‌کننده‌های رادیواکتیو مصنوعی و تابشهای کیهانی) به‌سطحی به‌اندازهٔ کافی پایین است به طوری‌که ناحیهٔ ۲٫۰۴ MeV را بتوان برای یافتن قله مورد جستجو قرارداد. آزمایش مون‌بلان‌که شرح آن رفت از این‌نوع بود وحدپایین نیمه‌عمر را برابر 5×10^{21} y به‌دست‌داد. دریك‌آزمایش زیرزمینی دیگرکه اخیراً توسط آوینون وهمکاران گزارش شده است[1]، با اقداماتی فوق‌العاده سعی شدکه آشکارساز با استفاده از موادی‌که سهم قابل‌ملاحظه‌ای درشمارش زمینه ندارند (مثلا پیچهای فولادی زنگ‌نزنی که‌آلودگی ^{60}Co را درخود نشان می‌دادند باپیچهای برنجی‌جایگزین شدند، وواشرهای اندیم جایگزین واشرهای‌لاستیکی‌شد) احاطه‌شود. پس از ۹ماه شمارش، قلهٔ قابل‌مشاهده‌ای درانرژی ۲٫۰۴ MeV وجودنداشت، ودرنتیجه برای نیمه‌عمر عددی‌بزرگتر از 10^{23} y حاصل شد. این آزمایشها با این امیدکه بهبود مداوم حساسیت، مشاهدهٔ مستقیم واپاشیهای دونوترینویی و دوبتایی بدون نوترینو را امکان‌پذیر سازد، ادامه دارند.

اگرچه‌تعبیر نظری نتایج تجربی‌کار دشواری‌است، ولی ادامهٔ‌جستجو برای‌دستیابی به شواهد واپاشی دوبتایی بدون نوترینو ممکن است منبع اطلاعاتی بسیار مهمی درمورد خصوصیات بنیادی نوترینوها فراهم کند. برای مثال، فرایندگسیل و گیراندازی مجددی که دربالا شرح داده شد، برای نوترینوهای بدون جرم با هلیسیتهٔ معین (± 1) غیرممکن است، وبنابراین مشاهدهٔ واپاشی دوبتایی بدون‌نوترینو بلافاصله‌نادرست‌بودن خصوصیات «کلاسیك» نوترینو را مطرح می‌کند.

۸.۹ گسیل نوکلئون تأخیری در واپاشی بتازا

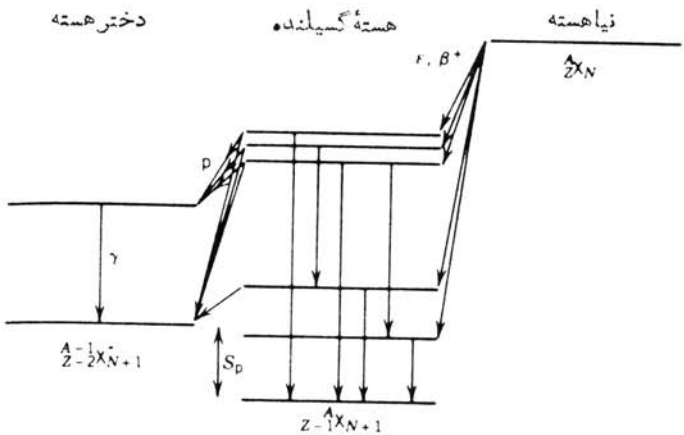
پرتوهای گاما تنها تابش‌گسیل‌شده از حالات برانگیختهٔ هسته‌ای پس از واپاشی بتازا

1. Avignone *et al.*, *Phys. Rev. C* **34**, 666(1986).

نیستند. بعضی اوقات این حالات ناپایدارند و یك یا دو نوکلئون از خود گسیل می‌کنند. گسیل نوکلئون به‌سرعت رخ می‌دهد (به‌طوری‌که با گسیل گاما رقابت می‌کند) ودرنتیجه گسیل نوکلئون را با نیمه‌عمرهای مشخصهٔ واپاشی بتازا می‌توان بررسی کرد.

برای واپاشی هسته‌هایی که فقط یك یا دو خانه از محل پایدارترین ایزوبار متناظر به‌هرعدد جرمی A فاصله دارند، انرژیهای واپاشی بسیار کوچك است (۱ تا ۲ MeV) و گسیل نوکلئون از نقطه‌نظر انرژی ممنوع است. دور از هسته‌های پایدار، انرژی واپاشی حالتهای شدیداً برانگیخته ممکن است به‌حدی برسد که هسته با گسیل نوکلئون واپاشیده شود. نمودارساده‌ای ازاین‌فرایند برای گسیل پروتون درشکل ۱۳.۹ نشان‌داده شده است. مادرهستهٔ اولیهٔ گسیل‌کنندهٔ β را نیاهسته می‌نامند؛ خود نوکلئونها از هستهٔ گسیلنده صادر می‌شوند واین فرایند سرانجام به‌حالاتی از هستهٔ دختر منتهی می‌شود.

درسالهای اخیر، علاقه به‌بررسی گسیل نوکلئون‌تأخیری، مطالعات تجربی هسته‌های دور ازحالت پایداررا افزایش‌داده‌است. اهمیت نوترونهای‌تأخیری درکنترل‌رآکتورهای هسته‌ای [فصل ۱۳ (جلددوم، ترجمهٔ‌فارسی)] سبب علاقهٔ بیشتر دراین مورد شده است. اما تاریخ‌کشف این پدیده به زمان پیدایش فیزیك هسته‌ای برمی‌گردد ـ رادرفورد درسال ۱۹۱۶ مشاهدهٔ «ذرات آلفای‌بلندبرد» را پس‌از واپاشی بتازای ^{212}Bi گزارش داد. شاخهٔ اصلی این واپاشی بتازا به‌حالت‌پایهٔ ^{212}Po منجر می‌شود، که این هسته به‌سهم خود ذرات آلفای باانرژی ۸٫۷۸۴ MeV گسیل‌می‌کند. (ازآنجاکه حالت واپاشندهٔ آلفازا یك‌حالت پایه 0^+ ازیك‌هستهٔ زوج‌ـزوج‌است، واپاشی‌عملا به‌طور ۱۰۰٪ به‌حالت‌پایهٔ ^{208}Pb منجر می‌شود.) اماتعدادکمی‌از ذرات آلفا باانرژیهای بیشترهم‌مشاهده شده‌اند (۰٫۰۰۳۵ درصد



شکل ۱۳.۹ نمودار سادهٔ گسیل نوکلئون تأخیری در واپاشی بتازا. واپاشی نیاهسته به تراکم حالتهای‌بسیار برانگیختهٔ گسیلنده که درمقابل‌گسیل نوکلئون ناپایدارند منجر می‌شود. توجه کنیدکه انرژی حالت برانگیختهٔ‌گسیلنده برابرحاصل‌جمع انرژی‌نوکلئون‌گسیل‌شده و انرژی جدایی نوکلئون بین X' و X'' (بعلاوهٔ تصحیح مختصر مربوط به پس‌زنی هستهٔ‌گسیلنده) است.

بـا انرژی MeV ۹٫۴۹۵، ۰٫۰۰۲۰ درصد با MeV ۱۰٫۴۲۲، و ۰٫۰۱۷ درصد با MeV ۱۰٫۵۴۳). انرژیهای کمتر نمایندهٔ واپـاشیهای منجر به‌حالات برانگیختهٔ ^{208}Pb هستند، ولی انرژیهای بیشتر باید ناشی از واپاشیهای حالات بـرانگیختهٔ ^{212}Po باشند. در واپاشی ^{214}Bi هم‌رفتار مشابهی مشاهده می‌شود.

محاسبهٔ طیف انرژی نوکلئونهای گسیل شده فرایندی پیچیده‌است که به‌اطلاعاتی در مورد طیف حالات برانگیختهٔ گسیلنده، احتمال واپاشی بتازای نیاهسته به‌هریك ازحالات هستهٔ گسیلنده، و احتمال واپاشی نوکلئون‌زای گسیلنده به‌حـالتهای قابل حصول دخترهسته احتیاج دارد. این مشکل درهسته‌های‌سنگین دراثرچگالی زیاد حالات برانگیخته‌پیچیده‌تر است ــ فاصلهٔ متوسط بین حالتهای برانگیخته در انرژی زیـاد ممکن است درحدود eV باشدکه بسیارکوچکتر از توان تفکیك گروههای نوترونی وپروتونی است؛ بنابراین آنچه دراین موارد مشاهده می‌کنیم توزیعی پهن است‌که ساختاری مشابه توزیع پیوستهٔ واپاشی بتازا دارد ولی از پدیدهٔ بسیار متفاوتی ناشی شده است. به علت این مشکلات، دربـارهٔ نظریهٔ گسیل نوکلئون تأخیری بحثی نخواهیم داشت؛ بلکه به‌چند نمونه ازمطالعات تجربی وذکر مفهوم آنها خواهیم پرداخت.

بررسی انرژی گسیل نوکلئون تأخیری در واپاشی بتازا نسبتاً ساده است. رجـوع به‌شکل ۱۳.۹ نشان می‌دهدکه هرگاه انرژی واپاشی بتازا بیش از انرژی جدایی نوکلئون باشد،فرایندگسیل نوکلئون بلافاصله‌رخ‌می‌دهد: $Q_\beta > S_N$ (که درآن $N=p$ یا $N=n$). هرگاه این فرایند از نقطه‌نظر انرژی ممکن باشد، فرایندهای دیگر نیز همیشه درکنار آن وجود خواهند داشت؛ که ازهمین‌جمله است واپاشی گامازای حالت گسیلنده یا واپاشیهای بتازا به‌ترازهای پایینتر گسیلنده به‌گونه‌ای‌که نتواند با گسیل نوکلئون واپاشیده شود.

اطلاعاتی‌که از گسیل نوکلئون تأخیری در واپاشی بتازا به‌دست می‌آوریم عمدتاً بـردونوع‌اند: (۱) چون ایـن واپاشی فـرایندی دو جسمی است (نوکلئون‌گسیل‌شده و دخترهسته)، نوکلئونها باانرژی‌معینی که مستقیماً اختلاف انرژی حالات اولیه ونهایی را به دست می‌دهد خارج می‌شوند. ترازهای انـرژی دخترهسته معمولا شناخته شده‌انـد، و بنابراین‌انرژی نوکلئون‌گسیل‌شده عملا انرژی‌حالات برانگیختهٔ‌گسیلنده را مشخص‌می‌کند. (۲) باتوجه به‌احتمال‌نسبی‌گسیل نوکلئون ازحالات مختلف‌گسیلنده، می‌توان تراکم نسبی این حالات را در واپاشی بتازای نیاهسته استنتاج‌کرد. از این‌طریق اطلاعـاتی در مورد اجزای ماتریس واپاشی بتازا به‌دست می‌آید. چون ترازهای فوق‌العاده برانگیختهٔ‌گسیلنده به‌اندازه‌ای به‌یکدیگر نزدیك‌اندکه تقریباً به‌صورت پیوستار جلوه می‌کنند، بهتر است یك تابع شدت واپاشی بتازا $S_\beta(E_x)$ درنظر بگیریم‌که شدت متوسط واپـاشی بتازای منجر به‌حالات مجاور E_x را به‌دست دهد. معمولا بعضی‌از قواعدگزینش مانع‌از واپاشی بتازا و ورود هسته به‌این‌حالات‌بسیار برانگیخته‌می‌شوند. به‌این‌ترتیب،تابع‌شدت‌نسبتاً بی‌مشخصه است و تقریباً باچگالی حالتها $\rho(E_x)$ متناسب می‌شود. اما همواره یك‌حالت خاص وجود داردکه به‌سبب‌شباهت فوق‌العاده به‌نیاهسته اکثر واپاشیهای بتازا را به‌طرف خود می‌کشد

(جزء ماتریس نوع فرمی این‌حالت مخصوصاً بزرگ است). این‌حالت را حالت مانستهٔ ایزوباری (یا به‌سادگی حالت‌مانسته) می‌نامند، زیرا ساختار آن‌مانند حالت واپاشندهٔ اصلی در ایزوبار همسایه است. شدت واپاشی بتازای منجر به‌حالت مانسته (و انرژی آن) را غالباً فقط با استفاده از روش گسیل نوکلئون تأخیری در واپاشی بتازا می‌توان تعیین کرد.

به‌عنوان مثالی از یك آزمایش، گسیل نوترون تأخیری را از ^{17}N درنظر می‌گیریم که با گسیل بتای‌منفی به ^{17}O واپاشیده می‌شود. شکل ۱۴.۹ سه‌گروه نوترون قابل‌شناسایی را با انرژیهای ۳۸۳، ۱۱۷۱، و ۱۷۰۰ keV نشان‌می‌دهد. فرض می‌کنیم که این‌سه‌حالت برانگیختهٔ ^{17}O از واپاشی بتازا حاصل شده‌اند، وهریك با گسیل یك نوترون به‌حالت‌پایهٔ ^{16}O تبدیل‌می‌شود. (این مطلب درحالت‌کلی حقیقت ندارد، ولی اولین حالت برانگیختهٔ ^{16}O دارای بیش از ۶ MeV انرژی است؛ خواهیم دیدکه واپاشی بتازای ^{17}N انرژی کافی برای رسیدن به‌چنین‌حالت بسیار برانگیخته‌ای را ندارد.)

برای تحلیل انتقال انرژی در واپاشی، به انرژی جدایی نوترون در ^{17}O احتیاج داریم. با استفاده از معادلهٔ (۲۶.۳) می‌نویسیم

$$S_n=[m(^{16}O)-m(^{17}O)+m_n]c^2$$

$$=(15.99491464\ u-16.9991306\ u+1.008664967\ u)$$

$$\times 931.502\,MeV/u=4.144\ MeV$$

این‌مقدار انرژی‌لازم برای جداساختن‌یك نوترون ازهستهٔ ^{17}O است. حالت‌ابتدایی سیستم را هستهٔ ^{17}O درحالت برانگیخته با انرژی E_x در نظر می‌گیریم. بنابراین انرژی اولیه برابر $m(^{17}O)c^2+E_x$ است. انرژی نهایی برابر $m(^{16}O)c^2+E'_x+m_nc^2+T_n+T_R$ است، که درآن T_n انرژی جنبشی نوترون و T_R انرژی پس‌زنی ^{16}O است‌که برای برقراری پایستگی تکانه الزامی است. انرژی برانگیختگی احتمالی هستهٔ ^{16}O را به‌صورت E'_x درنظر گرفته‌ایم؛ بعداً نشان‌خواهیم‌داد که مقدار آن دراین مورد باید صفر باشد. بنابر پایستگی انرژی داریم

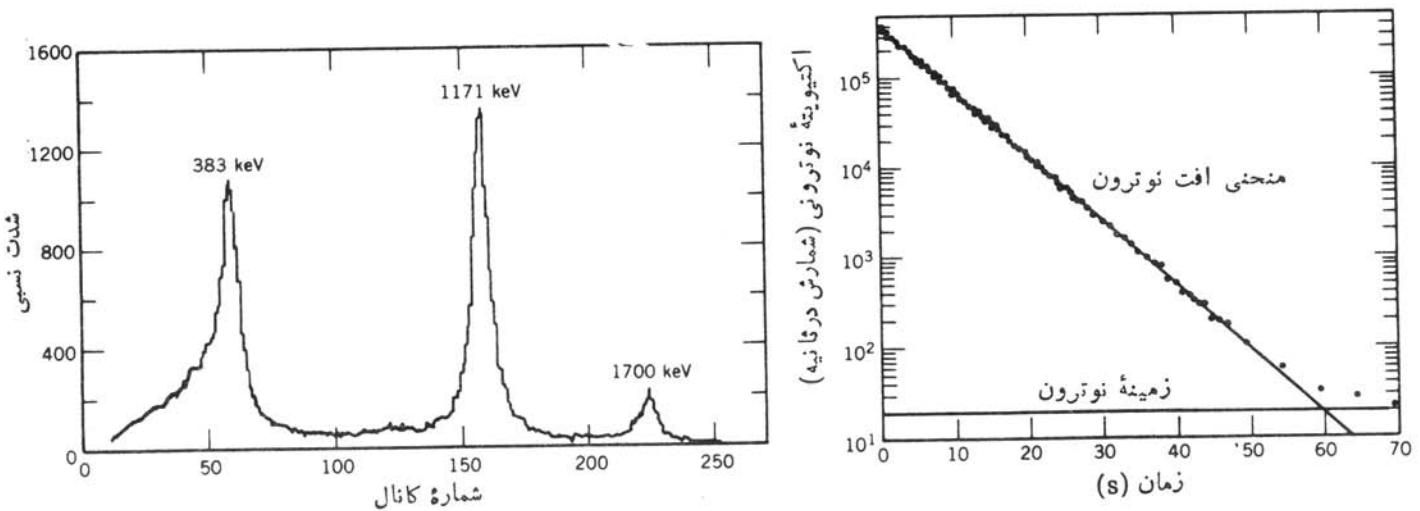
$$m(^{17}O)c^2+E_x=m(^{16}O)c^2+E'_x+m_nc^2+T_n+T_R$$

یا

$$E_x=E'_x+T_n+T_R+S_n \qquad (۴۳.۹)$$

که یك نتیجهٔ کلی است. تصحیح پس زنی با استفاده از پایستگی تکانه به‌دست می‌آیدکه منجر به‌رابطهٔ زیر می‌شود

$$T_R=T_n\left(\frac{m_n}{m_R}\right)\approx T_n\frac{1}{A-1} \qquad (۴۴.۹)$$



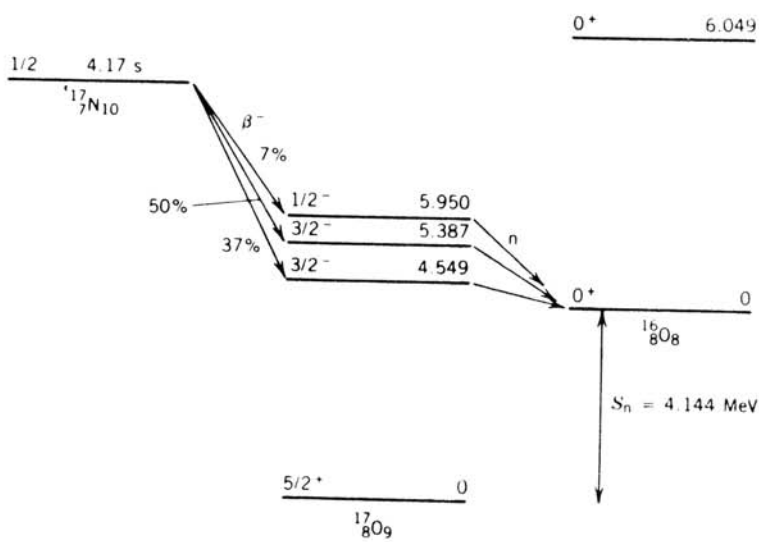
شکل ۱۴.۹ نوترونهای تأخیری در واپاشی بتازای ^{17}N. طیف انرژی نوترون در سمت چپ، و افت اکتیویتهٔ نوترونی برحسب زمان در سمت راست نشان‌داده شده است.

که‌در آن m_R جرم هستهٔ پس‌زن است. از آنجا که این تصحیح کوچك است، می‌توان m_n/m_R را تقریباً با $1/(A-1)$ نشان‌داد. نتیجهٔ نهایی به‌صورت زیر است

$$E_x = E'_x + \frac{A}{A-1} T_n + S_n \qquad (۴۵.۹)$$

اگرانرژی برانگیختگی ^{16}O را برابر $E'_x = 0$ بگیریم، انرژی‌اندازه‌گیری‌شدهٔ نوترونهای تأخیری در واپاشی بتازای ^{17}N انرژیهای برانگیختگی را برابر ۵٫۵۵۱، ۵٫۳۸۸، و ۵٫۹۵۰ MeV به‌دست می‌دهد. واکنشهای هسته‌ای را هم می‌توان برای اندازه‌گیری انرژی حالات برانگیختهٔ ^{17}O به‌کار برد، و دراین مطالعه نیز همان سه حالت باانرژیهای محاسبه شده به‌دست می‌آیند. اگر می‌خواستیم امکان دسترسی به حالات برانگیختهٔ ^{16}O ($E'_x \geqslant 6.049$ MeV) یعنی اولین حالت برانگیخته وحالتهای بالاتر) را درنظر بگیریم، پایینترین برانگیختگی ممکن در ^{17}O برابر ۱۰٫۶ MeV به‌دست می‌آمدکه از مقدار Q واپاشی بتازای ^{17}N (۸٫۶۸ MeV) بزرگتر است. بنابراین، حالات برانگیختهٔ ^{16}O در این واپاشی متراکم نمی‌شوند.

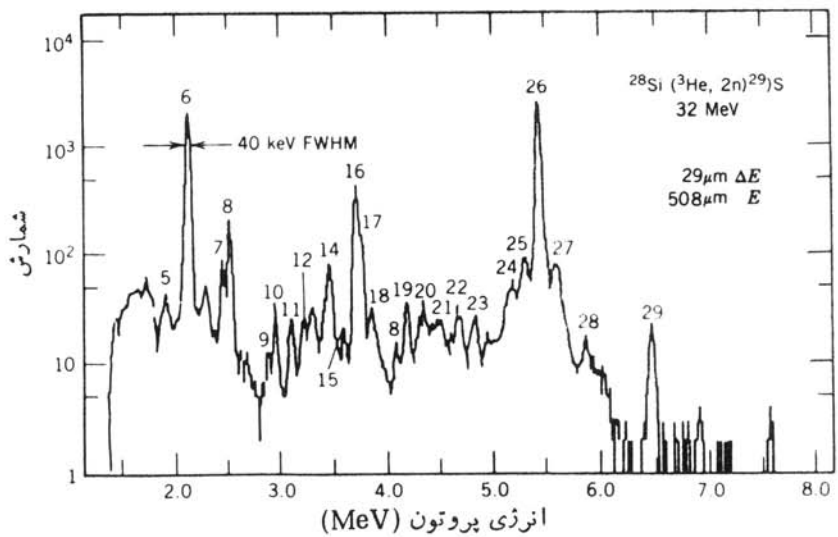
شکل ۱۴.۹ نیز آهنگ گسیل نوترون را برحسب زمان نشان می‌دهد، که با استفاده ازآن نیمه‌عمر ^{17}N برابر ۴٫۱۷ s به‌دست می‌آید. این نیمه‌عمر برای اینکه واپاشی را یك‌فرایند گسیل مستقیم نوترون بدانیم، بسیار طولانی است وبنابراین بایدآن‌را یك‌فرایند گسیل تأخیری در واپاشی بتازا درنظر بگیریم. واپاشی حاصل در شکل ۹. ۱۵ نشان‌داده شده است.



شکل۱۵.۹ نوترونهای تأخیری در واپاشی بتازای ^{17}N.

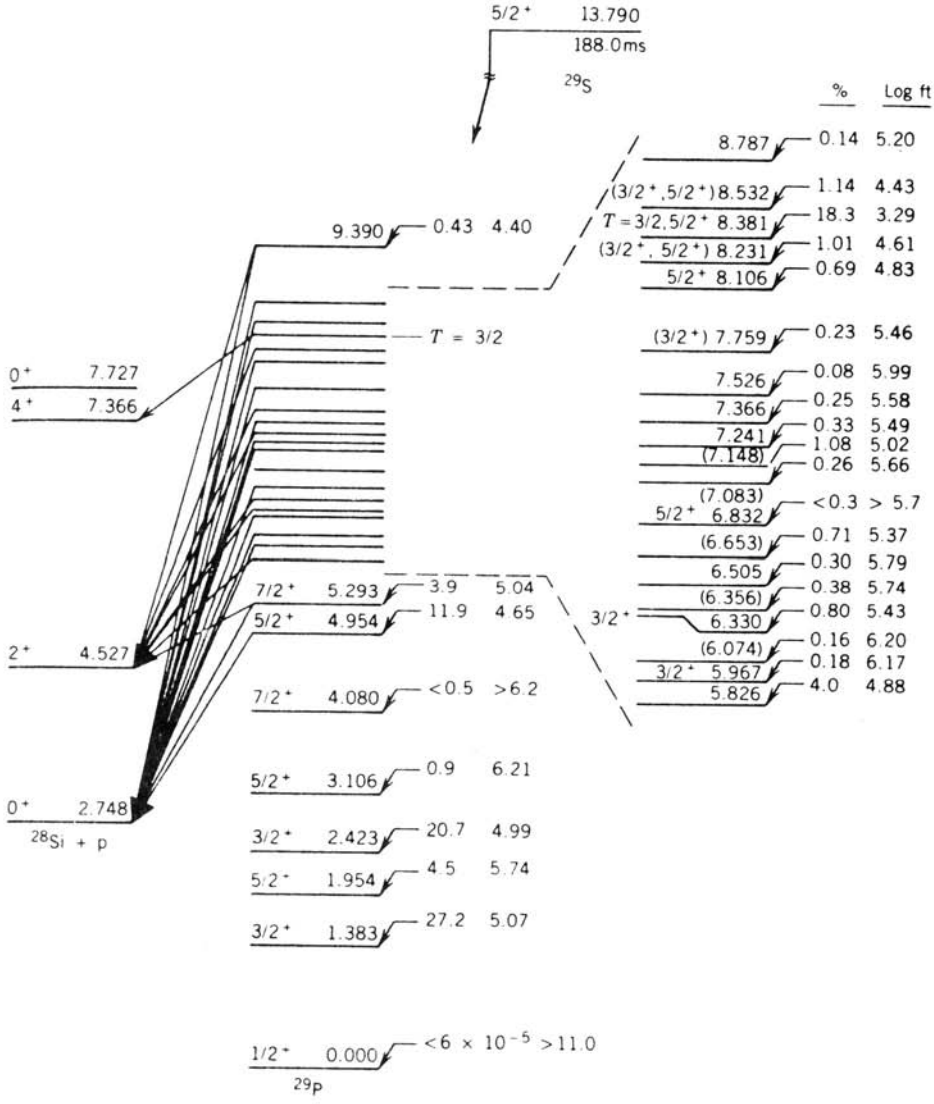
گسیل پروتون از هسته‌های حاوی پـروتون اضافی به سهولت انجام می‌گیرد، که مسلماً یکی از مصادیق آن مورد ^{29}S ($Z=16$، $N=13$) است. فعال‌سازی از طـریق واکنش $^{28}Si + ^{3}He \rightarrow ^{29}S + 2n$ انجام شده است، که این واکنش سبب افزایش دو پروتون و کم‌شدن یك‌نوترون از هستهٔ پایدار اولیه ($Z=14$، $N=14$) می‌شود. نیاهستهٔ ^{29}S با واپاشی بتازای مثبت به‌حـالات گسیلندهٔ ^{29}P می‌رسد، واین‌حالتها سپس با گسیل پروتون به‌حالات نهایی ^{28}Si منتهی می‌شوند. شکل ۱۶.۹ طیف پروتون مشاهده شده، و شکل ۱۷.۹ انتساب این پروتونها را با حالات اولیه و نهایی‌شناخته شده در ^{29}P و ^{28}Si نشان می‌دهد. بسیاری از دلایل تشخیص و انتساب این واپاشیها غیرمستقیم است. بـرای مثال، تفاوت انرژی بین‌حالت پایهٔ 0^+ و اولین حالت برانگیختهٔ 2^+ در ^{28}Si بـرابـر ۱٫۷۷۸ MeV است، و بنابراین دو گـروه پروتـون با تفاوت انرژی ۱٫۷۷۸ MeV را می‌توان در نظر گرفت که از یك تـراز گسیلنده به این دو حالت نهایی در دخترهسته برسند (گـروههای ۱۶ و ۲۶، ۱۸ و ۲۷، ۲۲ و ۲۹). حالت مانسته با گـروههای قوی ۱۶ و ۲۶ متناظر می‌شود که مقدار $\log ft$ درآن برابر ۳٫۲۹ است، یعنی همان‌گونه که از این گذارقویاً ترجیحی انتظار می‌رود از خصوصیت مشخصهٔ واپاشیهای ابرمجاز برخوردار می‌شود.

درهسته‌های سنگینتر، چگالی حالتهای برانگیخته در گسیلنده به‌قدری افزایش‌می‌یابد که فاصلهٔ بین‌ترازها از تفکیك انرژی‌آشکارساز هم کوچکتر می‌شود. دراین‌صورت، دیگر

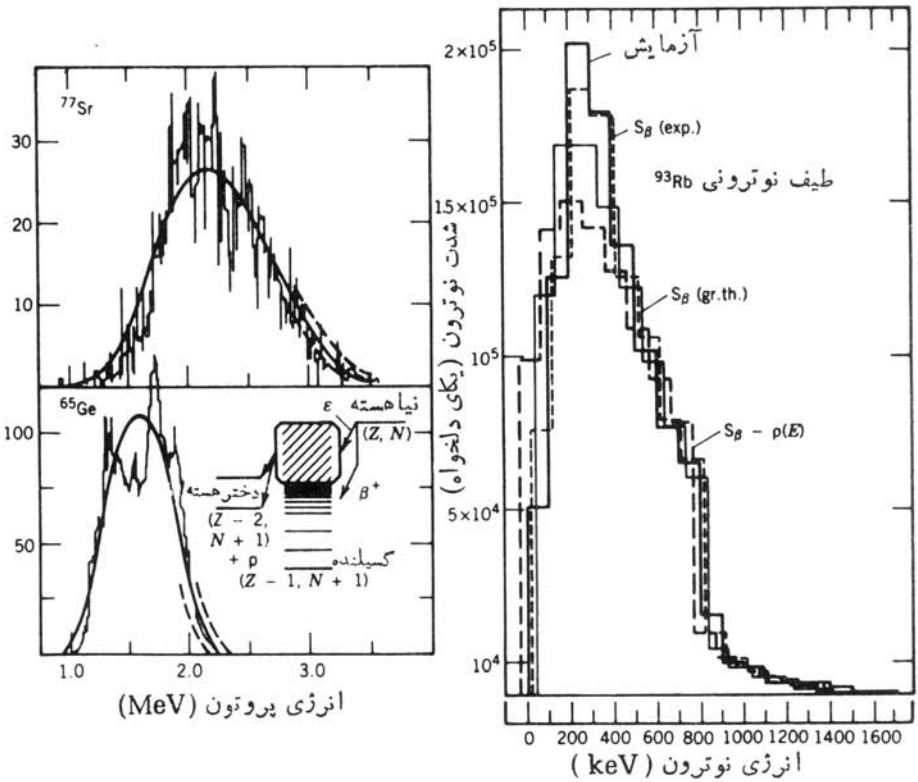


شکل ۱۶.۹ پـروتونهای گسیل شده پس از واپاشی بتازای ^{29}S. پروتونها بـااستفاده از یك تلسکوپ $\Delta E \cdot E$ متشکل از آشکارسازهای Si مشاهده شده‌اند. اعداد به‌واپاشیهای پـروتونی ویژهٔ حالتهای برانگیختهٔ ^{29}P مربوط می‌شوند.

نمی‌توان با استفاده از حالات ویژهٔ گسیلنده هویت واپاشیها را تعیین کرد، بلکه فقط می‌توان درمورد خصوصیات کلی ومتوسط واپاشی بحث کرد (شکل ۱۸.۹).



شکل ۱۷.۹ حالتهای برانگیختهٔ ^{29}P که از گسیل پروتون تأخیری در واپاشی بتازای ^{29}S حاصل شده‌اند. مقادیر ft با استفاده از شدت پروتونهای مشاهده شده به‌دست آمده‌اند. به‌شاخهٔ واپاشی قوی (مقدار ft کوچك) در واپاشی به‌حالت MeV ۸٫۳۸۱ توجه کنید که حالت مانستهٔ حالت پایهٔ ^{29}S است.



شکل ۱۸.۹ گسیل پروتون (چپ) ونوترون (راست) پس از واپاشی‌بتازا در هسته‌های‌سنگین. فاصلهٔ بین حالتهای برانگیختهٔ گسیلنده به‌اندازه‌ای کوچك است که به‌جای قله‌های منفرد شکلهای ۱۴.۹ و ۱۶.۹ فقط یك توزیع پهن مشاهده می‌شود. برای برازش داده‌های تجربی، به‌جای محاسبات تفصیلی هریك از حالتهای هسته‌ای، از مدلهای‌آماری استفاده می‌شود.

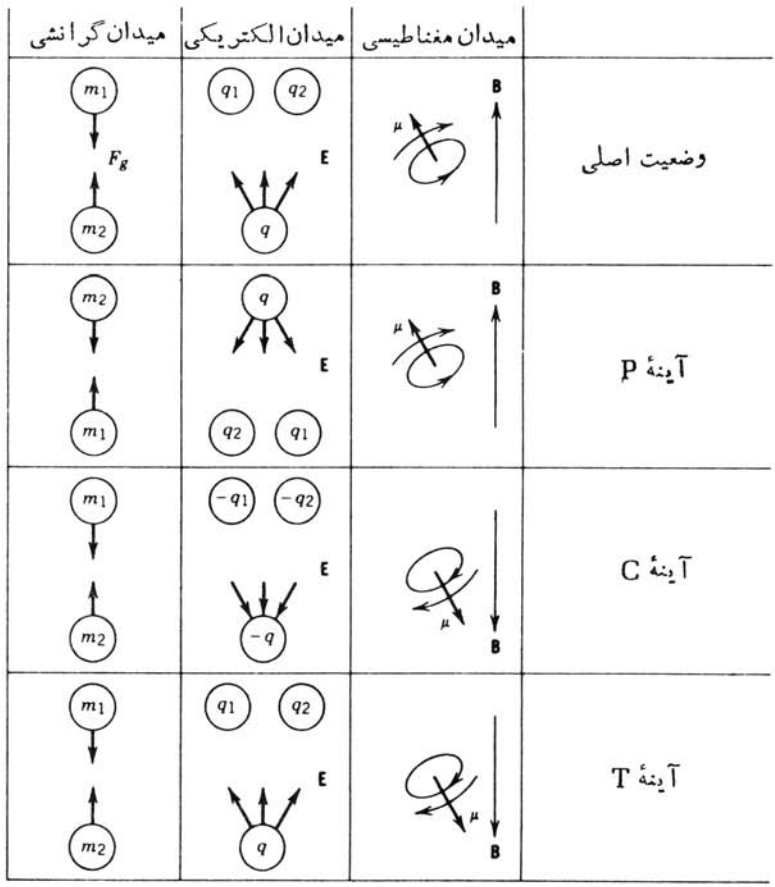
۹.۹ ناپایستگی پاریته

عملکرد پاریته (در تمایز با عدد کوانتومی پاریته) را می‌توان به‌صورت انعکاس تمامی مختصات، یعنی $\mathbf{r} \to -\mathbf{r}$، بیان کرد. اگر دراثرعملکرد پاریته، سیستم فیزیکیی‌یا مجموعهٔ معادلاتی حاصل شود که از همان قوانین سیستم اولیه پیروی کند، نتیجه می‌گیریم که‌سیستم نسبت به‌عملکرد پاریته ناورداست. سیستم اولیه و سیستم انعکاسی هردو نمایندهٔ حالتهای طبیعی‌ممکن هستند، ودرحقیقت‌ما به‌هیچ روش‌اصولیی نمی‌توانیم سیستم اولیه را ازتصویر انعکاسی آن تمیز دهیم.

البته، جهان ماکروسکوپیکی مسلماً جهتی را برجهات دیگر ترجیح می‌دهد، و برای مثال، قلب افراد بشر در طرف چپ بدن آنهاست. اما هیچ قانونی درطبیعت چنین وضعیتی

را ایجاب نمی‌کند، وکاملا محتمل است که انسانی در طبیعت به‌وجود آید که قلبش در طرف راست بدن قرار داشته باشد. در اینجا چیزی که مورد توجه ماست، تقارن انعکاسی خود قوانین طبیعت است و نه ترتیب تصادفی بخشهایی از طبیعت که این قوانین بر آنها حکمفرماست.

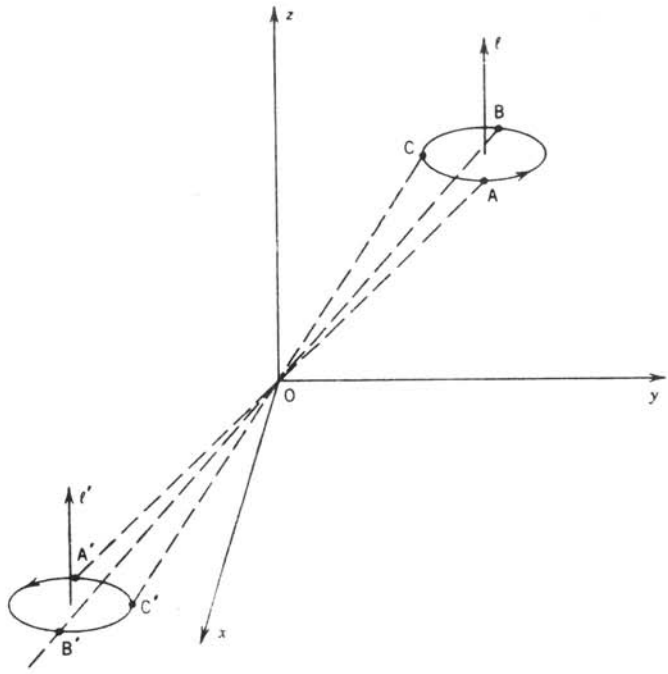
درحقیقت، سه‌نوع «انعکاس» مختلف وجود دارند که ما اغلب با آنها سروکار داریم. اولین آنها انعکاس فضایی $\mathbf{r} \to -\mathbf{r}$ است که آن‌را حوزهٔ عمل پاریته (P) می‌دانیم. دومین «انعکاس» به‌صورت جایگزینی تمام ذرات با پادذره‌های متناظرشان مطرح می‌شود که آن‌را همیوغی بار (C) می‌نامند. البته علاوه‌بر بار الکتریکی، خصوصیات دیگری هم دراین عملکرد وارونه‌می‌شوند. سومین «انعکاس» برگشت زمان (T) است که‌درآن $t \to -t$ جایگزین t می‌شود، و درعمل جهت زمان درتمام فرایندهای سیستم وارونه می‌شود. شکل ۱۹.۹ نشان



شکل ۱۹.۹ اثر انعکاسهای P، C، و T روی برهم‌کنشهای گرانشی والکترومغناطیسی. درتمام موارد نمودارهای انعکاسی وضعیتهای فیزیکی ممکن را نشان می‌دهند، و از همین‌رو این برهم‌کنشها را نسبت به P، C، و T ناوردا می‌گویند.

می‌دهد که سه فرایند اصلی موجود در طبیعت در اثر عملکردهای P، C، و T به‌چه‌صورتی درمی‌آیند. توجه کنید که علامت بعضی از بردارها دراثر عملکرد پاریتهٔ P تغییر می‌کند (بردارهای مکان، سرعت، نیرو، میدان الکتریکی) و برخی‌دیگر تغییر نمی‌کند (بردارهای تکانهٔ زاویه‌ای، میدان مغناطیسی، گشتاور نیرو). بردارهای گروه اول را بردار حقیقی یا قطبی و گروه دوم را شبه بردار یا بردار محوری می‌نامند. شکل ۲۰.۹ تصویر کاملی از انعکاس فضایی یك جسم چرخان را نسبت به‌مبدأ نشان می‌دهد. به‌روشنی دیده می‌شود که جهت بردار تکانهٔ زاویه‌ای دراثر انعکاس تغییر نمی‌کند.

در تمام مواردی که در شکل ۱۹.۹ نشان داده شده‌اند، تصویر انعکاسی نمایندهٔ یك وضعیت فیزیکی حقیقی است که می‌توانیم آن را در آزمایشگاه تولید کنیم، و بر این باوریم که قوانین گرانش و الکترومغناطیس نسبت به P، C، و T ناوردا



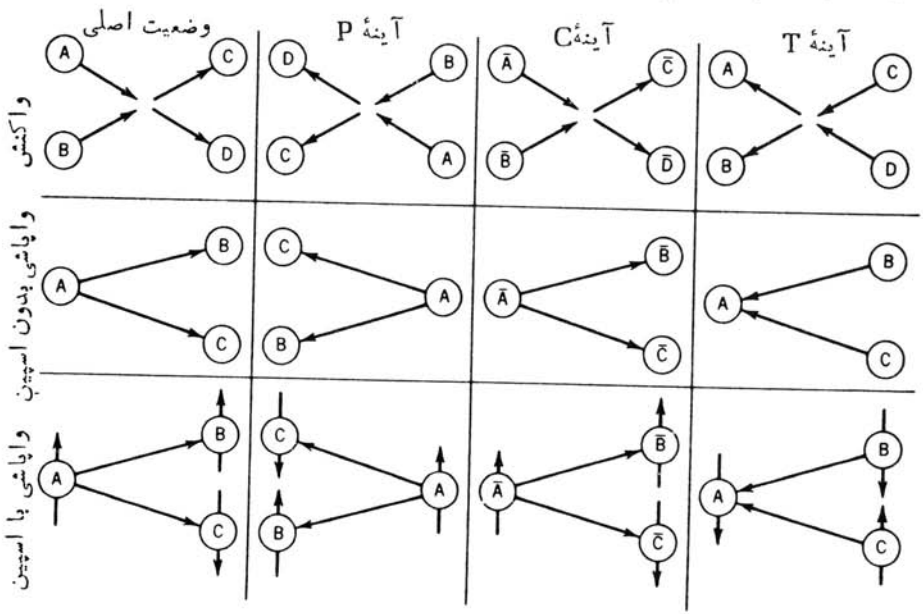
شکل ۲۰.۹ اثر عملکرد P برجسم چرخان. اگر انعکاس نقاط A، B، و C واقع‌برمدارحرکت را نسبت به‌مبدأ پیدا کنیم ($\mathbf{r} \to -\mathbf{r}$)، نقاط A'، B'، و C' حاصل می‌شوند. چون ذرهٔ اصلی از A به B و ازآنجا به C حرکت می‌کند، ذرهٔ انعکاسی از A' به B' و ازآنجا به C' حرکت خواهد کرد. استفاده ازقاعدهٔ دست راست برای تعیین‌جهت تکانهٔ زاویه‌ای نشان‌می‌دهد که l و l' هردو به‌طرف بالا هستند. بنابراین، l برداری است که دراثر عملکرد P تغییر علامت‌نمی‌دهد؛ چنین بردارهایی را **بردارهای محوری** می‌نامند (بردارهایی مانند $\mathbf{r}$ که‌دراثر عملکرد پاریته تغییر علامت می‌دهند، **بردارهای قطبی** خوانده می‌شوند).

هستند.

یک راه‌آزمون ناوردایی برهم‌کنش هسته‌ای نسبت به‌اثر P، C، و T، انجام رشته‌آزمایشهایی است که در شکل ۲۱.۹ شرح داده شده‌اند. در آزمایش اصلی، واکنش بین ذرات A و B ذرات C و D را تولید می‌کند. اثر P را می‌توانیم با تعویض جای ذرات بیازماییم (برای مثال، به جای اینکه پرتابهٔ A را بر هدف B بتابانیم می‌توانیم پرتابهٔ B را بر هدف A فرودآوریم). می‌توانیم عمل همیوغی بار C را باانجام‌واکنشی با استفاده از پادذره‌ها، و عمل برگشت زمان T را با واکنش دادن ذره‌های C و D برای تولید ذره‌های A و B بیازماییم. در هر مورد، احتمال واکنش انعکاسی را با واکنش اصلی مقایسه می‌کنیم. اگر احتمال انجام واکنشهای اصلی وانعکاسی باهم برابر شود، می‌توانیم نتیجه بگیریم که P، C، و T در واکنشهای هسته‌ای عملکردهایی ناوردا هستند.

درمورد واپاشیهای $A \rightarrow B+C$ هم می‌توانیم از آزمونهای مشابه‌آنچه در شکل نشان‌داده شده است، استفاده‌کنیم وناوردایی عملکردهای P، C، و T را در فرایندهای واپاشی مطالعه‌کنیم.

درمورد آزمون‌عملکرد P باید دقت‌کنیم، زیرا چنانکه درشکل نشان‌داده شده‌است، آزمایش انعکاسی‌مشابه‌آزمایشی است‌که دراثر چرخاندن صفحه یا ایستادن روی‌سربرای مشاهدهٔ واپاشی یا واکنش به‌وجود می‌آید. ازآنجاکه هدف ما آزمودن ناوردایی قوانین طبیعت برای فیزیکدانانی‌که روی سر خود ایستاده‌اند نیست، بایدبه‌طریقی بتوانیم‌فرایند



شکل ۲۱.۹ آزمونهای P، C، و T در فیزیک هسته‌ای.

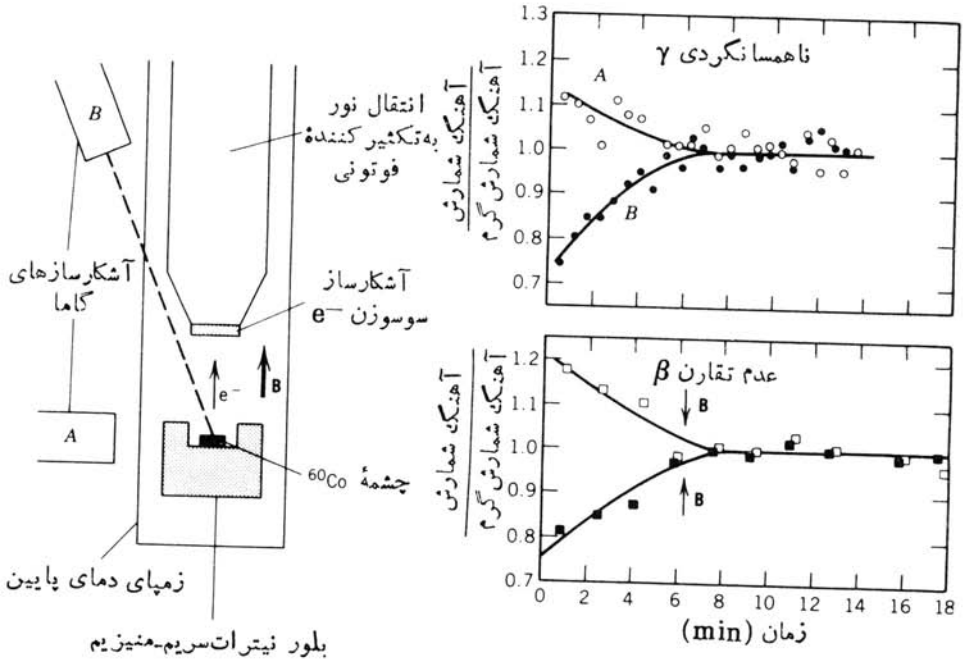
انعکاسی را با وضوح بیشتری تشخیص دهیم.

یکی از راه حلها این است که برای ذرهٔ واپاشندهٔ A بردار اسپینی در یك جهت خاص درنظر بگیریم. جهت اسپین دراثر عملکرد P تغییر نمی‌کند، ولی اگر روی سرمان بایستیم ونگاه‌کنیم اسپین تغییرجهت می‌دهد. به‌این‌ترتیب، آزمایش اصلی نشان می‌دهد که ذرهٔ B در جهت اسپین A گسیل‌شده است، درحالی‌که در آزمایش انعکاسی ذرهٔ B در خلاف جهت اسپین A گسیل می‌شود. به‌روشنی پیداست که این آزمایش با تصویر انعکاسی‌اش تفاوت دارد. اما اگر تعداد زیادی از هسته‌های A داشته باشیم که اسپین همهٔ آنها در یك جهت ثابت شده باشد، واگر ذرات B ازاین هسته‌ها به‌تعداد مساوی درجهت اسپین هسته و خلاف آن گسیل شوند، دراینجا هم آزمایش باتصویرش مشابه خواهد بود. بدین‌سان، برای آزمون P روشی مستقیم به‌دست می‌آید ــ می‌توانیم اسپین هسته‌های واپاشنده را به‌سهولت به‌موازات هم درآوریم، وببینیم آیا محصولات واپاشی درهردوجهت به‌تساوی گسیل می‌شوند ویا جهت خاصی را ترجیح می‌دهند.

درسال ۱۹۵۶ لی و یانگ براین نکته تأکیدکردند که ناوردایی P تاکنون در واپاشی بتازا دیده نشده است، واین امر در مغایرت آشکار باآزمون آن در سایر واپاشیها وفرایندهای واکنش هسته‌ای است. آنها در این اظهارنظر ازمسئله‌ای غیرعادی به‌نام‌معمای θ-τ الهام گرفته بودند. در آن زمان به‌دو ذره به نامهای θ و τ برخوردکرده بودند که به‌نظر می‌رسید اسپین، جرم، وطول عمر یکسانی دارند؛ واین حاکی ازآن بودکه θ و τ درحقیقت یك ذره‌اند. با وجود این، واپاشیهای این ذرات به حالات نهایی با پاریته‌های مختلف منجر می‌شود. ازآنجاکه‌فرایند حاکم براین واپاشیها مشابه واپاشی بتازای‌هسته‌ای بود، لی و یانگ اظهارنظرکردندکه θ و τ درحقیقت ذرهٔ واحدی (به‌نام‌امروزی‌مزون K) هستندکه می‌تواند به حالتهای نهایی با پاریته‌های مختلف واپاشیده شود، مشروط‌بر آنکه عملکرد P برای واپاشی بتازا فرایندی ناوردا نباشد.

گروههای آزمایشی متعددی درصددآزمون پیشنهاد لی و یانگ برآمدند، و بزودی وو و همکارانش با استفاده از واپاشی بتازای ^{60}Co یك آزمایش موفقیت‌آمیز را به‌نتیجه رساندند. آنها اسپینهای ^{60}Co را با همسوسازی گشتاورهای دوقطبی مغناطیسی هسته‌ها در یك‌میدان مغناطیسی‌در دمای بسیار پایین ($T \sim 0.01\,K$، به‌قدری‌پایین که حرکت گرمایی نتواندهمسویی گشتاورها را برهم‌زند) به‌موازات یکدیگر درآوردند. معکوس‌سازی‌جهت میدان مغناطیسی، اسپینها را معکوس می‌کرد و بدین‌گونه عمل انعکاس تحقق می‌یافت. اگر تعداد ذرات بتای گسیل‌شده درجهت میدان مغناطیسی وخلاف آن باهم مساوی‌می‌شد، ناوردایی واپاشی بتازا نسبت به‌عملکرد P به‌اثبات می‌رسید. در واقع آنچه مشاهده شد، این‌بودکه دست‌کم ۷۰٪ ذرات β درخلاف جهت اسپین‌هسته گسیل می‌شدند. شکل ۲۲.۹ اطلاعات دست اول وو وهمکارانش‌را نشان می‌دهد. به‌روشنی دیده می‌شودکه با معکوس کردن جهت میدان مغناطیسی، آهنگ شمارش نیز معکوس می‌شود.

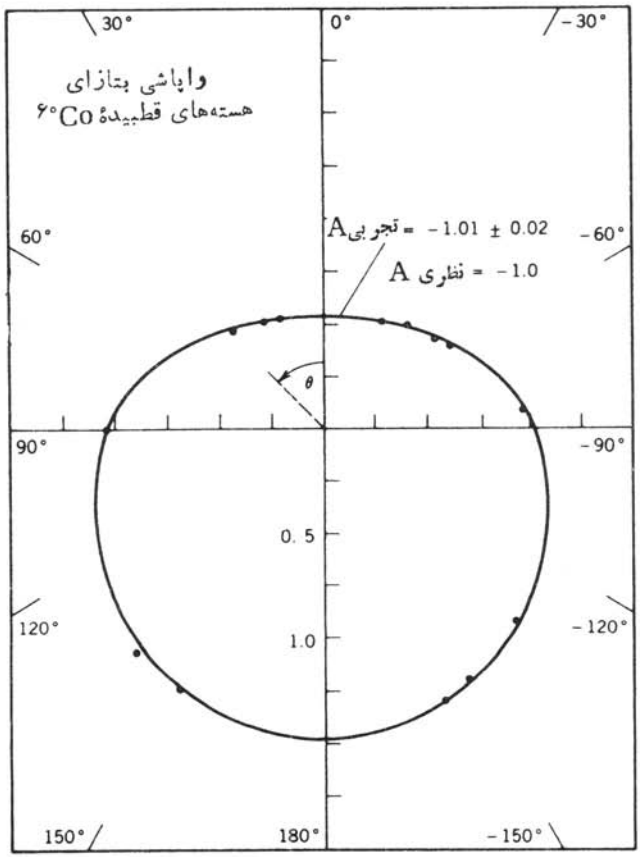
بیست‌وپنج‌سال پس ازآزمایش نخستین، گروه پژوهشی وو آزمایش ^{60}Co را با



شکل ۲۲.۹ نمودار ساده‌ای از آزمون تجربی نقض پاریته در واپاشی ^{60}Co. وسایل آزمایش در طرف چپ نشان‌داده‌شده‌است. از بلور نیترات سریم-منیزیم برای خنک کردن چشمهٔ رادیواکتیو تا دمای ۰٫۰۱K استفاده شده است. تصویر پایینی سمت راست مربوط به آهنگ شمارشهای مشاهده شده است؛ معکوس کردن میدان مغناطیسی معادل این است که هسته‌ها تحت تأثیر P قرار گیرند (شکلهای ۲۱.۹ و ۲۴.۹). اگر P نقض نشود، عدم تقارنی وجود ندارد و منحنیهای متناظر به‌میدان-بالا ومیدان-پایین با هم تطابق خواهند داشت. محو شدن عدم‌تقارن در دقیقهٔ ۸ به‌علت گرم شدن تدریجی چشمه و ازبین رفتن قطبش هسته‌های ^{60}Co است که با آهنگ شمارشهای پرتو γ نشان‌داده شده است.

سنجش-ابزار جدیدی تکرار کردند که در آن برای خنک کردن هسته‌ها، قطبی کردن اسپینها، و آشکارسازی ذرات β از تکنولوژی بسیار پیشرفته‌ای استفاده شد. شکل ۲۳.۹ نتیجهٔ این آزمایش جدید را که دلیل روشنی بر نقض قانون پاریته است، نشان می‌دهد.

شکل ۲۴.۹ آزمایش ^{60}Co وانعکاس آن را در آینهٔ P به‌طور ساده نشان می‌دهد. در آزمایش انعکاسی P، الکترونها به‌جای خلاف میدان مغناطیسی ترجیحاً درجهت آن گسیل می‌شوند. چون این حالت درطبیعت مشاهده نمی‌شود، باید نتیجه گرفت که لااقل تا آنجا که به‌واپاشی بتازا مربوط می‌شود، عملکرد P تقارن معتبری نیست. نتیجهٔ شگفت دیگری نیز از این آزمایش حاصل می‌شود. انعکاس آزمایش اصلی در آینهٔ C را در شکل ۲۴.۹ در نظر بگیرید. الکترونهای جاری در سیمها که میدان مغناطیسی را به‌وجود می‌آورند

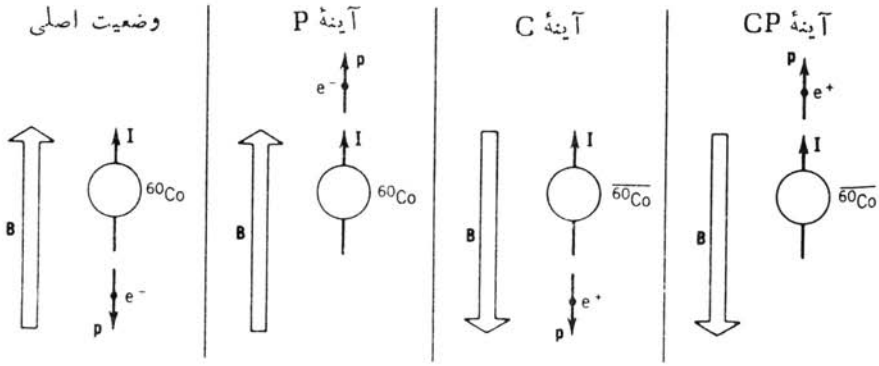


شکل ۲۳.۹ نتایج بهبودیافتهٔ وو و همکاران درمورد نقض پاریته در واپاشی بتازای ^{60}Co. نقاط (رسم شده روی نمودار قطبی) شدت مشاهده شدهٔ پرتوهای بتا را در زاویهٔ θ نسبت به‌جهت قطبش (جهت اسپین) هسته‌های واپاشنده نشان می‌دهد. منحنی خط پر نمایندهٔ پیش‌بینی نظریهٔ فرمی است که شدت را به‌صورت $1+AP\cos\theta$ به‌دست می‌دهد، که در آن P پارامتری عمدتاً وابسته به‌قطبش هسته‌ای است. اگر پاریته در واپاشی بتازا نقض نشده بود، شدتها در °۰ و °۱۸۰ با هم برابر می‌شدند.

به‌پوزیترون تبدیل می‌شوند، ودرنتیجه جهت میدان مغناطیسی معکوس می‌شود. درآزمایش انعکاسی C، ذرات β اکنون ترجیحاً درجهت میدان مغناطیسی گسیل می‌شوند. بنابراین ماده و پادماده در واپاشی بتازا رفتاری متفاوت دارند، که نقض تقارن C است.[۱]

اما اگر انعکاس آزمایش را مطابق شکل ۲۴.۹ در آینه‌ای به‌دست آوریم که عملکردهای P و C را همزمان انجام دهد، به‌حالت آزمایش اصلی برمی گردیم. حتی اگر عملکردهای

۱. مارتین گاردنر در کتاب خود، *The Ambidextrous Universe*، درمورد چگونگی استفاده از این آزمایش برای پاسخ به‌این پرسش بحث می‌کند که تمدنهای غیرزمینی‌ای که ممکن است روزی با آنها درارتباط قرار گیریم، از ماده یا پادماده تشکیل شده‌اند.



شکل ۲۴.۹ آزمایش هسته‌های قطبیدهٔ ^{60}Co در آینه‌های P و C و ترکیب CP.

C و P به‌طور جداگانه تقارنهـای معتبری نباشند، ترکیب CP تقارنی معتبر است. [در فصل ۱۷ (جلد دوم، ترجمهٔ فارسی) خواهیم دید که برخی واپاشیهای مزون K که مشابه واپـاشیهای بتازا هستند، حتی ناوردایی CP را تا حدی نقض می‌کنند. تاکنون مدرکی دال‌برنقض تقارن CP در واپاشیهای بتازای معمولی به‌دست نیامده است.]

قبل از ترك این مبحث، باید اثر ناپایستگی P را برطیف‌نمایی هسته‌ای بررسی کنیم. برهم‌کنش بین نوکلئونهای موجود در هسته از دوقسمت تشکیل شده است: قسمت «قوی» که عمدتاً از تبادل‌مزون π ناشی می‌شود و تقارن P را مراعات می‌کند، وقسمت «ضعیف» که از همان برهم‌کنشی حاصل می‌شود که علت واپاشی بتازاست:

$$V_{\text{هسته‌ای}} = V_{\text{قوی}} + V_{\text{ضعیف}} \qquad (۴۶.۹)$$

به‌طورکلی، اثر ضعیف V برطیف‌نمایی هسته‌ای درمقایسه با قوی V بسیارکوچك‌است، ولی ضعیف V دارای خصوصیت نقض تقارن P است که قوی V فاقدآن است. تاآنجاکه به‌حالات هسته‌ای مربوط می‌شود، اثر ضعیف V این است که سهم کوچکی از پاریتهٔ «ناجور» به‌تابع‌موج هسته‌ای می‌افزاید

$$\psi = \psi^{(\pi)} + F\psi^{(-\pi)} \qquad (۴۷.۹)$$

که در آن F از مرتبهٔ 10^{-7} است. دربیشتر موارد، این افزایش اندك به تابع‌موج، نتیجهٔ قابل‌ملاحظه‌ای در طیف‌نمایـی هسته‌ای ندارد. ولـی این اثرات در دو مورد به خصوص قابل‌ملاحظه‌اند. دراولین‌مورد، شدت تابش گاماهای گسیل‌شده‌ازهستهٔ‌قطبیده درجهت میدان مغناطیسی قطبنده ودرخلاف آن اندکی باهم تفاوت خواهد داشت. این دقیقاً شبیه‌آزمایش ^{60}Co است، ولی معمولا اثرش بسیارکوچك است (از مرتبهٔ یك قسمت در 10^{7}) زیـرا فقط از قسمت‌کوچکی از تابع موج نـاشی می‌شود و قسمت عادی تابع $\psi^{(\pi)}$ تفاوتی در شدتها به وجود نمی‌آورد. در یك مـورد بسیار مساعد واپاشی حـالت ایزومری ^{180}Hf

تفاوت دو قسمت درحدود ۲٪ است، ولی درحالت کلی این تفاوت شدتها بسیار کوچکتر و شاید خارج‌از توان اندازه‌گیری‌است. درنوع‌دوم مشاهدات، باید فرایندی‌را جستجو کرد که درحالت عادی درصورت صفر بودن F مطلقاًممنوع‌است. برای مثال، واپاشی آلفازای تراز $^{-}۲$ درهستهٔ ^{۱۶}O را به‌حالت پایهٔ $^{+}۰$ در هستهٔ ^{۱۲}C در نظر بگیرید. قواعد گزینش واپـاشی آلفازا، واپاشیهای $^{+}۰ \leftarrow {}^{-}۲$ را مطلقاً ممنوع می‌سازد (بخش ۵.۸)، ولی اگر حالت $^{-}۲$ جزءکوچکی از حالت $^{+}۲$ را در خود داشته باشد، واپـاشی $^{+}۰ \leftarrow {}^{-}۲$ مجاز می‌شود و باشدت بسیار کم متناسب با $F^{۲}$ رخ می‌دهد. برمبنای‌مطالعهٔدقیق واپاشی‌آلفازای حالات برانگیختهٔ ^{۱۶}C، نوبك وهمکارانش انشعاب ضعیفی راکشف کردندکه از نظـر آنها همان‌گذار ناقض‌پاریتهٔ $^{+}۰ \leftarrow {}^{-}۲$ است. نیمه‌عمرجزئی این‌گذار را برابر $۷ \times ۱۰^{-۷}s$ به‌دست‌آورده‌اند. درمقایسه بااین مقدار، معادلهٔ(۱۸.۸) نیمه‌عمر یك‌گذار معمولی آلفا را (با $Q = ۱٫۷\,MeV$، $B = ۳٫۸\,MeV$) برابر $۲ \times ۱۰^{-۲۱}s$ به دست می‌دهد. بنابراین شدت واپاشی آلفازا، همان‌طورکه از این فرایند ناقض P انتظار می‌رود، واقعاً از مرتبهٔ $F^{۲}$ (یعنی $۱۰^{-۱۴}$) است.[۱]

۱۰.۹ طیف‌نمایی بتا

در این‌بخش روشهای به‌دست‌آوردن خصوصیات حالات هسته‌ای (به‌خصوص انـرژیهای برانگیختگی وتعیین اسپین - پاریته) را از طـریق اندازه‌گیری واپاشیهای بتازا بـررسی می‌کنیم. دوکیفیت فرایند واپاشی بتازا (درمقایسه با واپاشی‌آلفازا) این‌فرایند را پیچیده می‌کند: (۱) طیف β پیوسته است. مطالعهٔ فرایندهای واپـاشی مشابه‌آنچه دربخش ۶.۸ بررسی شد،برای واپاشیهای بتازا با شاخه‌های بسیار زیادش ممکن نیست، زیرا نمی‌توان به‌طور مطمئنی مؤلفه‌هـای مختلف را «بازشناسی» کرد. (۲) قواعد گزینش β مطلق نیستند ــ گستره‌های مقادیر ft اغلب همپوشی دارند و نمی‌توانند برای نتیجه‌گیریهای مطلق نوع واپاشی به‌کار روند، واندازه‌گیریهای تکانهٔ زاویه‌ای ذرات β برای‌مشخص‌کردن پاریته‌های نسبی حالات اولیه ونهایی‌کافی نیستند. اما در بسیاری از موارد می‌توان از این واپاشیها اطلاعات طیف‌نمایی به‌دست‌آورد.

اگرچه شکل طیف β و نیمه‌عمر واپاشی (درحقیقت، مقدار ft) به‌طور مطلق نوع واپاشی را مشخص نمی‌کنند، ولی سر نخهای مؤثری در مورد نـوع واپاشی (و در نتیجه اسپین - پاریتهٔ نسبی‌حالات اولیه ونهایی هسته) به‌دست می‌دهند. همان‌طورکه دربخش ۳.۹ بحث‌شد، نمودار فرمی - کوری خطی، بدون درنظر گرفتن عامل شکل، نوع مجاز واپاشی را نشان‌می‌دهد، و بنابراین انتظار داریم که قواعد «$\Delta I = ۰$ یا $\Delta I = ۱$» و «$\Delta\pi =$ نه» رعایت شده بـاشد. نمودار فـرمی - کوری غیر خطی، وقتی‌که با استفاده از عامل شکل

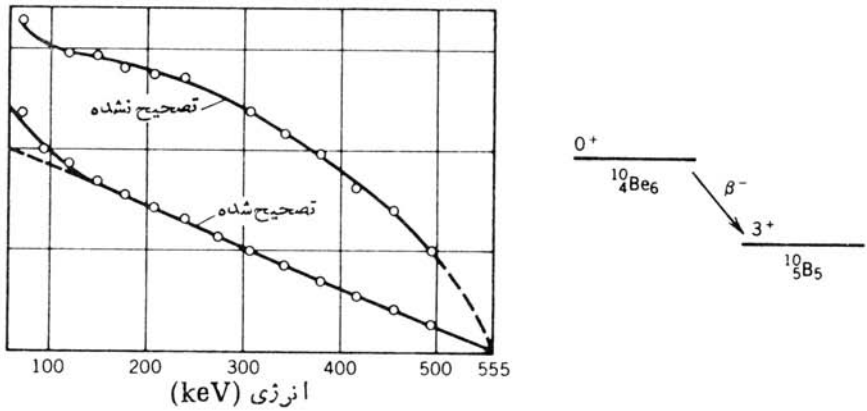
---

۱. شرحی ازاین‌آزمایش دشوار را درمرجع زیر می‌توان یافت:

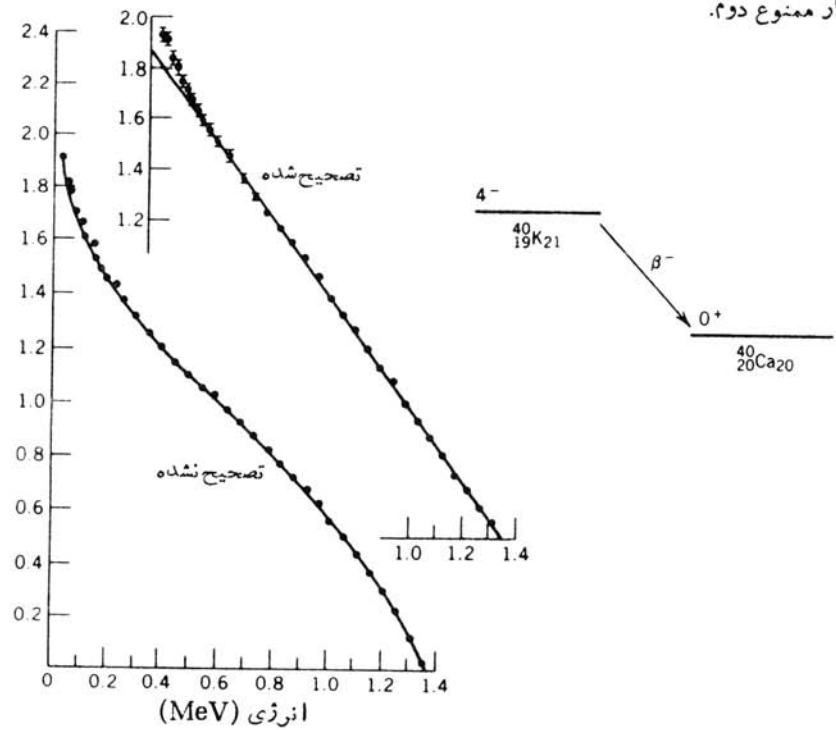
Phys. Rev. C, **10**, 320 (1974).

$S=p^{۲}+q^{۲}$ به‌صورت خطی درآید، چنانکه درشکل ۵.۹ دیده می‌شود، به‌احتمال زیاد واپاشی ممنوع نوع اول را نشان می‌دهد.

شکلهای ۲۵.۹ و ۲۶.۹ چگونگی استفاده از شکل واپاشی‌را برای به‌دست‌آوردن



شکل ۲۵.۹ نمودار فرمی-کوری تصحیح نشده برای واپاشی ^{۱۰}Be، وتصحیح عامل‌شکل‌برای گذار ممنوع دوم.

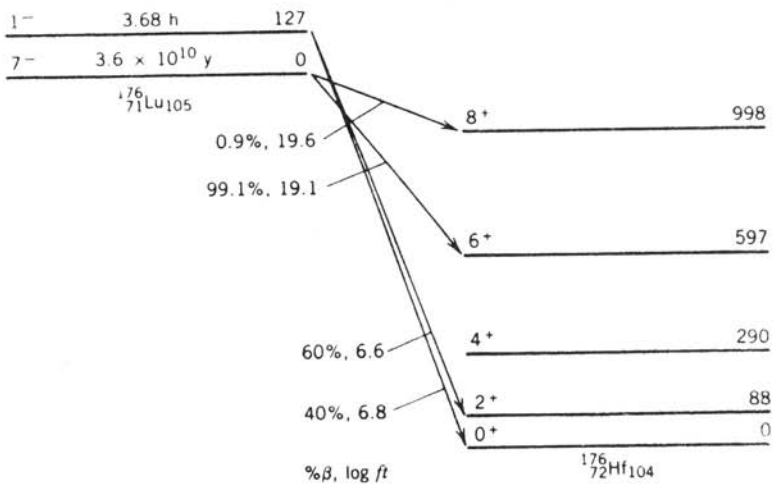


شکل ۲۶.۹ نمودار فرمی-کوری تصحیح نشده برای واپاشی ^{۴۰}K، وتصحیح عامل شکل برای گذار ممنوع سوم.

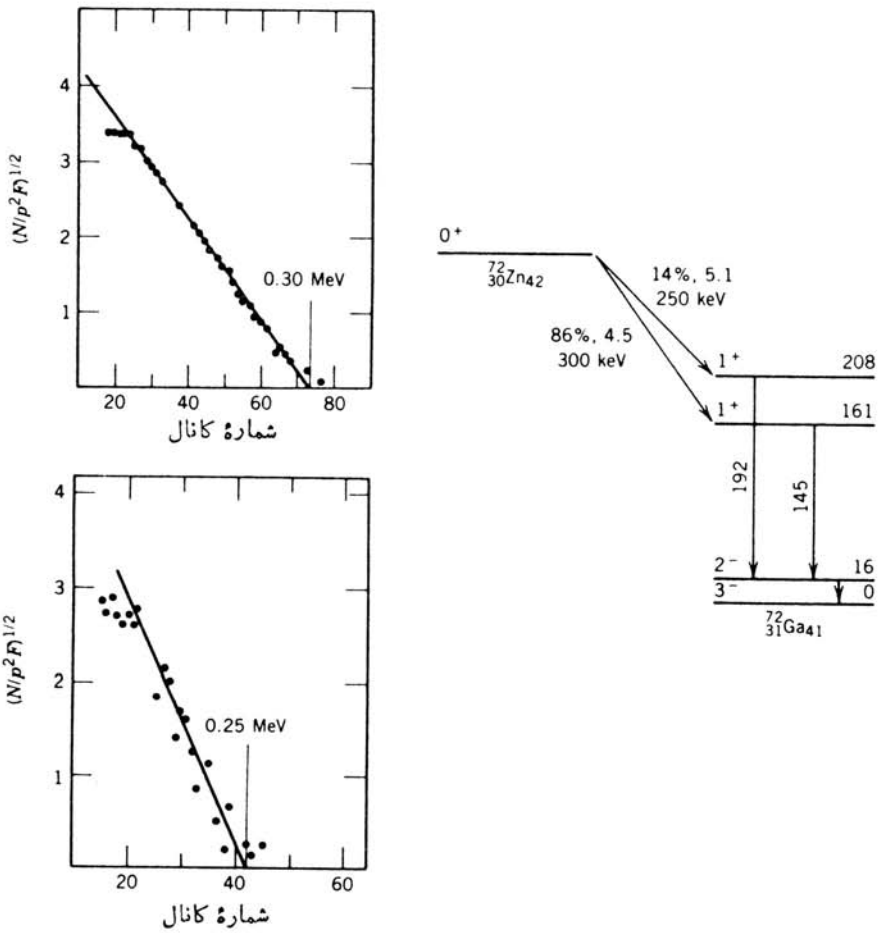
خصوصیات حالت ابتدایی نشان می‌دهند. نمودار فرمی-کوری واپاشی ^{10}Be بااستفاده از عامل شکل واپاشیهای ممنوع دوم، نه $\Delta\pi = 3$ و $\Delta I = 3$، خطی شده است. ^{10}Be مانند کلیهٔ هسته‌های Z زوج، و N زوج دارای حالت پایهٔ 0^+ است، بنابراین بلافاصله برای حالت نهایی ^{10}B اسپین-پاریتهٔ 3^+ به‌دست می‌آید. به‌علاوه، مقدار $\log ft$ که برابر ۱۳٫۴ است با مقدار مربوط به‌واپاشیهای ممنوع دوم سازگار است. واپاشی ^{40}K عمدتاً با واپاشی بتازای منفی به‌تولید ^{40}Ca منجر می‌شود. نمودار فرمی-کوری آن، با استفادهٔ عامل‌شکل بامشخصهٔ واپاشی ممنوع سوم $\Delta I = 4$ و «آری $= \Delta\pi$» خطی‌شده‌است. حالت نهایی، حالت پایهٔ ^{40}Ca است که اسپین-پاریتهٔ آن مسلماً به‌صورت 0^+ است. بنابراین حالت اولیه به‌صورت 4^- است. مقدار $\log ft$ متناظر به‌آن نیز برابر ۱۸٫۱ است که بر فرایند ممنوع سوم دلالت می‌کند.

از طرف دیگر، باید مواظب باشیم تا برقواعد تجربی که نه بر نظریه بلکه برمبنای مطالعهٔ موارد عملی استوار شده‌اند، بیش از حد تکیه نکنیم. در واپاشی ^{176}Lu (شکل ۲۷.۹) مقدار $\log ft$ برابر ۱۹٫۱ به‌دست می‌آید، درحالی‌که از مقدار اسپین-پاریتهٔ شناخته‌شده انتظار داریم که واپاشی ازنوع ممنوع اول باشد (که مقدار $\log ft$ آن معمولا درگسترهٔ ۸تا۱۲ قرار می‌گیرد). یادآوری این نکته مفید است که $\log ft$ برابر ۱۹ به‌معنی کندشدن واپاشی یا جلوگیری‌از واپاشی باضریب 10^7 نسبت به $\log ft = 12$ است. این تأثیر فوق‌العاده در واپاشی ^{176}Lu ناشی از تطابق استثنائاً بسیار ضعیف تابع‌موجهای حالتهای اولیه و نهایی است.

واپاشی‌هسته‌های ^{72}Zn موردی است که در آن‌دو گروه مختلف β در واپاشی‌شرکت دارند (شکل ۲۸.۹). گروه ضعیفتر را فقط می‌توان از طریق اندازه‌گیریهای همفرودی



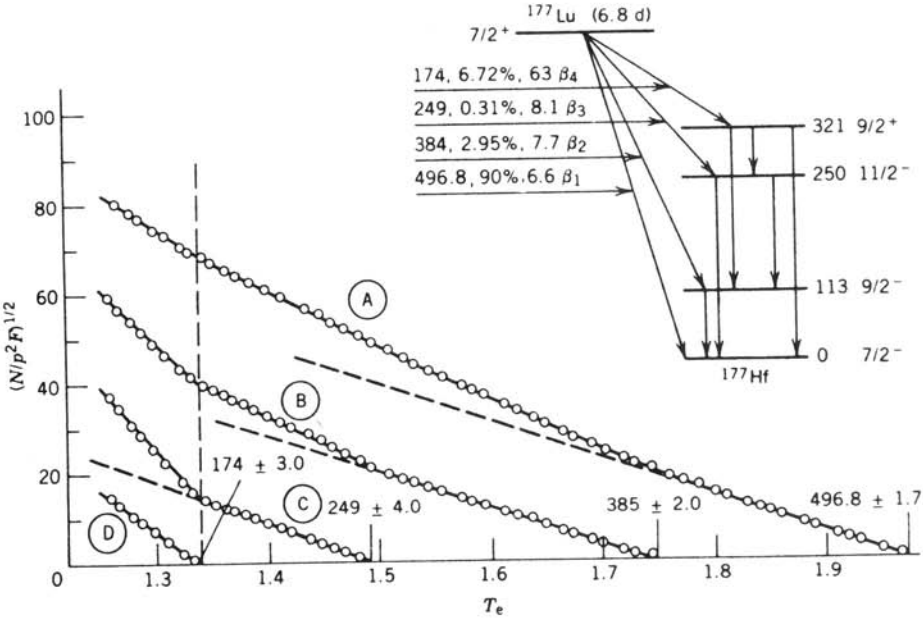
شکل ۲۷.۹ واپاشی بتازای ^{176}Lu، انرژی ترازها برحسب keV داده شده است.



شکل ۲۸.۹ واپاشی بتازای ^{72}Zn. دراین مورد، دو گروه واپاشی وجود دارد ولی نمی‌توان با استفاده از جداسازی به‌طور مطمئنی مؤلفهٔ کم‌انرژی بسیار ضعیفتر را پیدا کرد. نمودارهای فرمی ـ کوری برای ذرات بتا درحالت همفرودی با پرتوهای گامای باانرژی **۱۹۲ keV** (شکل پایینی) و**۱۴۵ keV** (شکل بالایی) درسمت چپ نشان‌داده‌شده‌اند. همفرودیها جداسازی‌بدون ابهام‌در گروه واپاشی، تعیین‌نقاط پایانی، و اثبات‌خطی‌بودن‌نمودارهای فرمی‌ـ کوری‌را امکان‌پذیر می‌کنند.

β-γ مشاهده‌کرد. نمودارهای فرمی ـ کوری خطی و مقادیر کوچك $\log ft$ نمایانگر واپاشیهای مجاز است که با مقدار $^+1$ برای هردو حالت نهایی سازگار است.

یك مورد افراطی‌تر در واپاشی ^{177}Lu مشاهده می‌شود (شکل ۲۹.۹) که در آن بااندازه‌گیریهای دقیق می‌توان چهار گروه جداگانه به‌دست‌آورد. در روش ظاهر ساختن از بالاترین گروه آغاز می‌کنیم، وفرض می‌کنیم که نمودار فرمی ـ کوری این گروه خطی



شکل ۲۹.۹ نمودار فرمی-کوری واپاشی بتازای ^{177}Lu. منحنی A نمایندهٔ طیف کامل بتاست. با برون‌یابی قسمت پرانرژی (که از قرارمعلوم فقط شامل یك مـؤلفه است) منحنی خطچین به‌دست می‌آید. از تفاضل خط برون‌یابی شده ومنحنی A، منحنی B حاصل می‌شود. قسمت‌خطی B نقطهٔ پایان مـؤلفهٔ بعدی را به‌دست می‌دهد، وبا تکـرار این‌عمل منحنیهای C و D حاصل می‌شوند. نمودار واپاشی حاصل درطرف راست شکل نشان‌داده شده است.

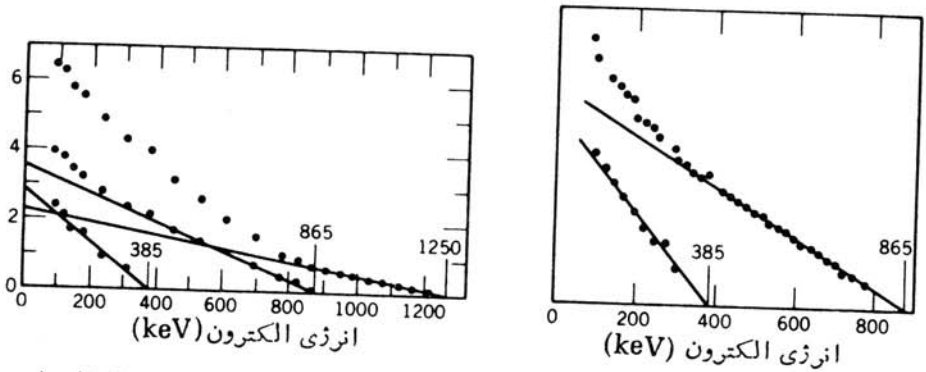
باشد. با بـرون‌یابی قسمت خطی پرانرژی و کم‌کردن آن، طیف باقیمانـدهٔ نقطهٔ پایانی ۳۸۵ keV را نشان می‌دهد، با تکرار همین‌عمل، دو مؤلفهٔ دیگر نیز به‌دست می‌آیند.

در اینجا مستقیماً نمی‌توانیم بگوییم که پرانرژیترین مؤلفه نمایندهٔ واپاشی به حالت پایهٔ ^{177}Hf است، ولی با محاسبهٔ مقدار Q برای واپاشی به‌حالت‌پایه می‌توان نشان‌داد که چنین وضعی برقـرار است. چون هستهٔ ^{177}Lu رادیواکتیو است، نمی‌تـوان جرم آن را مستقیماً اندازه‌گرفت، ولی می‌توان جرم آن‌را بااندازه‌گیری انرژی آزاد شده به هنگام جذب‌یك نوترون‌کم‌انرژی در ^{176}Lu پایدار و تشکیل ^{177}Lu تعیین‌کرد. چون مقدار این انرژی آزاد شده برابر ۷٫۰۷۲۶ ± ۰٫۰۰۰۶ MeV است، خواهیم داشت

$$m(^{177}\mathrm{Lu}) = m(^{176}\mathrm{Lu}) + m(\mathrm{n}) - ۷٫۰۷۲۶\ \mathrm{MeV}/c^{۲}$$

$$= ۱۷۶٫۹۴۳۷۶۶ \pm ۰٫۰۰۰۰۰۶\ \mathrm{u}$$

که درآن قدم نهایی با استفاده از جـرم معلوم ^{176}Lu برداشته شده است. بدین ترتیب، به‌دست می‌آید

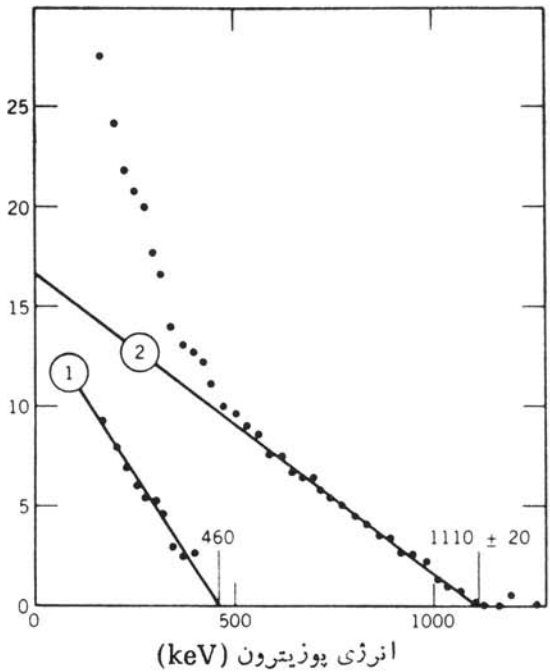


شکل ۳۰.۹ طیف الکترون حاصل از واپاشی بتازای ^{۱۲۶}I. طیف منفرد (سمت چپ) با استفاده از روش جداسازی، مانند شکل ۲۹.۹، به‌سه مؤلفه تبدیل می‌شود. طیف همفرودی با پرتو گاما (در سمت راست) پر انرژیترین مؤلفه را نشان نمی‌دهد؛ اگر این مؤلفه با هیچ گامایی همفرود نباشد باید گذار به‌حالت پایه شمرده شود.

$$Q_\beta = m(۱۷۷\,\mathrm{Lu}) - m(^{۱۷۷}\mathrm{Hf})$$
$$= ۴۹۶ \pm ۸\,\mathrm{keV}$$

که سازگاری بسیار خوبی با انرژی بالاترین گروه β دارد. بنابراین نتیجه می‌گیریم که این گروه به‌حالت پایهٔ ^{۱۷۷}Hf منجر می‌شود، و گروههای پایینتر به‌ترتیب به‌ترازهای بالاتر ۲۴۸keV (= ۴۹۷ − ۲۴۹)، ۱۱۲keV (= ۴۹۷ − ۳۸۵) و ۳۲۳keV (= ۴۹۷ − ۱۷۴) منتهی می‌شوند. همان‌طور که در بخش ۸.۱۰ خواهیم دید، نتایج حاصل از طیف گاما هم با این نتایج سازگار است. برای مثال، پرتو γ با انرژی ۱۱۳keV نمایندهٔ گذار از اولین حالت برانگیخته به‌حالت پایه است، و طیف β در همفرودی با پرتو گامای ۱۱۳keV فقط مؤلفهٔ ۳۸۵ keV را نشان می‌دهد.

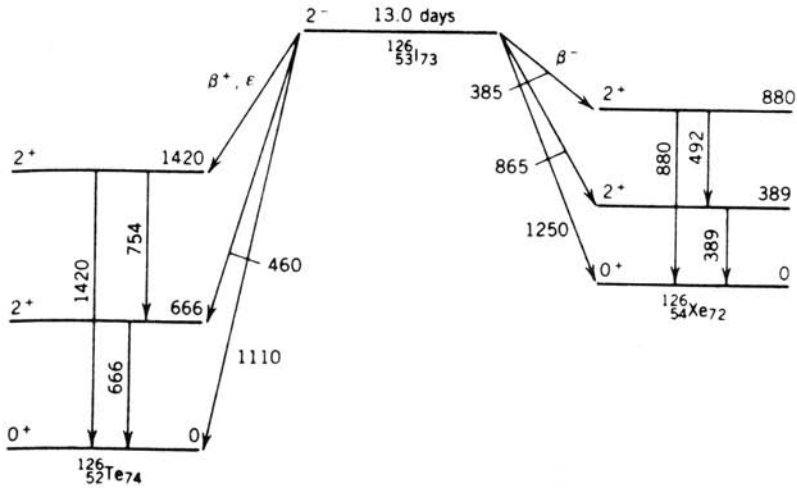
به‌عنوان آخرین مثال در مطالعهٔ طیف‌نمایی، واپاشی هسته‌های ^{۱۲۶}I را در نظر می‌گیریم که با گسیل بتای منفی یا مثبت صورت می‌گیرد. نمودار فرمی-کوری (شکل ۳۰.۹) در انتهای پر انرژی قطعاً غیر خطی است، ولی تصحیح این قسمت به‌کمك عامل شکل واپاشی ممنوع اول «$\Delta I = ۲$» و «آری $= \Delta\pi$»، آن را به‌صورت خطی در می‌آورد و عمل جداسازی به‌ظهور سه گروه مختلف منتهی می‌شود. در اینجا فقط دو گروه پایینتر با تابش γ همفرودی دارند، یعنی بالاترین گروه به‌تولید ^{۱۲۶}Xe در حالت پایه (^{+}o) منجر می‌شود و در نتیجه حالت واپاشنده باید به‌صورت $^{-}۲$ باشد (زیرا بالاترین گروه به‌صورت $\Delta I = ۲$ و «آری $= \Delta\pi$» است). سایر گروهها باید به‌حالات برانگیختهٔ ۳۸۵keV (= ۸۶۵ − ۱۲۵۰) و ۸۶۵ keV (= ۳۸۵ − ۱۲۵۰) منجر شوند. (تعویض‌پذیری اعداد تصادفی است.) همین‌طور طیف پوزیترون نیز (شکل ۳۱.۹) دو گروه را نشان می‌دهد که با همین استدلال به‌حالت پایه و اولین حالت برانگیختهٔ ^{۱۲۶}Te منجر می‌شوند. طیف γ گذارهایی قوی با



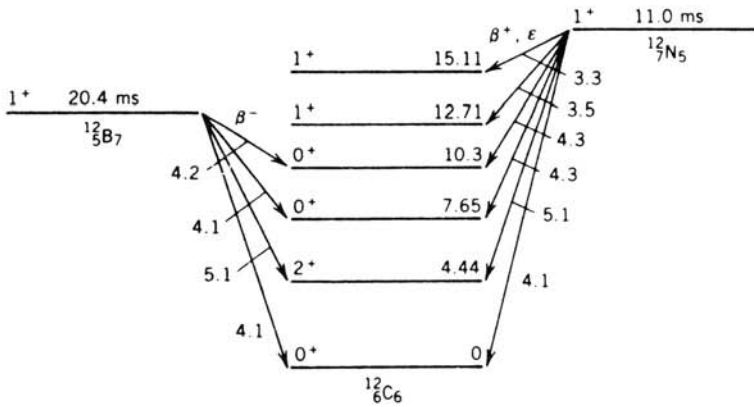
شکل ۳۱.۹ طیف پوزیترون حاصل از واپاشی بتازای I^{126}. عمل جداسازی وجود دومؤلفه‌را در طیف نشان می‌دهد.

انرژیهای ۳۸۹، ۴۹۲. ۶۶۶، ۷۵۴، ۸۸۰، و keV ۱۴۲۰ را نشان‌می‌دهد که می‌توان‌محل آنها را مطابق شکل ۳۲.۹ برمبنای نقاط پایانی بتای مشاهده شده، تعیین کرد. بـراساس مشابهت بین مقادیر $\log ft$ و گذارهای «تقاطعی» مشاهده شده به‌حالت پایه، اسپین-پاریتهٔ اولین حالات برانگیخته به‌صورت 2^+ و دومین حالات برانگیخته نیز 2^+ است.

محاسبهٔ اجزای ماتریس β با استفاده از تابع‌موجهای هسته‌ای، فرایندی مشکل است وبنابراین معمولا به‌مقایسهٔ نتایج تجربی حاصل‌از تعدادی واپاشیهای مشابه اکتفا می‌کنیم. برای مثال، واپاشیهای آینه‌ای B^{12} و N^{12} به C^{12} را درنظر بگیریـد (شکل ۳۳.۹). مقادیر ft به‌حالات برانگیختهٔ مختلف برای واپاشیهای بتازای مثبت ومنفی یکسان است. انتظار داریم که تابع‌موجهای اولیه و نهایی مربوط به‌گـذار هفتمین پروتـون به ششمین نوترون (برمبنای مدل‌پوسته‌ای) مشابه تابع‌موجهای‌گذار هفتمین نوترون به‌ششمین‌پروتون باشد. مقادیر ft با این انتظار سازگاری دارند. گذار پروتون به‌نوترون که نـوترون را درهمان حالت پوسته‌ای پروتون اولیه بـاقی می‌گذارد منجر به‌اشغال حالت بـرانگیختهٔ ۱۱٫۱۵MeV در C^{12} می‌شود. بنابراین، این‌حالت دارای همان‌تابع‌موج هسته‌ای حالت پایهٔ B^{12} و N^{12} است (بجز تفاوت میان پروتونها و نوترونها) و حالت مانستهٔ B^{12} و N^{12} شمرده می‌شود. مقدار مخصوصاً کوچك ft در واپاشی N^{12} به‌این حالت، بر تعبیر



شکل ۳۲.۹ نمودار واپاشی $I^{۱۲۶}$ که حاکی از اطلاعات مربوط به β و γ است. انرژی ذرات و ترازها برحسب keV است.



شکل ۳۳.۹ نمودار واپاشیهای بتازای $B^{۱۲}$ و $N^{۱۲}$ به $C^{۱۲}$. به‌همسانی مقادیر $\log ft$ برای واپاشیهای بتازای مثبت و منفی که به‌یك حالت نهایی در $C^{۱۲}$ منجر می‌شوند، توجه کنید.

حالت مانستگی آن تأکید می‌کند.

بالاخره، اطلاعاتی را بررسی می‌کنیم که از تابع‌موجهای هسته‌ای در واپاشی بتازا به‌دست می‌آیند. بویژه گذارهای بین نوترونها وپروتونهای فرد را در پوستهٔ $f_{۷/۲}$ بررسی می‌کنیم. (یعنی، موردی که در آن یك نوکلئون $f_{۷/۲}$ به‌نوکلئونی دیگر تبدیل می‌شود.) در اینجا مشخصاً موارد هسته‌های A فرد با تغییر اسپین $\Delta I = ۰$، واپاشیهای مجاز بین حالات با اسپین-پاریته $(۷/۲)^-$، را مطالعه می‌کنیم. ساده‌ترین نمونه، واپاشی $Sc^{۴۱}$ به $Ca^{۴۱}$ است که طی آن پروتون منفرد خارج از قلب جادویی دوگانهٔ $Ca^{۴۰}$ به‌یك نوترون منفرد تبدیل می‌شود. تغییری در تابع‌موج صورت نمی‌گیرد، و مقدار تجربی $\log ft$ در این واپاشی

۳٫۵ است که‌این‌واپاشی‌را در گروه ابرمجاز قرار می‌دهد. (این‌یك‌نمونه‌از واپاشی‌آینه‌ای است.) درمدل پوسته‌ای ذرهٔ خیلی مستقل، تمام ذرات فرد را معادل هم در نظر می گیریم و بنا براین‌انتظارداریم که‌واپاشی ^{47}Ca به ^{47}Sc [مجدداً از $(7/2)^-$ به $(7/2)^-$] مقدار $\log ft$ مشابهی داشته باشد. اما مقدار مشاهده شده برابر ۸٫۵ است، یعنی این واپاشی 10^5 بار کندتر صورت می گیرد! بنابراین گذار بیست‌و هفتمین نوترون به بیست‌ویکمین پروتون فرایندی پیچیده‌تر است، وشش نوترون دیگر هم درپوستهٔ $f_{7/2}$ باید تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در واپاشی‌داشته باشند. (بعضی جنبه‌های‌عمومی این‌حالات بس ذره‌ای در بخش ۳.۵مورد بحث قرار گرفت.) اطلاعات تجربی مربوط به واپاشیهای بتازای $(7/2)^-$ به $(7/2)^-$ هسته‌های‌باپوستهٔ $f_{7/2}$ $(20 \leqslant N, Z \leqslant 28)$ درجدول ۴.۹ خلاصه‌شده‌است. چنانکه مشاهده

جدول ۴.۹ واپاشیهای بتازا درپوستهٔ $f_{7/2}$ $[(7/2)^- \rightarrow (7/2)^-]$.

$^{A}_{Z}X_N \rightarrow ^{A}_{Z'}X'_{N'}$	$\lvert Z-N'\rvert = \lvert N-Z'\rvert$	$\log ft$
$^{41}_{21}Sc_{20} \rightarrow ^{41}_{20}Ca_{21}$	۰	۳٫۵
$^{43}_{22}Ti_{21} \rightarrow ^{43}_{21}Sc_{22}$	۰	۳٫۵
$^{45}_{23}V_{22} \rightarrow ^{45}_{22}Ti_{23}$	۰	۳٫۶
$^{53}_{27}Co_{26} \rightarrow ^{53}_{26}Fe_{27}$	۰	۳٫۶
$^{43}_{21}Sc_{22} \rightarrow ^{43}_{20}Ca_{23}$	۲	۵٫۰
$^{45}_{22}Ti_{23} \rightarrow ^{45}_{21}Sc_{24}$	۲	۴٫۶
$^{53}_{26}Fe_{27} \rightarrow ^{53}_{25}Mn_{28}$	۲	۵٫۲
$^{45}_{20}Ca_{25} \rightarrow ^{45}_{21}Sc_{24}$	۴	۶٫۰
$^{47}_{21}Sc_{26} \rightarrow ^{47}_{22}Ti_{25}$	۴	۵٫۳
$^{49}_{23}V_{26} \rightarrow ^{49}_{22}Ti_{27}$	۴	۶٫۲
$^{51}_{24}Cr_{27} \rightarrow ^{51}_{23}V_{28}$	۴	۵٫۴
$^{47}_{20}Ca_{27} \rightarrow ^{47}_{21}Sc_{26}$	۶	۸٫۵
$^{49}_{21}Sc_{28} \rightarrow ^{49}_{22}Ti_{27}$	۶	۵٫۷

می‌شود، مقادیر $\log ft$ واپاشیهایی که در آن تغییر حالت ذرهٔ فرد ضروری نیست ($Z-N'=N-Z'=0$) در گروه ابرمجاز قرار دارند (در حدود ۳٫۵)؛ با افزایش مقدار $Z-N'$، تغییرحالت بزرگتر می‌شود ومقدار $\log ft$ افزایش می‌یابد؛ ومیزان این افزایش به‌طور متوسط درحدود یك واحد (ضریب ۱۰ در نیمه‌عمر) به‌ازای هر واحد از افزایش $Z-N'$ است.

مراجع مطالعات تکمیلی

مطالب «کلاسیکی» مربوط به‌واپاشی بتازا را می‌توان در مراجع زیر یافت

J.M.Blatt and V.F.Weisskopf, *Theoretical Nuclear Physics* (New York: Wiley, 1952),

R.D.Evans, *The Atomic Nucleus* (New York: McGraw-Hill, 1955),

I.Kaplan, *Nuclear Physics* (Reading, MA: Addison-Wesley, 1955).

مطالب جامعتر واپاشی بتازا، ازسطح مقدماتی تا عالی، را درمراجع زیرمی‌توانید مطالعه کنید

H.F.Schopper, *Weak Interactions and Nuclear Beta Decay* (Amsterdam: North-Holland, 1966).

C.S.Wu and S.A.Moszkowski, *Beta Decay* (New York: Wiley-Interscience, 1966),

E.J.Konopinski, *The Theory of Beta Decay* (Oxford: Oxford University Press, 1966),

M.Morita, *Beta Decay and Muon Capture* (Reading, MA:Benjamin, 1973).

دراثر مقدماتی زیر، تعدادی از مقالات کلاسیك واپاشی بتازا تجدید چاپ شده‌اند

C.Strachan, *The Theory of Beta Decay* (Oxford,: Pergamon, 1969).

موضوع طیف‌نمایی بتا درمرجع زیر توسط وو نوشته شده است.

Nuclear Spectroscopy, Part A, edited by F.Ajzenberg-Selove (New York: Academic, 1959).

اندازه‌گیریهای مربوط به‌شکل طیفهای بتا در مقالهٔ زیر مرور شده‌اند

H.Daniel, *Rev. Mod. Phys.* **40**, 659(1968).

خیلی از بحثهای تفصیلی واپاشی بتازا را می‌توان در فصلهای ۲۲ تا ۲۴ مرجع زیر یافت

Alpha-, Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy, edited by K.Siegbahn (Amsterdam: North-Holland,1965).

کتاب زیر یك اثر مقدماتی عمومی دربارهٔ فیزیك نوترینو است

G.M.Lewis, *Neutrinos* (London: Wykeham, 1970).
مرور مفیدی ازکارهای تجربی اولیه را می‌توان درکتاب زیر دید

J.S.Allen, *The Neutrino* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1958),
نوشته‌های راجع به‌نوترینو در مقالهٔ کتابشناسی زیر مرور شده‌اند.

L.M.Lederman, *Am. J.Phys.* 38, 129(1970),
برای بحثی دربارهٔ آزمایش نوترینوهای خورشیدی مقالهٔ زیر را بخوانید

John Bahcall, *Scientific American*, July (1969).
مقالات مربوط به‌گسیل نوکلئون تأخیری در واپاشی بتازا در مراجع زیر مرور شده‌اند

J. Cerny and J. C. Hardy, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* 27, 333 (1977),

J.C.Hardy, *Nuclear Spectroscopy and Reactions*, edited by J.Cerny (New-York: Academic, (1974).
کتاب زیر پیرامون پاریته ودرسطح عامه فهم نوشته شده است

Martin Gardner, *The Ambidextrous Universe* (New York: Scribner,1979).
واپاشی دو بتایی در مقالهٔ زیر مرور شده است

D.Bryman and C.Picciotto, *Rev. Mod. Phys.*50, 11(1978).

مسائل

۱. مقدار Q را برای واپاشیهای بتازای زیر محاسبه‌کنید: (الف) $^{۶۵}Cu \rightarrow {}^{۶۵}Ni$؛ (ب) $^{۱۱}B \rightarrow {}^{۱۱}Be$؛ $^{۱۹۳}Ir \rightarrow {}^{۱۹۳}Os$.

۲. مقدار Q را در واپاشیهای زیر که یا از نوع بتازایی مثبت و یا از نوع گیراندازی الکترون است محاسبه‌کنید: (الف) $^{۱۰}B \rightarrow {}^{۱۰}C$؛ (ب) $^{۱۵۲}Sm \rightarrow {}^{۱۵۲}Eu$؛ (ج) $^{۸۹}Y \rightarrow {}^{۸۹}Zr$.

۳. هستهٔ ^{۱۹۶}Au می‌تواند ازطرق بتازاییهای مثبت ومنفی و گیراندازی الکترون‌واپاشیده شود. مقدار Q را در هرسه مد واپاشی پیدا کنید.

۴. بیشینهٔ انرژی جنبشی طیف پوزیترون گسیل‌شده در واپاشی $^{۱۱}B \rightarrow {}^{۱۱}C$ برابر $۱٫۹۸۳ \pm ۰٫۰۰۳$ MeV است. بااستفاده از این داده و جرم ^{۱۱}B، جرم ^{۱۱}C را محاسبه کنید.

۵. در واپاشی ^{۶}He و تبدیل آن به ^{۶}Li، بیشینهٔ انرژی جنبشی β برابر $۳٫۵۱۰ \pm ۰٫۰۰۴$ MeV است. بااستفاده از جرم ^{۶}Li، جرم ^{۶}He را تعیین کنید.

۶. در واپاشی ^{۴۷}Ca وتبدیل آن به ^{۴۷}Sc، وقتی انرژی جنبشی الکترون برابر $۱٫۱۰۰$ MeV باشد انرژی نوترینو چقدر است؟

۷. واپاشی بتازای ^{191}Os فقط منجر به‌حالت برانگیختهٔ ^{191}Ir با انرژی ۱۷۱ keV می‌شود. بیشینهٔ انرژی جنبشی طیف β را محاسبه کنید.

۸. (الف) اگر انرژی واپاشی بتازا در مقایسه با $m_e c^2$ بزرگ باشد، شکل سادهٔ معادلهٔ (۲۵.۹) را پیدا کنید و نشان‌دهید که میانگین T_e (و نه مقداری از T_e که $N(T_e)$ به‌ازای آن بیشینه می‌شود) برابر $Q/2$ است. (ب) در مواردی که انرژیهای واپاشی بتازادرمقایسه با $m_e c^2$ کوچک‌هستند، نشان‌دهید که‌مقدار میانگین T_e برابر $Q/3$ است.

۹. جزء (یا اجزای) جاافتاده در فرایندهای زیر را پیدا کنید.

(الف) $\bar{\nu} + {}^3He \rightarrow$

(ب) ${}^6He \rightarrow {}^6Li + e^- +$

(ج) $e^- + {}^8B \rightarrow$

(د) $\nu + {}^{12}C \rightarrow$

(ه) ${}^{40}K \rightarrow \nu +$

(و) ${}^{40}K \rightarrow \bar{\nu} +$

۱۰. در واپاشی نوترون، انرژی جنبشی پروتون را (الف) وقتی که الکترون دارای انرژی جنبشی قابل‌چشمپوشی است؛ (ب) وقتی که نوترینو دارای انرژی قابل‌چشمپوشی است، محاسبه کنید.

۱۱. گیراندازی الکترون توسط ^7Be یکی ازمحتملترین فرایندهای تولید نوترینو در خورشید است. انرژی نوترینوی گسیل شده وانرژی جنبشی هستهٔ ^7Li را محاسبه کنید.

۱۲. با تعریف Q به‌صورت $(m_i - m_f)c^2$، گسترهٔ انرژی نوترینو در واکنش همجوشی خورشیدی $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$ را محاسبه کنید. انرژی جنبشی پروتونهای اولیه را نادیده بگیرید.

۱۳. (الف) برای واکنشهای گیراندازی نوترینو $\nu + {}^AX \rightarrow e^- + {}^AX'$ نشان‌دهید که مقدار Q، طبق تعریفی که در مورد واپاشیهای $Q = (m_i - m_f)c^2$ به‌کار می‌رود، از رابطهٔ $[m({}^AX) - m({}^AX')]\, c^2$ با استفاده از جرمهای اتمی به‌دست می‌آید. (ب) با چشمپوشی از انرژی جنبشی اندکی که به هستهٔ نهایی داده می‌شود (برای پایستگی تکانه)، این مقدار Q برابر کمینهٔ انرژی نوترینو برای ایجاد واکنش است. انرژی کمینهٔ نوترینو را برای گیراندازی توسط ^{37}Cl، ^{71}Ga، و ^{115}In محاسبه کنید. (ج) درآزمایش دیویس (بخش ۶.۹) برای آشکارسازی نوترینوهای ناشی ازهمجوشی خورشیدی از ^{37}Cl استفاده شده است؛ کاربرد ^{71}Ga و ^{115}In نیز به‌عنوان آشکارسازهای نوترینوی خورشیدی پیشنهاد شده است. کاربرد این آشکارسازها را برای مشاهدهٔ نوترینوهای حاصل از واکنش همجوشی پایه $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$ (مسئلهٔ ۱۲) و نوترینوی واپاشی ^7Be (مسئلهٔ ۱۱) موردبحث قرار دهید.

۱۴. واپاشیهای زیر را برحسب درجهٔ ممنوعیت طبقه‌بندی کنید:

(الف) ${}^{89}Sr\left(\frac{5}{2}^+\right) \rightarrow {}^{89}Y\left(\frac{1}{2}^-\right)$

(ب) $^{۳۶}Cl(۲^+) \rightarrow {}^{۳۶}Ar(۰^+)$

(ج) $^{۲۶}Al(۵^+) \rightarrow {}^{۲۶}Mg^*(۲^+)$

(د) $^{۲۶}Si(۰^+) \rightarrow {}^{۲۶}Al^*(۰^+) \rightarrow {}^{۲۶}Mg(۰^+)$

(ه) $^{۹۷}Zr\left(\frac{۱}{۲}^+\right) \rightarrow {}^{۹۷}Nb^*\left(\frac{۱}{۲}^-\right)$

۱۵. نشان‌دهید که شیب طیف انرژی الکترون در واپاشیهای مجاز در نزدیکی $T_e = Q$ برای $m_\nu = ۰$ برابر صفر، و برای $m_\nu \neq ۰$ برابر بینهایت است.

۱۶. واپاشی گیراندازی الکترون ممکن است در هریك از پوسته‌های اتمی K، L، و ... اتفاق بیفتد. برای گسترهٔ وسیعی از هسته‌ها احتمال گیراندازی L در حدود ۱۱٪ احتمال گیراندازی K است. این نسبت را با براوردی برمبنای احتمال حضور الکترون مداری در نزدیکی هسته توجیه کنید. دراین براورد تقریبی از اثر هرگونه استتار الکترونی چشمپوشی کنید.

۱۷. (الف) واپاشی بتازای منفی $۰^+ \rightarrow ۰^+$ را درنظر بگیرید. بااستفاده‌ازهلیسیتهٔ نوترینو و الکترون گسیل شده، معادلهٔ (۳۸.۹)، تعیین کنید که e^- و ν به‌طور موازی بایکدیگر گسیل می‌شوند یا پادموازی. (ب) این عمل‌را برای واپاشی $۱^+ \rightarrow ۰^+$ تکرار کنید. (ج) این نتایج چه تأثیری برهستهٔ پس‌زده دارند؟ (د) آیا این نتایج درمورد واپاشی بتازای مثبت هم صادق خواهند بود؟

۱۸. واپاشی ^{۲۰}Na به حالت برانگیختهٔ ^{۲۰}Ne با گسیل پوزیترون با بیشینهٔ انرژی ۵٫۵۵ MeV صورت می گیرد. این حالت برانگیخته با گسیل α با حالت پایهٔ ^{۱۶}O واپاشیده می‌شود. انرژی آلفای گسیل شده را محاسبه کنید.

۱۹. پس از واپاشی ^{۱۷}Ne، واپاشی یك‌حالت بسیار برانگیختهٔ ^{۱۷}F منجر به گسیل پروتونی با انرژی ۱۰٫۵۹۷ MeV و رسیدن به‌حالت پایهٔ ^{۱۶}O می‌شود. بیشینهٔ انرژی پوزیترونهای گسیل شده در واپاشی به‌حالت برانگیختهٔ ^{۱۷}F چقدر است؟

۲۰. یك فرایند واپاشی بتازای منفی شامل سه‌مؤلفه با انرژیهای ۰٫۶۷۲، ۰٫۵۳۶، و ۰٫۲۵۶ MeV است. اولین‌مؤلفه دارای دو پرتو گامای همفرود با انرژیهای ۰٫۴۶۸ و ۰٫۳۱۶ MeV است که با یکدیگر نیز همفرودند. دومین مؤلفه دارای گاماهای همفرودی با انرژیهای ۰٫۶۰۴، ۰٫۳۰۸، ۰٫۱۳۶، ۰٫۴۶۸، ۰٫۶۱۲، ۰٫۲۹۶ و ۰٫۳۱۶ MeV است. سومین مؤلفه‌با کلیهٔ گاماهای فوق‌به‌اضافهٔ ۰٫۸۸۵، ۰٫۵۸۹، ۰٫۴۱۶، و ۰٫۲۸۰ MeV همفرود است. بااستفاده‌ازاطلاعات فوق، نمودار واپاشی را رسم واختلاف جرم بین حالات پایهٔ هسته‌ها را پیدا کنید.

۲۱. واپاشی ^{۱۹۸}Au به ^{۱۹۸}Pt از طریق گیراندازی الکترون مشاهده نشده است، اگرچه واپاشی مشابه ^{۱۹۶}Au به ^{۱۹۶}Pt باگیراندازی الکترون به شدت انجام می‌شود. ویژگیهای طیف‌نمایی این دو واپاشی را بررسی و علت مشاهده نشدن واپاشی گیراندازی الکترون را در ^{۱۹۸}Au بیان کنید. (از جدول ایزوتوپها یا مرجع طیف‌نمایی مشابه استفاده کنید.)

۲۲. با استفاده از اطلاعات طیف‌نمایی هسته‌ای، مقادیر ft را در واپاشیهای مجاز $(1/2)^+ \rightarrow (3/2)^+$ برای هسته‌های با عدد نوترونی یا پروتونی ۱۴ تا ۲۰ (پوسته‌های $d_{3/2}$ و $s_{1/2}$) تعیین و جدولبندی کنید. همچنین واپاشیهای مجاز $(3/2)^-$ به $(1/2)^-$ برای هسته‌های با عدد نوترونی یا پروتونی ۲ تا ۸ (پوسته‌های $p_{1/2}$ و $p_{3/2}$) را جدولبندی کنید. هرگونه تفاوت سیستماتیك بین این دو مجموعه را مورد بحث قرار دهید.

۲۳. با استفاده از مجموعهٔ اطلاعات هسته‌ای (مانند جدول ایزوتوپها)، اطلاعات موجود در مورد گذارهای بتایی $0^+ \rightarrow 0^+$ بین پوسته‌های $f_{7/2}$ را در هسته‌های $(20 \leqslant Z, N \leqslant 28)$ جدولبندی کنید. درمورد جفت‌شدگی پروتون فرد و نوترون‌فرد بحث کنید، ومقادیر ft مشاهده شده را توجیه کنید.

۲۴. اطلاعات موجود در مورد واپاشیهای پوزیترون‌زای $g_{9/2} \rightarrow g_{7/2}$ را برای هسته‌های با عدد جرمی فرد جدولبندی کنید؛ پروتونهای $g_{9/2}$ معمولا در گسترهٔ $40 \leqslant Z \leqslant 50$ و نوترونهای $g_{7/2}$ بین $N = 50$ و $N = 66$ یافت می‌شوند. سعی کنید که برای مقادیر ft دلایل توجیهی بیاورید (توجه: واپاشی GT را گاهی فرایند «تلنگر اسپین» می‌گویند).

۲۵. هسته‌های بتاگسیل بسیاری با Z فرد و N فرد و اسپین - پاریتهٔ 2^- وجود دارند. این هسته‌ها می‌توانند به‌حالت پایهٔ 0^+ یا اولین حالت برانگیختهٔ 2^+ در هسته‌های مجاور Z زوج، N زوج واپاشیده شوند. (الف) با استفاده از مرجع طیف‌نمایی هسته‌ای مناسب (مثل جدول ایزوتوپها)، مقادیر ft برای حالات نهایی 2^+ و 0^+ این فرایندهای واپاشی را تاحدامکان جدولبندی کنید. (ب) واپاشی $2^- \rightarrow 0^+$ یك فرایند ممنوع اول است که در آن واپاشی‌بتازای منفی باید دو واحد از تکانهٔ‌زاویه‌ای کل را منتقل کند، درحالی که واپاشی $2^- \rightarrow 2^+$ می‌تواند حامل ۰، ۱، یا ۲ واحد تکانهٔ‌زاویه‌ای باشد. بااستفاده‌ازاطلاعات به‌دست آمده درمورد مقادیر ft، به‌طور کلی در مورد احتمال نسبی اینکه واپاشی بتازا حامل دو واحد تکانهٔ زاویه‌ای باشد، چه نتایجی‌حاصل می‌شود؟ (ج) برای بررسی امکان توجیه این اثر برحسب تابع‌موجهای هسته‌ای 0^+ و 2^+، جدول‌مشابهی‌از واپاشیهای حالات 1^-، یعنی‌واپاشیهای $0^+ \rightarrow 1^-$ و $2^+ \rightarrow 1^-$، تهیه کنید. در این مورد، هردو واپاشی ممنوع حامل یك واحد تکانهٔ زاویه‌ای است. (چرا؟) آیا تفاوت سیستماتیکی درمقادیر ft مربوط به‌حالات‌نهایی 0^+ و 2^+ مشاهده می‌کنید؟ در مورد اثر محتمل تابع موج نهایی در واپاشیهای بتازا ازحالات اولیهٔ 2^- چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

۲۶. چند مورد از واپاشیهای بتازای مجاز با مقادیر بزرگتر از حد میانگین ft وجود دارند که می‌توان آنها را با توجه به‌ساختار هسته‌ای توضیح‌داد. برای نمونه، موارد زیررادرنظربگیرید: (الف) $^{65}Ni \rightarrow {}^{65}Cu$ و $^{65}Zn \rightarrow {}^{65}Cu$ که‌در آنهاواپاشیهای حالت پایه به‌حالت پایه در هردو از نوع گاموف - تلر $(5/2)^-$ به $(3/2)^-$ است،

ولی‌مقدار ft یك تا دو مرتبهٔ بزرگی بیش از مقادیر واپاشیهای مجاز به‌سایرحالات کم‌انرژی‌است. (ب) $^{115}Sb \rightarrow {}^{115}Te$ و $^{115}Te \rightarrow {}^{115}Sn^{*}$؛ در واپاشی ^{115}Te گذار $(5/2)^{+} \rightarrow (7/2)^{+}$ به حالت پایهٔ ^{115}Sb مشاهده نمی‌شود، و در واپاشی ^{115}Sb یك‌حالت برانگیختهٔ کم‌انرژی فقط به‌طورضعیف، بامقدار ft که مجدداً یك تا دو مرتبهٔ بزرگی بیش از مقدار مربوط به‌حالات برانگیختهٔ مجاور است، اشغال می‌شود. خصوصیات مدل پوسته‌ای این‌حالات را پیدا کنید و توضیح دهید که چرا از واپاشی مجاز ممانعت می‌شود. برای پیداکردن سایر واپاشیهای منع‌شده با همان مشخصات مدل پوسته‌ای، از جدول ایزوتوپها استفاده کنید.

۱۰

واپاشی گاما ز ا

بیشتر واپاشیهای آلفا ز ا و بتا ز ا، ودرحقیقت بیشتر واکنشهای هسته‌ای، هستهٔ نهایی را در حالت برانگیخته باقی می گذارند. این حالات برانگیخته با گسیل یکی دو پرتو γ که همان فوتونهای تابش الکترومغناطیسی مانند پرتوهای x یا نور مرئی هستند به سرعت به‌حالت پایه واپاشیده می‌شوند. پرتوهای گاما نوعاً دارای انرژیهای در گسترهٔ ۰٫۱ تا ۱۰ MeV هستند که مشخصهٔ اختلاف انرژی بین‌حالات هسته‌ای است ودرنتیجه طول‌موج آنها بین 10^{4} تا ۱۰۰ fm است. این طول‌موجها از سایر انواع تابش الکترومغناطیسی که با آن سروکار داریم بسیار کوتاهتر است؛ برای مثال، نورمرئی طول موجی 10^{6} باربلندتر از پرتوهای γ دارد.

جزئیات وغنای اطلاعات ما در مورد طیف‌نمایی هسته‌ای به دانش ما از حالات برانگیخته وابسته‌است، وبنابراین‌مطالعهٔ گسیل‌پرتو γ به‌صورت روش‌استاندارد طیف‌نمایی هسته‌ای درآمده است. سایر عواملی که موجب محبوبیت وسودمندی این روش شده‌اند، شامل سهولت نسبی مشاهدهٔ پرتوهای γ (مثلا جذب وپراکندگی ناچیز درهوا که برخلاف تابشهای α و β است) ودقت‌اندازه‌گیری‌انرژی (ودرنتیجه دقت‌استنتاج حالات برانگیخته) است. به‌علاوه، مطالعهٔ گسیل γ وفرایند رقیب‌آن یعنی تبدیل داخلی، تعیین اسپین وپاریتهٔ حالات برانگیخته را امکان‌پذیر می‌سازد.

۱.۱۰ انرژی واپاشی گامازا

واپاشی یك هستهٔ ساکن به‌جرم M را از حالت‌اولیه E_i به‌حالت‌نهایی E_f درنظرمی‌گیریم. برای پایستگی تکانه، هستهٔ نهایی باید دارای تکانهٔ پس‌زنی p_R و انرژی پس‌زنی T_R باشد، که آن‌را به‌صورت نانسبیتی درنظر می‌گیریم ($T_R = p_R^2/2M$). باتوجه به‌پایستگی انرژی وتکانه داریم

$$E_i = E_f + E_\gamma + T_R$$
$$0 = \mathbf{p}_\gamma + \mathbf{p}_R \qquad (1.10)$$

که از آن به‌دست‌می‌آید $p_R = p_\gamma$؛ یعنی‌هسته با تکانه‌ای برابر با تکانهٔ پرتو γ و در جهت مخالف آن پس‌زده‌می‌شود. با تعریف $\Delta E = E_i - E_f$ واستفاده‌از رابطهٔ‌نسبیتی $E_\gamma = cp_\gamma$، خواهیم داشت

$$\Delta E = F_\gamma + \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2} \qquad (2.10)$$

که جوابی به‌صورت زیر دارد

$$E_\gamma = Mc^2\left[-1 \pm \left(1 + 2\frac{\Delta E}{Mc^2}\right)^{1/2}\right] \qquad (3.10)$$

اختلاف انرژیهای ΔE نوعاً از مرتبهٔ MeV است، درحالی که انرژیهای سکون Mc^2 در حدود $A \times 10^3$ MeV هستند، که درآن A عدد جرمی است. بنابراین $\Delta E \ll Mc^2$ و با دقت مرتبهٔ 10^{-4} تا 10^{-5}، با استفاده از سه‌جملهٔ اول بسط ریشهٔ دوم، داریم

$$E_\gamma \cong \Delta E - \frac{(\Delta E)^2}{2Mc^2} \qquad (4.10)$$

که با تقریب $\Delta E \cong E_\gamma$ از معادلهٔ (۲.۱۰) نیز مستقیماً به دست می‌آید.

بنابراین انرژی‌واقعی‌پرتو γ تااندازه‌ای کمتر از بیشینهٔ انرژی قابل‌دسترسی‌در واپاشی، ΔE، است. تصحیح پس‌زنی برای انرژی معمولا ناچیز و درحدود 10^{-5} است که بسیار کوچکتر از خطای تجربی دراندازه‌گیری انرژی است. در یك‌مورد انرژی پس‌زنی‌نقش مهمی را داراست. این موردکه به‌نام اثـر موسباؤر معروف است، در بخش ۹.۱۰ بحث شده است. بجز این‌مورد، در بقیهٔ این‌فصل فرض می‌کنیم که $E_\gamma = \Delta E$ است.

برای پرتوهای γ کم‌انرژی، انرژی پس‌زنی کمتر از ۱ eV است و اثر ناچیزی دارد. انرژی پس‌زنی پرتوهای γ پرانرژی (مانند تابشهای ۵ تا ۱۰ MeV کـه پس از گیراندازی نوترون گسیل می‌شوند) در گسترهٔ ۱۰۰ eV است که ممکن است برای خارج

کردن اتم پس‌زننده از شبکهٔ جسم جامد کافی باشد. اثراتی از این‌نوع را آسیب تابش می‌نامند که در مطالعهٔ جامدات جای مهمی دارد.

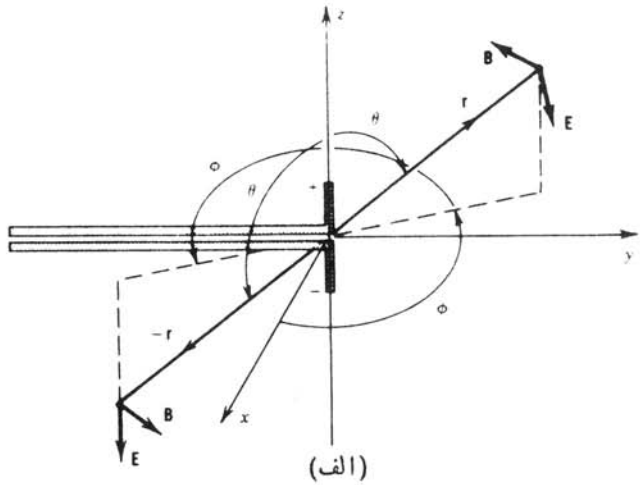
۲.۱۰ تابش الکترومغناطیسی کلاسیک

همچنانکه از مطالعهٔ فیزیك نوین به‌خاطر داریم، تابش الکترومغناطیسی را می‌توان به‌صورت یك پدیدهٔ موجی کلاسیك یا پدیده‌ای کوانتومی درنظر گرفت. نوع برخورد با مسئله به‌اثر فیزیکی مورد نظر بستگی دارد. برای تحلیل تابشهای حاصل از اتمها وهسته‌های منفرد، توصیف کوانتومی مناسبتر است ولی با مرور توصیف کلاسیك بهتر می‌توان محاسبات کوانتومی تابش الکترومغناطیسی را درك کرد.

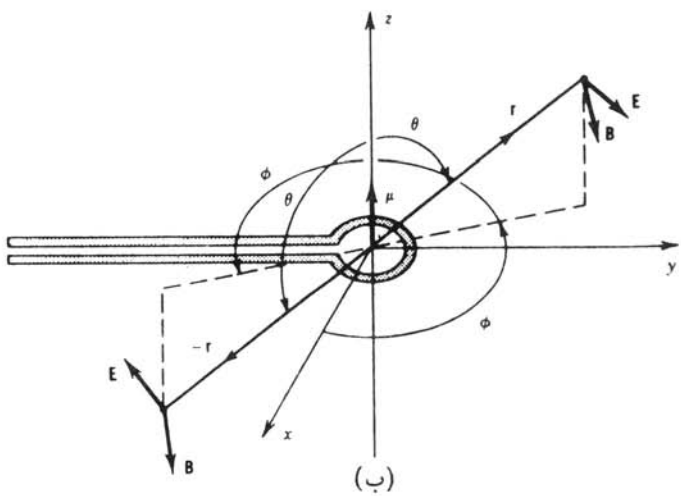
توزیعهای ایستای (یعنی ثابت درطول زمان) بار و جریان، میدانهای الکتریکی و مغناطیسی ایستا به‌وجود می‌آورند. در بخش ۵.۳ چگونگی تحلیل این میدانها را برحسب گشتاورهای چندقطبی توزیع بار مانند گشتاور دوقطبی، گشتاور چارقطبی، و غیره مورد بحث قرار دادیم. این گشتاورهای چندقطبی میدانهای مشخصه‌ای را به وجود می‌آورند، و به آسانی می‌توانیم میدان دوقطبی و چارقطبی و غیره را مطالعه کنیم.

اگر توزیعهای بار وجریان با زمان تغییر کنند، به‌خصوص اگر تغییرات سینوسی و با بسامد دایره‌ای ω باشد، یك میدان تابش تولید می‌شود. میدان تابش را (در فاصله‌ای که در مقایسه با ابعاد چشمه بزرگ است) می‌توان مانند میدان ایستا، برطبق سرشت چندقطبی آن، تحلیل کرد. به عنوان مثال، پایینترین مرتبهٔ چند قطبی، یعنی‌میدان دوقطبی را درنظر می‌گیریم.

یك دوقطبی الکتریکی ایستا از بارهای مساوی و مخالف $+q$ و $-q$ تشکیل شده است که فاصلهٔ آنها مقدار ثابت z است؛ در این صورت گشتاور دوقطبی الکتریکی برابر $d=qz$ می‌شود. یك دوقطبی مغناطیسی ایستا را می‌توان با یك حلقهٔ دایره‌ای جریان i نشان‌داد که سطح A را دربر می‌گیرد؛ گشتاور این‌دوقطبی مغناطیسی برابر $\mu=iA$ است. می‌توان میدانهای تابش الکترومغناطیسی را با تغییر گشتاورهای دوقطبی تولید کرد. برای مثال، اگر بارها در امتداد محور z نوسان کنند، به‌طوری که $d(t)=qz\cos\omega t$ باشد، یك میدان‌تابش دوقطبی الکتریکی‌ایجاد می‌شود. همین‌طور می‌توانیم جریان را تغییردهیم و درنتیجه به‌دست آوریم $\mu(t)=iA\cos\omega t$. شکل ۱.۱۰ میدانهای تابش ایجاد شده در این‌دو مورد را نشان می‌دهد. دوقطبی الکتریکی‌متناوب شکل ۱.۱۰ (الف) را می‌توان یك عنصر جریان خطی در نظر گرفت که برای آن خطوط میدان مغناطیسی دایره‌های متحدالمرکزی به‌محور z هستند. بردار میدان مغناطیسی $\mathbf{B}$ براین دایره‌ها مماس است، و جهت میدان الکتریکی را باید چنان درنظر گرفت که $\mathbf{E}\times\mathbf{B}$ درجهت انتشار تابش باشد. خطوط میدان مغناطیسی دوقطبی مغناطیسی شکل ۱.۱۰(ب) به صورتی هستند که اغلب می‌توان آنها را به‌یك آهنربای میله‌ای نسبت‌داد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰۱۰ میدانهای الکتریکی ومغناطیسی حاصل از (الف) یك دوقطبی الکتریکی و (ب) یك دوقطبی مغناطیسی. درهرمورد گشتاور دوقطبی درامتداد محور z است. بردارها، میدانهای تابش $\mathbf{E}$ و $\mathbf{B}$ را درلحظهٔ خاصی از زمان نشان می‌دهند. سیمهای درامتداد منفی محور y را باید متصل به‌یك منبع جریان بسامد ω درنظر گرفت که برای جلوگیری از دخالت آنها در تابش باید پیچ خورده باشند. رفتار $\mathbf{E}$ و $\mathbf{B}$ تحت انعکاس فضایی $\mathbf{r} \to -\mathbf{r}$ نیز نشان داده شده است. به‌تفاوت دومورد توجه کنید.

ما دراینجا سه مشخصهٔ مهم میدان تابش دوقطبی را درنظر می‌گیریم.

۱. توان تابیده به‌یك جزء سطح کوچك درجهت زاویهٔ θ نسبت به‌محور z به‌صورت $\sin^2\theta$

تغییر می‌کند. توان متوسط تابیده را می‌توان برمبنای نظریهٔ موجی یانظریهٔ کوانتومی محاسبه کرد، و باتوجه به‌اصل همخوانی، هنگامی‌که نتیجهٔ کوانتومی به‌حد کلاسیك گسترش‌می‌یابد، این‌دو محاسبه باید باهم توافق‌داشته باشند. پس این وابستگی مشخصهٔ $\sin^2\theta$ برای تابش دوقطبی باید در محاسبهٔ کوانتومی نیز وجود داشته باشد. تابش ناشی از چندقطبیهای مراتب بالاتر، مانند تابش چارقطبی، توزیع زاویه‌ای متفاوتی دارد. در حقیقت، چنانکه خواهیم‌دید، اندازه‌گیری توزیع‌زاویه‌ای تابش روش‌مناسبی برای تعیین نوع چند قطبیهای موجود در تابش است.

۲. میدانهای دوقطبی الکتریکی ومغناطیسی‌دارای پاریتهٔ مخالف‌هستند. اثر تبدیل $\mathbf{r}\to-\mathbf{r}$ را در نظر بگیرید. روشن است که میدان مغناطیسی دو قطبی الکتریکی تغییر علامت می‌دهد؛ بنابراین داریم $\mathbf{B}(\mathbf{r})=-\mathbf{B}(-\mathbf{r})$. ازطرف‌دیگر، برای دوقطبی مغناطیسی تغییرعلامتی صورت‌نمی‌گیرد، بنابراین‌داریم $\mathbf{B}(\mathbf{r})=\mathbf{B}(-\mathbf{r})$. بدین‌سان، دوقطبیهای الکتریکی و مغناطیسی‌که توزیع زاویه‌ای مشابهی دارند ازنظر پاریتهٔ میدانهای تابش با هم متفاوت‌اند. تابش دوقطبی الکتریکی دارای پاریتهٔ فرد است، در حالی‌که تابش دوقطبی مغناطیسی پاریتهٔ زوج دارد.

۳. متوسط توان تابیده (انرژی گسیل شده در واحد زمان) برای دوقطبیهای الکتریکی برابر است با

$$P=\frac{1}{12\pi\varepsilon_0}\frac{\omega^4}{c^3}d^2 \qquad (5.10)$$

برای دوقطبیهای مغناطیسی

$$P=\frac{1}{12\pi\varepsilon_0}\frac{\omega^4}{c^5}\mu^2 \qquad (6.10)$$

دراینجا d و μ دامنه‌های گشتاورهای دوقطبی وابسته به‌زمان هستند.

بدون ورود در جزئیات نظریهٔ الکترومغناطیس، می‌توانیم این خصوصیات تابش دوقطبی را به تابش چند قطبی تعمیم دهیم. ابتدا شاخص L تابش را به‌گونه‌ای تعریف می‌کنیم که 2^L مرتبهٔ چندقطبی باشد (برای دوقطبی $L=1$، برای چارقطبی $L=2$ و غیره). با تخصیص E برای خواص الکتریکی و M برای خواص مغناطیسی، می‌توانیم سه خصوصیت فوق را که برای تابش دوقطبی به دست آوردیم برای موارد چند قطبی نیز تعمیم دهیم.

۱. توزیع‌زاویه‌ای‌تابش 2^L قطبی، نسبت به‌یك‌جهت انتخابی‌مناسب، به‌صورت چندجمله‌ای لژاندر $P_{2L}(\cos\theta)$ است. متداولترین موارد عبارت‌اند از دوقطبی که برای آن $P_2=(1/2)(3\cos^2\theta-1)$، و چارقطبی که برای آن

$$P_4=\frac{1}{8}(35\cos^4\theta-30\cos^2\theta+3)$$

۲. پاریتهٔ میدان تابش به‌صورت زیر است

$$\pi(ML)=(-1)^{L+1}$$
$$\pi(EL)=(-1)^{L} \qquad (7.10)$$

توجه کنید که چندقطبیهای الکتریکی ومغناطیسی هم‌مرتبه، همواره دارای پاریتهٔ مخالف هستند.

۳. توان تابیده، با نمایش $\sigma=E$ یا $\sigma=M$ به‌عنوان تابش الکتریکی یا مغناطیسی، عبارت است از

$$P(\sigma L)=\frac{2(L+1)c}{\varepsilon_0 L[(2L+1)!!]^2}\left(\frac{\omega}{c}\right)^{2L+2}[m(\sigma L)]^2 \qquad (8.10)$$

که در آن $m(\sigma L)$ دامنهٔ گشتاور چندقطبی الکتریکی یا مغناطیسی وابسته به زمان، و فاکتوریل دوگانه نشاندهندهٔ $(2L+1)(2L-1)\cdots 3\times 1$ است. گشتاور چندقطبی تعمیم‌یافته $m(\sigma L)$ برای $L=1$ نسبت به گشتاور دوقطبی الکتریکی d و گشتاور دوقطبی مغناطیسی μ، درحد عوامل عددی نسبتاً بی‌اهمیتی که از مرتبهٔ واحدند، تفاوت دارد. ازاین‌پس، در بحث مربوط به تابش γ فقط با گشتاورهای تعمیم‌یافته سروکار خواهیم داشت.

۳.۱۰ محاسبهٔ مکانیک کوانتومی

برای تبدیل نظریهٔ کلاسیک به‌نظریهٔ کوانتومی، فقط باید چشمه‌های میدان تابش یعنی گشتاورهای چندقطبی کلاسیک را کوانتومی کرد. درمعادلهٔ (۸.۱۰)، به‌جای گشتاورهای چندقطبی باید عملگرهای چندقطبی مناسبی را قرار داد که هسته را از حالت ابتدایی ψ_i به‌حالت نهایی ψ_f ببرند. همان‌طور که درموردتابش α و β بحث کردیم، احتمال‌واپاشی از جزء ماتریس مربوط به عملگر چندقطبی به دست می‌آید

$$m_{fi}(\sigma L)=\int\psi_f^* m(\sigma L)\psi_i dv \qquad (9.10)$$

انتگرال‌گیری روی حجم هسته انجام می‌شود. درمورد شکل عملگر $m(\sigma L)$ بحث نخواهیم کرد، جزاینکه عملکرد آن حالت هسته را از ψ_i به ψ_f تغییر می‌دهد و به‌طور همزمان فوتونی متناسب با انرژی، پاریته، و مرتبهٔ چند قطبی خلق می‌کند.

اگر معادلهٔ (۸.۱۰) را انرژی تابیده در واحد زمان توسط فوتونهایی در نظر بگیریم که هریک دارای انرژی $\hbar\omega$ هستند، احتمال گسیل فوتون در واحد زمان (یعنی ثابت واپاشی) برابر است با

$$\lambda(\sigma L)=\frac{P(\sigma L)}{\hbar\omega}=\frac{2(L+1)}{\varepsilon_0\hbar L[(2L+1)!!]^2}\left(\frac{\omega}{c}\right)^{2L+1}[m_{fi}(\sigma L)]^2 \qquad (10.10)$$

این تعریف ثابت واپاشی را نمی‌توانیم بدون تعیین جزء ماتریس $m_{fi}(\sigma L)$ که مستلزم شناخت تابع‌موجهای حالت ابتدایی و نهایی است، پیشتر ببریم. می‌توانیم با فرض اینکه گذار به‌علت یك تك فوتون است که هسته را از یك‌حالت مدل پوسته‌ای به‌حالت دیگری می‌برد، محاسبات را ساده‌کنیم و در نتیجه براوردی از احتمال‌گسیل γ به‌دست دهیم. در مورد گذارهای الکتریکی، عملگر چندقطبی شامل جمله‌ای به‌صورت $er^L Y_{LM}(\theta,\varphi)$ است که همان‌طور که انتظار می‌رود برای تابش $L=1$ (دوقطبی) به‌صورت ez، و برای تابش $L=2$ (چارقطبی) مشابه محاسبهٔ گشتاورهای چارقطبی ایستا درمعادلهٔ (۳۶.۳) به‌صورت $e(3z^2-r^2)$ درمی‌آید. اگر قسمتهای شعاعی تابع‌موجهای هسته‌ای ψ_i و ψ_f را تا شعاع هسته R ثابت و برای $r>R$ صفر درنظر بگیریم، قسمت شعاعی احتمال گذار به‌صورت زیر است

$$\int_0^R r^2 r^L dr \Big/ \int_0^R r^2 dr = \frac{3}{L+3} R^L \qquad (۱۱.۱۰)$$

که درآن از انتگرال مخرج برای بهنجارش استفاده می‌شود وعامل r^2 ناشی از جزء حجم است. بادرنظر گرفتن این عامل درجزء ماتریس و جایگزین‌کردن انتگرالهای زاویه‌ای با واحد که براوردی معقول است، احتمال گذار EL به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$\lambda(EL) \cong \frac{8\pi(L+2)}{L[(2L+1)!!]^2} \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar c} \left(\frac{E}{\hbar c}\right)^{2L+1} \left(\frac{3}{L+3}\right)^2 c R^{2L} \qquad (۱۲.۱۰)$$

با قراردادن $R=R_0 A^{1/3}$ برای چندقطبیهای مراتب پایین می‌توان براوردهای زیر را به‌دست آورد

$$\begin{aligned}
\lambda(E1) &= 1.0 \times 10^{14} A^{2/3} E^3 \\
\lambda(E2) &= 7.3 \times 10^{7} A^{4/3} E^5 \\
\lambda(E3) &= 34 A^2 E^7 \\
\lambda(E4) &= 1.1 \times 10^{-5} A^{8/3} E^9
\end{aligned} \qquad (۱۳.۱۰)$$

که درآنها λ برحسب s^{-1} و E برحسب MeV است.

برای گذارهای مغناطیسی، انتگرال شامل جملهٔ r^{L-1} است، وبا فرض مشابه درمورد ثابت‌بودن تابع موج هسته‌ای عامل $3R^{L-1}/(L+2)$ حاصل می‌شود. عملکرد مغناطیسی نیز شامل عاملی است که به گشتاور مغناطیسی هسته‌ای پروتون بستگی دارد. نتیجه برای احتمال گذار ML به‌صورت زیراست

$$\lambda(ML)\cong\frac{8\pi(L+1)}{L[(2L+1)!!]^2}\left(\mu_p-\frac{1}{L+1}\right)^2\left(\frac{\hbar}{m_pc}\right)^2\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}\right)$$
$$\times\left(\frac{E}{\hbar c}\right)^{2L+1}\left(\frac{3}{L+2}\right)^2 cR^{2L-2} \quad (14.10)$$

که مجدداً از چندعامل تکانهٔ زاویه‌ای مرتبهٔ واحد چشمپوشی‌شده است. معمولا به‌جای $[\mu_p-1/(L+1)]^2$ عدد ۱۰ را می گذارند که برای چندقطبیهای مراتب پایین به براوردهای زیر منتهی می‌شود[1]

$$\begin{aligned}\lambda(M1)&=5.6\times10^{13}E^3\\ \lambda(M2)&=3.5\times10^{7}A^{2/3}E^5\\ \lambda(M3)&=16A^{4/3}E^7\\ \lambda(M4)&=4.5\times10^{-6}A^2E^9\end{aligned} \quad (15.10)$$

این براوردهای آهنگ گذار به‌نام براوردهای وایسکوف معروف‌اند و به‌معنی محاسبات نظری واقعی نیستند تا با آهنگهای گذار اندازه‌گیری شده مقایسه شوند. در عوض، به‌کمك این براوردها می‌توان آهنگهای گذار را به‌طور نسبی باهم مقایسه کرد. برای مثال، اگر آهنگ واپاشی مشاهده شده برای یك گذار γ چند مرتبهٔ بزرگی کوچکتر از براورد وایسکوف باشد، می‌توان تصور کرد که مطابقت ضعیف تابع موجهای اولیه و نهایی باعث کند شدن گذار شده است. به‌طور مشابه اگر آهنگ گذار بسیار بیش از براورد وایسکوف باشد، می‌توان تصور کرد که بیش از یك نوکلئون در این گذار شرکت داشته است.

برمبنای براوردهای وایسکوف، می‌توان بلافاصله دو نتیجه درمورد احتمالات گذار گرفت: (۱) چندقطبیهای مراتب پایین گذارهای برتر هستند ــ افزایش مرتبهٔ چندقطبی به‌میزان یك واحد، احتمال گذار را با ضریب 10^{-5} کاهش می‌دهد. در اتمها هم اثر مشابهی رخ می‌دهد، که در آنها متداولترین گذارها گذارهای دوقطبی است. (۲) برای یك مرتبهٔ معین چند قطبی، احتمال تابش الکتریکی در هسته‌های متوسط و سنگین دومرتبهٔ بزرگی بیش‌از تابش مغناطیسی است. در بخش ۷.۱۰ توافق این پیش‌بینی را با مشاهدات بررسی خواهیم کرد.

---

۱. ضرایب عددی در معادلهٔ (۱۵.۱۰) اندکی با آنچه گاهی در مراجع دیگر یافت می‌شود، متفاوت‌است. این‌تفاوت به‌علت آن‌است که معمولا به‌جای $3/(L+2)$ درمعادلهٔ (۱۴.۱۰) مقدار $3/(L+3)$ را قرارمی‌دهند تا شبیه‌معادلهٔ (۱۲.۱۰) به‌نظر آید. ما شکل‌معادلهٔ (۱۴.۱۰) را انتخاب کرده‌ایم تا با مقادیر ML حاصل از براوردهای وایسکوف در مراجع هسته‌ای موافق باشد، معادلات (۱۵.۱۰) باید در $(L+2)^2/(L+3)^2$ ضرب شوند.

۴.۱۰ قواعد گزینش تکانهٔ زاویه‌ای و پاریته

یك میدان الکترومغناطیسی کلاسیك که توسط جریان و بار نوسان کننده به‌وجود می‌آید، علاوه‌بر انرژی، تکانهٔ زاویه‌ای نیز گسیل می‌کند. برای مثال اگر بارها وجریانها را توسط پوستهٔ جذب کنندهٔ بزرگی به شکل کروی احاطه کنیم، پوسته می‌تواند در اثر جذب تابش به‌دوران درآید. آهنگ تابش تکانه با آهنگ تابش انرژی متناسب است.

با رفتن به‌حد کوانتومی، اگر هرفوتون تکانهٔ زاویه‌ای معین داشته باشد، می‌توانیم تناسب را حفظ کنیم. عملگر چندقطبی مرتبهٔ L شامل‌عامل $Y_{LM}(\theta, \phi)$ است که به‌تکانهٔ L مربوط می‌شود. بنابراین، نتیجه می‌گیریم که چندقطبی مرتبهٔ L به‌ازای هرفوتون تکانه‌ای معادل $L\hbar$ منتقل می‌کند.

گذار γ از حالت برانگیختهٔ اولیه با تکانهٔ زاویه‌ای I_i و پاریتهٔ π_i را به حالت نهایی I_f و پاریتهٔ π_f درنظر می‌گیریم. ابتدا فرض می‌کنیم که $I_i \neq I_f$ است. پایستگی تکانهٔ زاویه‌ای ایجاب می‌کند که تکانهٔ زاویه‌ای کل ابتدایی برابر تکانهٔ زاویه‌ای کل حالت نهایی باشد. به‌عبارت برداری داریم

$$\mathbf{I}_i = \mathbf{L} + \mathbf{I}_f$$

از آنجا که $\mathbf{I}_i$، $\mathbf{L}$، و $\mathbf{I}_f$ باید مثلث برداری بسته‌ای به‌وجود آورند، مقادیر ممکن L محدودند. بزرگترین مقدار ممکن L برابر $I_i + I_f$ و کوچکترین مقدار ممکن آن برای $|I_i - I_f|$ است. برای مثال، اگر $I_i = ۳/۲$ و $I_f = ۵/۲$ باشد، مقادیر ممکن L برابر ۱، ۲، ۳، و ۴ هستند. دراین مورد میدان تابش ازمخلوط تابش دوقطبی، چارقطبی، هشت قطبی ($L = ۳$) وشانزده‌قطبی ($L = ۴$) تشکیل شده است.

نوع الکتریکی یا مغناطیسی بودن تابش گسیل شده با پاریتهٔ نسبی ترازهای اولیه ونهایی تعیین می‌شود. اگر تغییر پاریته صورت نگیرد (نه $\Delta\pi =$)، میدان تابش بایددارای پاریتهٔ زوج باشد؛ اگر پاریته ضمن گذار تغییر کند (آری $\Delta\pi =$)، میدان تابش بایدپاریتهٔ فرد داشته‌باشد. طبق معادلهٔ (۷.۱۰)، چندقطبیهای الکتریکی و مغناطیسی باید دارای‌پاریتهٔ مختلف باشند. گذارهای الکتریکی در صورتی پاریتهٔ زوج دارند که زوج $= L$ باشد، در حالی که پاریتهٔ گذارهای مغناطیسی درصورت فرد $= L$ زوج می‌شود. بنابراین، یك گذار «نه $\Delta\pi =$» از چند قطبیهای الکتریکی زوج و چند قطبیهای مغناطیسی فرد تشکیل شده است. از طرف دیگر یك گذار «آری $\Delta\pi =$»، از چندقطبیهای الکتریکی فرد و مغناطیسی زوج تشکیل‌شده‌است. درمثال قبلی ($I_i = ۳/۲$ به $I_f = ۵/۲$)، اگر فرض کنیم که $\pi_i = \pi_f$ باشد، آنگاه «نه $\Delta\pi =$» است. قبلا نتیجه گرفتیم که $L = ۱, ۲, ۳, ۴$ است. تابش $L = ۱$ باید دارای خصوصیت مغناطیسی (برای چندقطبی الکتریکی زوج و مغناطیسی‌فرد داریم «نه $\Delta\pi =$») وتابش $L = ۲$ دارای خصوصیت الکتریکی باشد وغیره. بنابراین میدان تابش باید به‌صورت تابش $M۱$، $E۲$، $M۳$، و $E۴$ باشد. اگر دوحالت دارای خصوصیت $\pi_i = -\pi_f$ باشند (آری $\Delta\pi =$)، میدان‌تابش به‌صورت $E۱$، $M۲$، $M۳$، و $M۴$ درمی‌آید.

بنابراین، قواعد گزینش تکانهٔ زاویه‌ای وپاریته به‌صورت زیر است:

$$|I_i - I_f| \leqslant L \leqslant I_i + I_f \qquad (L = ۰ \text{ بدون})$$

$$\Delta\pi = \text{نه} : \text{مغناطیسی‌فرد، الکتریکی زوج} \qquad (۱۶.۱۰)$$

$$\Delta\pi = \text{آری} : \text{مغناطیسی‌زوج، الکتریکی‌فرد}$$

استثنای قاعدهٔ گزینش تکانهٔ زاویه‌ای هنگامی به‌وجود می‌آید که $I_i = I_f$ باشد، زیرا دراین‌مورد هیچ‌گذار تک‌قطبیی ($L = ۰$) وجود ندارد که در آن یك تك‌فوتون گسیل‌شود. از نظر کلاسیك، گشتاور تك‌قطبی همان بار الکتریکی است که طی زمان تغییر نمی‌کند. (یك توزیع بارکروی به‌شعاع R فقط میدان کولنی خالص $۱/r^۲$ را برای $r > R$ به‌دست می‌دهد. حتی اگر این کره نوسانهای شعاعی داشته باشد، میدان کولنی در ناحیهٔ $r > R$ تغییر نمی‌کند و تابشی به وجود نمی‌آید.) برای گذارهایی که در آنها $I_i = I_f$ است، پایینترین مرتبهٔ چندقطبی ممکن برای پرتو γ دوقطبی ($L = ۱$) است.

موردی که در آن I_i یا I_f صفر باشد بسیار ساده است، زیرا دراین‌صورت فقط یك گذار چندقطبی خالص گسیل می‌شود. برای مثال، اولین حالت برانگیختهٔ ۲^+ ($I_i = ۲$، زوج $= \pi_i$) درهسته‌های Z زوج، N زوج با گسیل یك چارقطبی الکتریکی‌خالص ($E۲$) به‌حالت پایه واپاشیده می‌شود. قواعد گزینش فوق، بلافاصله تابش الکتریکی و $L = ۲$ را با «$\Delta\pi = \text{نه}$» به‌دست می‌دهند.

برای $I_i = I_f = ۰$، قواعد گزینش فقط $L = ۰$ را به‌دست می‌دهند که قبلا دیدیم برای گذارهای تابشی مجاز نیست. تعداد کمی هسته‌های زوج ـ زوج با اولین‌حالت برانگیختهٔ ۰^+ وجود دارند که واپاشی آنها به‌حالت پایهٔ ۰^+ با گسیل گاما ممنوع است. در عوض، این حالت با تبدیل داخلی واپاشیده می‌شوند که دربخش ۶.۱۰ آن‌را موردبررسی قرار می‌دهیم. دراین فرایند، گسیل انرژی برانگیختگی با بیرون انداختن یك الکترون مداری میسر می‌شود، وتابع موج این الکترون با نفوذ درحجم هسته نمونه‌ای از توزیع تك‌قطبی را در $r < R$ که در آن پتانسیل به‌نوسان درمی‌آید به‌نمایش می‌گذارد.

معمولا اسپینهای I_i و I_f دارای مقادیری هستند که بنابر قواعد گزینش، گسیل چند چندقطبی مجاز است. براوردهای تك ذره‌ای (وایسکوف)، پیش‌بینی کلی محتملترین نوع چندقطبی گسیل‌شده را ممکن می‌سازد. مثال قبلی درمورد یك گذار $I_i = (۳/۲)^+$ به $I_f = (۵/۲)^+$ ($M۱$، $E۲$، $M۳$، و $E۴$) را درنظرمی‌گیریم. اگر یك‌هستهٔ میان وزن ($A = ۱۲۵$ در نتیجه $A^{۲/۳} = ۲۵$) باانرژی گذار $E = ۱\,\text{MeV}$ را درنظربگیریم، بااستفاده‌ازمعادلات (۱۳.۱۰) و (۱۵.۱۰) نسبت احتمالات گسیل به‌صورت زیر براورد می‌شود

$$\lambda(M۱):\lambda(E۲):\lambda(M۳):\lambda(E۴) = ۱:۱٫۴ \times ۱۰^{-۳}:۲٫۱ \times ۱۰^{-۱۰}:۱٫۳ \times ۱۰^{-۱۳}$$

ملاحظه می‌شود که چندقطبیهای مراتب پایین ($M۱$ و $E۲$) ازمراتب بالا بسیار محتملترند. درعمل می‌توانیم این گذارها را به‌صورت ترکیب تابش $M۱$ واحتمالا مخلوط اندکی از $E_۲$ درنظربگیریم. اگر گذار «$\Delta\pi = \text{آری}$» باشد، چندقطبیهای $E۱$، $M۲$، $E۳$، و $M۴$

با نسبتهای زیر حاصل می‌شوند

$$\lambda(E1):\lambda(M2):\lambda(E3):\lambda(M4) = 1:2{,}3\times 10^{-7}:2{,}1\times 10^{-10}:2{,}1\times 10^{-17}$$

دراینجا انتظار می‌رود که فقط $E1$ در گذار سهیم باشد.

برمبنای براوردهای تك‌ذره‌ای، به‌انتظاراتی نسبتاً کلی می‌رسیم:

۱. پایینترین چندقطبی مجاز معمولا غالب است.
۲. برای هسته‌های متوسط و سنگین، گسیل چندقطبی الکتریکی با ضریب 10^{2} محتملتر از گسیل چندقطبی مغناطیسی از همان مرتبه است. (البته، قواعد گزینش رقابت بین EL و ML را در یك میدان تابش ممنوع می‌سازد.)
۳. احتمال گسیل چندقطبی $L+1$ با ضریبی از مرتبهٔ 10^{-5} کمتر ازچند قطبی L است.
۴. از ترکیب نتایج ۲ و۳ داریم (که در آن $L'=L+1$ است)

$$\frac{\lambda(EL')}{\lambda(ML)}=\frac{\lambda(EL')}{\lambda(EL)}\cdot\frac{\lambda(EL)}{\lambda(ML)}\approx 10^{-5}\times 10^{2}\approx 10^{-3}$$

$$\frac{\lambda(ML')}{\lambda(EL)}=\frac{\lambda(ML')}{\lambda(ML)}\cdot\frac{\lambda(ML)}{\lambda(EL)}\approx 10^{-5}\times 10^{-2}\approx 10^{-7}$$

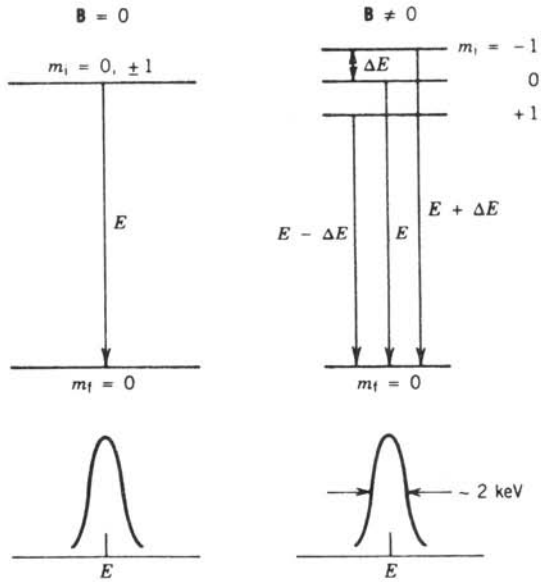
ملاحظه می‌شود که چرا رقابت بین $M2$ و $E1$ بسیار ضعیفتر از رقابت بین $E2$ و $M1$ است. باید به‌خاطر داشته باشیم که این براوردها فقط برمبنای تقریبهای خام است. خصوصیات حالات هسته‌ای ویژه می‌تواند این براوردها را تا چند مرتبهٔ بزرگی تغییر دهد. برای مثال، اغلب به مواردی برمی‌خوریم که در آنها $\lambda(E2)>\lambda(M1)$ است، و بعضی از آنها را به‌خصوص در گذارهای بین حالات جمعی ارتعاشی یا دورانی می‌توان دید.

۵.۱۰ اندازه‌گیری توزیع زاویه‌ای وقطبیدگی

دراین بخش روشهای تجربیی را بررسی خواهیم کردکه به‌کمك آنها می‌توانیم چندقطبیها را از یکدیگر تمیز دهیم. اندازه‌گیری انرژی پرتو گامایی که دریك گذار گسیل شده است، اطلاعی درمورد چند قطبی بودن آن نمی‌دهد. حتی اگر I_i و I_f را بدانیم، فقط می‌توانیم گسترهٔ مقادیر ممکن L را تعیین کنیم و تعیین مقدار هر یك از آنها امکان‌پذیر نیست. (درحقیقت، اغلب عکس آن مورد استفاده است یعنی با دانستن I_f می‌توانیم گسترهٔ I_i را با اندازه‌گیری L تعیین کنیم). حتی اندازه‌گیری طول‌عمر هم به‌خاطر فرضهای بسیاری که برای به‌دست‌آوردن براوردهای وایسکوف درنظر گرفته شده است، فایدهٔ چندانی ندارد. برای تعیین مرتبهٔ چندقطبی در تابش γ باید توزیع زاویه‌ای تابش را اندازه‌گیری کرد، و برای تشخیص نوع الکتریکی یا مغناطیسی تابش باید به‌اندازه‌گیریهای اضافی نظیر اندازه‌گیری قطبیدگی تابش دست یازید.

برای روشن‌شدن موضوع، یك گذار دوقطبی از $I_i = 0$ به $I_f = 0$ را در نظر می‌گیریم. حالت ابتدایی شامل سه زیرتراز با مشخصات $m_i = +1, 0, -1$ است؛ حالت نهایی فقط یك زیرتراز به‌صورت $m_f = 0$ دارد. توزیع زاویه‌ای معمولا به‌مقادیر m_i و m_f بستگی دارد. برای مثال، درمورد گذار $m_i = 0$ به $m_f = 0$، احتمال گسیل گاما به‌صورت $\sin^2\theta$ تغییر می‌کند (که زاویهٔ θ نسبت به‌محور z تعریف‌شده است که از آن برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های $\mathbf{I}_i$ استفاده می‌کنیم). درحقیقت، این همان مانستهٔ کوانتومی تابش یك دوقطبی کلاسیك است که در بخش ۲.۱۰ بررسی شد. گذارهای از $m_i = \pm 1$ به $m_f = 0$ دارای توزیعهایی زاویه‌ای هستند که به‌صورت $(1/2)(1+\cos^2\theta)$ تغییرمی‌کنند.

اگر بتوانیم یکی از سه‌حالت اولیهٔ m را انتخاب و توزیع زاویه‌ای آن مؤلفه از گذار را اندازه‌گیری کنیم، به‌توزیع زاویه‌ای مشخصه دست‌خواهیم‌یافت. ساده‌ترین‌طرح برای انجام این‌کار قراردادن هسته‌ها در یك‌میدان مغناطیسی بسیار قوی است، به‌طوری که برهم‌کنش گشتاور مغناطیسی μ مربوط به‌تراز I_i سبب شکافتگی آن‌تراز برحسب سمتگیری نسبی $\mathbf{I}_i$ ومیدان $\mathbf{B}$ خواهدشد. (این‌پدیده درست‌مشابه پدیدهٔ زیمان‌دراتمهاست.) شکل ۲.۱۰



شکل ۲.۱۰ اثر هسته‌ای زیمان. در میدان مغناطیسی $\mathbf{B}$، تعداد $2I_i+1$ زیرتر از حالت I_i به‌حالات با فواصل مساوی واختلاف انرژی $\Delta E = \mu B/I_i$ شکافته می‌شوند، برای مورد نشان‌داده شده داریم $I_i = 1$، $2I_i+1 = 3$، $I_f = 0$ و $\Delta E = \mu B$. این سه‌گذار در قواعد گزینش $\Delta m = 0, \pm 1$ صدق می‌کنند. خطوط گامای مشاهده شده در زیر هر نمودار نشان‌داده شده است؛ به علت بزرگتربودن تفکیك انرژی از شکافتگی ΔE، نمی‌توانیم مؤلفه‌های مختلف را تفکیك کنیم.

نموداری از این وضعیت را نشان می‌دهد. قبل از برقراری میدان، یك گذار با انرژی E وجود دارد. حضور میدان، باعث شکافتگی ترازها و تولید سه گذار با انرژیهای E، $E+\Delta E$، و $E-\Delta E$ خواهدشدکه درآن $\Delta E=\mu B$ است. اگر برای مثال بتوانیم فقط مؤلفهٔ با انرژی $E+\Delta E$ را انتخاب کنیم، توزیع $(1/2)(1+\cos^2\theta)$ نسبت به‌جهت میدان را ملاحظه خواهیم کرد. می‌توان مقدار ΔE را برای یك گشتاور مغناطیسی معادل ۱ مگنتون هسته‌ای در میدان قوی ۱۰T برابر $\Delta E\approx 10^{-6}\,\mathrm{eV}$ براورد کرد. این مقدارکوچك ΔE بسیارکمتر از تفاوت انرژی قابل تفکیك توسط آشکارسازهای پرتو γ است که نوعاً نمی‌توانندگذارهای با فاصلهٔ حدود ۲ keV از یکدیگر را تفکیك کنند. بنابراین، درعمل مخلوطی از مقادیر ممکن $m_i\to m_f$ $(+1\to 0,\ 0\to 0,\ -1\to 0)$ را مشاهده می‌کنیم. اگر $W(\theta)$ توزیع زاویه‌ای مشاهده شده باشد، داریم

$$W(\theta)=\sum_{mi} p(m_i)W_{m_i\to m_f}(\theta)$$

که درآن $p(m_i)$ تراکم حالت اولیه، یعنی کسر هسته‌هایی است که هر زیرتراز را اشغال کرده‌اند.

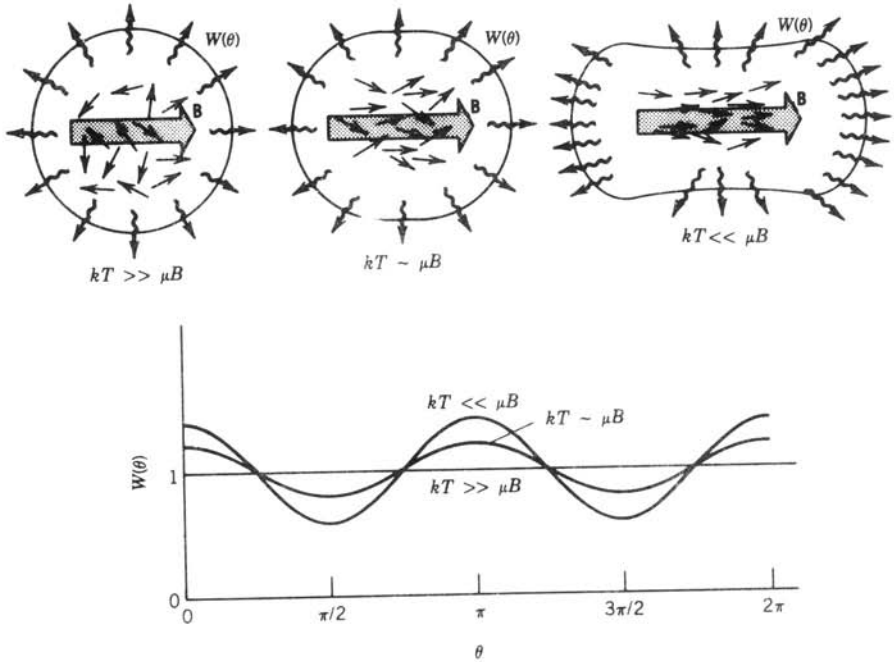
درشرایط عادی تمام تراکمها باهم برابرند $p(+1)=p(0)=p(-1)$، به‌طوری که داریم

$$W(\theta)\propto\frac{1}{3}\left[\frac{1}{2}(1+\cos^2\theta)\right]+\frac{1}{3}(\sin^2\theta)+\frac{1}{3}\left[\frac{1}{2}(1+\cos^2\theta)\right]=\mathrm{const}.$$

یعنی توزیع زاویه‌ای ناپدید می‌شود وشدت مستقل ازجهت است.

دو روش برای ایجاد تراکم نامساوی $p(m_i)$ که به مقادیر غیرثابت $W(\theta)$ منجر می‌شود، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در روش نخست، هسته‌ها دریك میدان‌مغناطیسی قوی که شرح آن رفت، قرار می‌گیرند ولی درهمان حال آنها را تا دماهای بسیارکم، در حدی که تراکمها دراثر توزیع بولتزمن $p(m_i)\propto e^{-m_i(\Delta E/kT)}$ نابرابرشوند، سرد می‌کنیم. برای داشتن تراکمهای نابرابر، باید نما مخالف یك باشدکه این امر به‌معنی هم‌مرتبه‌بودن ΔE و kT است. (در دماهای بالا، مانند دمای‌اتاق، $kT\simeq 1/40\,\mathrm{eV}$ است و با توجه به براورد قبلی $\Delta E=10^{-6}\,\mathrm{eV}$ داریم $\Delta E\ll kT$.)برای‌اینکه $\Delta E\sim kT$ شود، بایدهسته‌ها تا $T\sim 0.01\,\mathrm{K}$ سرد شوند. این عمل بااستفاده از سردکنهای مداوم به‌نام سردکنهای مایعی هلیم صورت می‌گیرد، واین روش که سمتگیری هسته‌ای‌دمای‌پایین‌خوانده می‌شود، روشی نیرومند برای تعیین خصوصیت چندقطبی پرتو γ و استنباط اسپین هسته‌ای است. شکل ۳.۱۰ توزیعهای زاویه‌ای مشخصهٔ تابش دوقطبی را نشان می‌دهد. توجه‌کنید که با استفاده از این روش هنوز نمی‌توانیم یك‌مؤلفهٔ‌گذار را از دیگری تمیزدهیم؛ فقط‌شرایطی ایجادکرده‌ایم که درآن مؤلفه‌های مختلف سهمهای نامساوی درمخلوط دارند.

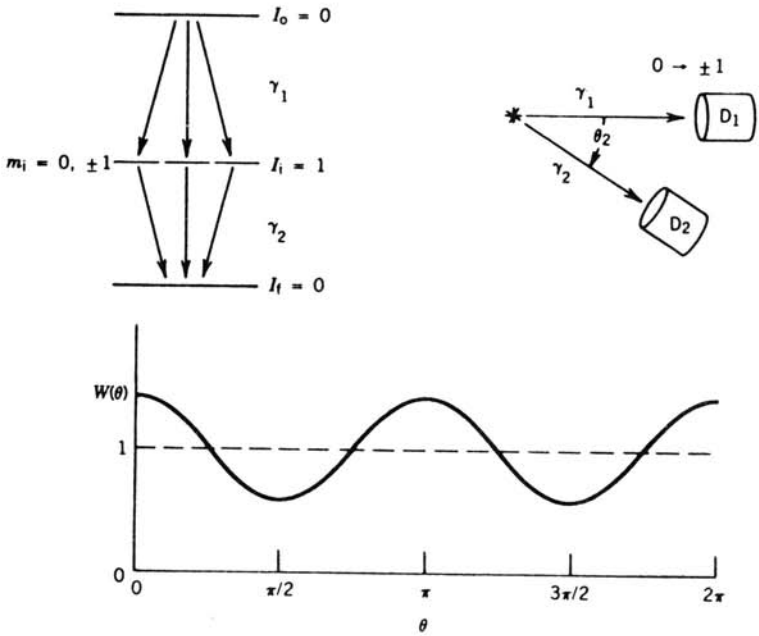
روش دوم شامل ایجاد مخلوط نامساوی از تراکمهای $p(m_i)$ با استفاده از مشاهدهٔ تابش قبلی است. برای سهولت، فرض می‌کنیم که تراز I_i باگذارهایی از حالت اسپینی $I_0=0$ متراکم شده است، دراین‌صورت همان‌طور که درشکل ۴.۱۰ نشان‌داده‌ایم، با



شکل ۳.۱۰ توزیعهای زاویه‌ای هسته‌ها با اسپینهای سمت‌گیری شده در دماهای کم. درتصویر بالایی سمت‌چپ، توزیع انتظاری تابش در دمای بـالا داده شده است؛ میدان مغناطیسی به‌علت حرکت گرمایی تأثیری درسمتگیری اسپینهای هسته‌ای ندارد. در دماهای متوسط (تصویرمیانی در بالا)، اسپینها شروع به‌هم‌خط‌شدن با میدان می‌کنند. و توزیع تابش غیریکنواخت می‌شود. در دمای بسیار پایین، اسپینها به‌طورکامل بامیدان هم‌خط می‌شوند. اندازه‌گیری توزیع‌زاویه‌ای تابش دوقطبی، نتایجی به‌صورت شکل‌پایین به‌دست می‌دهد.

توالی $0 \to 1 \to 0$ که متشکل از دو تابش γ_1 و γ_2 است سروکار داریم. اولین تابش‌را درجهت معینی‌مشاهده می‌کنیم که‌آن‌را محور z درنظرمی‌گیریم. تابش‌دوم درجهتی‌ملاحظه می‌شودکه با این محور زاویهٔ θ_2 می‌سازد. اولین تابش نسبت به‌محور z دارای تـوزیع زاویه‌ای فوق‌الذکر است؛ توزیع زاویه‌ای برای $m_0 = 0$ تا $m_i = 0$ با $\sin^2\theta_1$، وبرای $m_0 = 0$ تا $m_i = \pm 1$ با $(1/2)(1+\cos^2\theta_1)$ متناسب است. ازآنجاکه محور z را درامتداد γ_1 تعریف‌کرده‌ایم، داریم $\theta_1 = 0$ ودرنتیجه گذار $0 \to 0$ نمی‌تواند درآن‌جهت گسیل شود. یعنی، هسته‌هایی که درآنها γ_2 پس‌از γ_1 مشاهده می‌شود برای $m_i = 0$ باید دارای تراکم $p(m_i) = 0$ باشند. بنابراین توزیع زاویه‌ای γ_2 نسبت به γ_1 برابر است با

$$W(\theta) \propto \frac{1}{2}\left[\frac{1}{2}(1+\cos^2\theta)\right] + 0(\sin^2\theta) + \frac{1}{2}\left[\frac{1}{2}(1+\cos^2\theta)\right]$$
$$\propto 1+\cos^2\theta$$



شکل ۴.۱۰ اندازه‌گیری همبستگی زاویه‌ای. در یك تـوالی دو تـابشی که دراینجا به‌صورت ۰ ← ۱ ← ۰ فرض می‌شود، توزیع زاویه‌ای γ_2 نسبت به‌جهت γ_1 اندازه‌گیری می‌شود. یك نتیجهٔ کلی حاصل از دوگذار دوقطبی درشکل پایین نشان‌داده شده‌است.

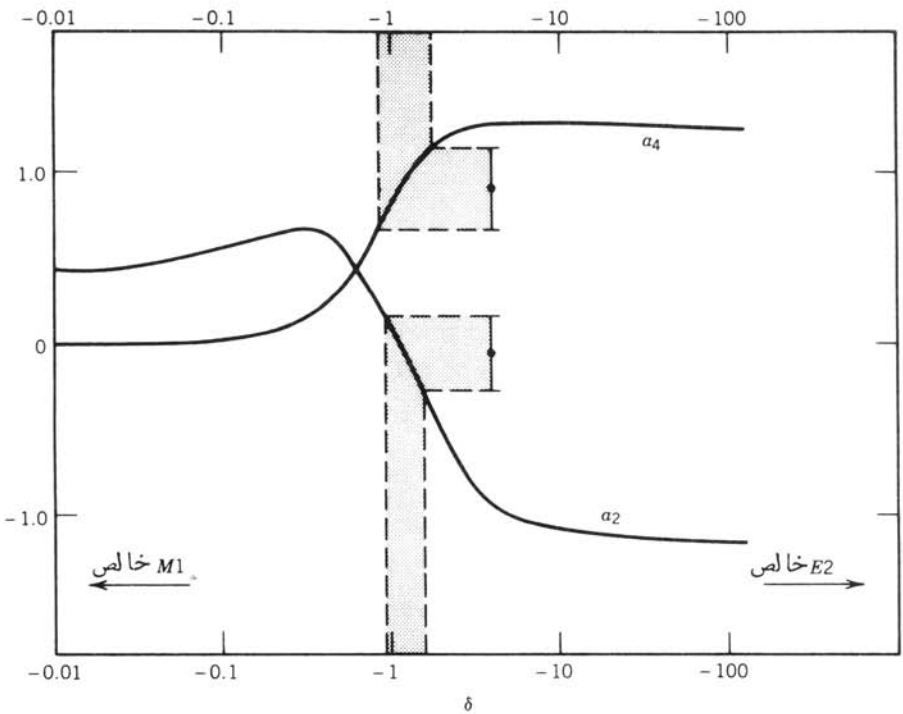
این نوع آزمایش را همبستگی زاویه‌ای می‌نامند. در این مورد هم، مؤلفه‌های منفرد γ_2 را مشاهده نمی‌کنیم، بلکه یك توزیع تراکم m حالتی ازحالت I_i را ایجاد می‌کنیم.

این نمونه‌های انـدازه‌گیری توزیع زاویه‌ای را به عنوان ساده‌ترین مـورد تابش دوقطبی درنظر گرفتیم. به‌طور کلی، توزیع زاویه‌ای یاهمبستگی تابش چندقطبی به‌صورت چندجمله‌ای توانهای زوج $\cos\theta$ است

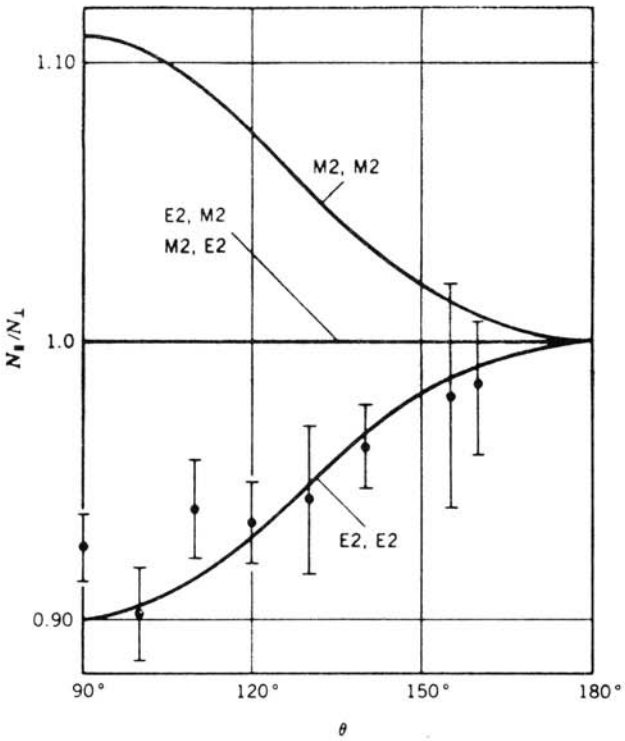
$$W(\theta) = 1 + \sum_{k=1}^{L} a_{2k} \cos^{2k}\theta \qquad (17.10)$$

که درآن‌ضرایب a_{2k} به I_i، I_f، و L، و نیز به‌اینکه آزمایش توزیع زاویه‌ای دمای‌پایین یاآزمایش همبستگی را انجام دهیم، بستگی دارد. برای مثال، برای همبستگی زاویـه‌ای $4^+ \xrightarrow{\gamma_1} 2^+ \xrightarrow{\gamma_2} 0^+$ که در آن γ_1 و γ_2 تابش E_2 هستند [γ_2 طبق قواعد گزینش (معادلهٔ ۱۶.۱۰) $E2$ خالص است؛ γ_1 مخلوط ناچیزی از $M3$ وچند قطبیهای بـالاتر دارد]، داریم $a_2 = 1/8$ و $a_4 = 1/24$، درحالی‌که برای $0^+ \to 2^+ \to 0^+$ همبستگی‌زاویه‌ای به‌صورت $a_2 = -3$ و $a_4 = 4$ است. با رجـوع به‌هـدف اصلی این بحث، همبستگی زاویه‌ای $2^+ \xrightarrow{\gamma_1} 2^+ \xrightarrow{\gamma_2} 0^+$ را کـه درآن γ_1 مخلـوط $M1$ و $E2$ (بـا چشمپوشی از

چندقطبیهای بالاتر) است، درنظر می‌گیریم. ضرایب a_2 و a_4 به‌مقادیر نسبی تابش $M1$ و $E2$ وابسته‌اند؛ شکل ۵.۱۰ تغییرات a_2 و a_4 را برحسب پارامتر δ نشان می‌دهد، که در آن δ اساساً برابر $m_{fi}(E2)/m_{fi}(M1)$ و $m_{fi}(\sigma L)$ جزء ماتریس گذار با تعریف معادلهٔ (۹.۱۰) است. کسر گذار $E2$ برابر $\delta^2/(1+\delta^2)$ وکسر تابش $M1$ برابر $1/(1+\delta^2)$ است. به‌عنوان مثال، توالی $0^+ \to 2^+ \to 2^+$ را با انرژی ۶۵۸–۸۱۸ keV در ^{110}Cd با مقادیر اندازه‌گیری شدهٔ $a_2 = -0.06 \pm 0.22$ و $a_4 = 0.89 \pm 0.24$ در نظر می‌گیریم. چنانکه در شکل ۵.۱۰ نشان‌داده شده است، نسبت استنتاج‌شدهٔ جزء ماتریسهای چندقطبی برابر $\delta = -1.2 \pm 0.2$ می‌شود و این بدان‌معنی است که تابش ۸۱۸ keV مخلوطی از ۵۹ درصد $E2$ و ۴۱ درصد $M1$ است. این اطلاع دقیق از خصوصیت چندقطبی، درارزشیابی مدلهای‌هسته‌ای واستنتاج نیمه‌عمرهای‌جزئی که دربخش ۷.۱۰ بحث شد، حائزاهمیت‌است. بنابراین، اندازه‌گیریهای توزیع‌زاویه‌ای وهمبستگی‌نقش‌فوق‌العاده مهمی درطیف‌نمایی هسته‌ای دارند.



شکل ۵.۱۰ تحلیل اطلاعات همبستگی زاویه‌ای برای نسبت جزء ماتریسهای $E2$ به $M1$ در یک گذار. پاره‌خطهای عمودی خطا گستره‌های تعیین تجربی a_2 و a_4 را نشان‌می‌دهند، وهریک از آنها مقدار δ خاص خود را دارد. منحنیهای a_2 و a_4 با استفاده از نظریه و برای توالی $0 \to 2 \to 2$ در ^{110}Cd به‌دست آمده‌اند.



شکل ۶.۱۰ تعیین همبستگی زاویه‌ای که در آن قطبش خطی تابش، اندازه‌گیری می‌شود. زاویهٔ θ، مانند شکلهای ۴.۱۰ و ۴۳.۷، زاویهٔ بین دو تابش است. اطلاعات نشان‌داده شده به‌دوگذار در واپاشی ^{46}Sc مربوط می‌شوند. منحنیهای نظری برای ترکیبهای مختلف تابشهای $E2$ و $M2$ رسم شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که هردوگذار باید از نوع $E2$ باشند که با نمودار تراز اخیراً شناخته شدهٔ $0^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 4^+$ سازگار هستند.

تعیین ماهیت الکتریکی یا مغناطیسی تابش مستلزم اندازه‌گیریهای اضافی است زیرا در توزیع زاویه‌ای، مقادیر a_2 و a_4 برای تابشهای E و M یکسان است. چنانکه در شکل ۱.۱۰ دیده می‌شود، بردار میدان تابش $\mathbf{E}$ برای تابش الکتریکی موازی با محور دوقطبی و برای تابش مغناطیسی بر آن عمود است. همین خصوصیت به‌توصیف کوانتومی کامل منتقل می‌شود، وما می‌توانیم با تعیین ارتباط جهتی بین محور هستهٔ گسیلنده که درهمان جهت تابش گسیل شده است ومیدان $\mathbf{E}$ تابش، تابشهای E و M را ازیکدیگر تمیز دهیم. صفحهٔ حاصل ازجهت انتشارتابش $\mathbf{r}$ و میدان $\mathbf{E}$ را صفحهٔ قطبش می‌نامند. (با معلوم‌بودن $\mathbf{r}$ و $\mathbf{E}$ می‌توانیم $\mathbf{B}$ را به‌دست آوریم، زیرا تابش در جهت $\mathbf{E}\times\mathbf{B}$ منتشر می‌شود. انتخاب $\mathbf{r}$ و $\mathbf{E}$ برای تعریف قطبش یك قرارداد است ودارای اهمیت ذاتی نیست.) مانند مورد قبل، باید از یك توزیع نابرابر حالات m شروع کنیم. (در مورد کلاسیك، این مطلب باشناخت

جهت محور دوقطبی معادل‌می‌شود. زیرا یك جهت‌معین $\mathbf{E}$ ممکن‌است متناظر بایك دوقطبی الکتریکی در جهت z یا یك دوقطبی مغناطیسی در جهت y باشد.)

این نوع اندازه‌گیری، توزیع قطبش خطی نامیده می‌شود، ومعمولا بااستفاده از وابستگی به‌قطبش پراکندگی‌کامپتون (بخش ۹.۷ و شکل ۴۳.۷) انجام می‌شود. شکل ۶.۱۰ مثالی از همبستگی زاویه‌ای است‌که درآن قطبش خطی γ_2 مشاهده شده‌است. مانند مورد قبل، مشاهدهٔ تابش پیشین γ_1 درعمل توزیع نابرابر m حالتی را به وجود می‌آورد، و ماقطبش‌خطی γ_2 را بااندازه‌گیری شدت فوتونهای پراکندهٔ کامپتون برحسب ϕ به‌دست می‌آوریم.

۶.۱۰ تبدیل داخلی

تبدیل‌داخلی یك فرایند الکترومغناطیسی است‌که باگسیل γ رقابت می‌کند. دراین مورد، میدانهای چندقطبی الکترومغناطیسی هسته سبب‌گسیل فوتون نمی‌شوند؛ بلکه برهم‌کنش میدانها باالکترونهای‌اتمی باعث‌گسیل یکی‌از الکترونهای اتم می‌شود. برخلاف واپاشی بتازا، الکترون در فرایند واپاشی خلق نمی‌شود، بلکه الکترونی است که ازقبل‌دریکی‌از مدارهای اتم وجود داشته است. به‌این دلیل، آهنگ واپاشی تبدیل داخلی با تغییر محیط شیمیایی و درنتیجه تغییرمدارهای‌اتمی می‌تواند اندکی تغییر کند. اما باید به‌خاطر داشته باشید که این فرایند دو مرحله‌ای نیست که درآن ابتدا فوتون توسط هسته گسیل شود و سپس الکترون اتمی را با فرایندی مشابه پدیدهٔ فوتوالکتریك بیرون براند؛ احتمال چنین فرایندی بسیار ناچیز است.

بخشی از انرژی‌گذار ΔE دراین مورد به‌صورت انرژی جنبشی الکترون‌گسیل‌شده T_e ظاهر می‌شود، و بخشی هم با توجه به‌لزوم خنثی‌سازی انرژی بستگی B، برای بیرون راندن الکترون ازپوستهٔ اتمی مصرف می‌شود

$$T_e = \Delta E - B \qquad (۱۸.۱۰)$$

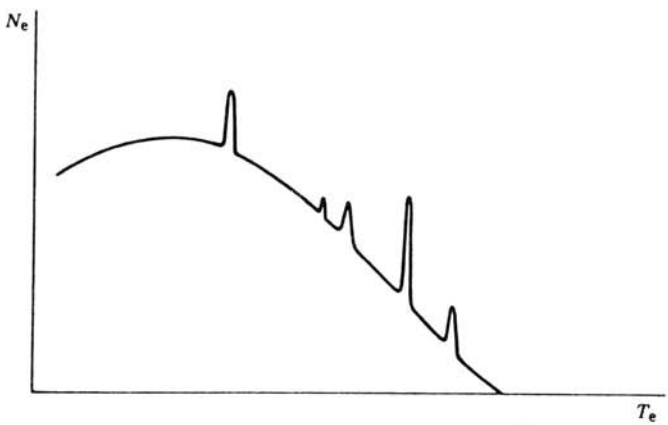
همان‌طور که دربحث انرژی بستگی هسته‌ای عمل کردیم، B را مثبت درنظر می‌گیریم. بدیهی است که انرژی یك‌حالت مقید منفی‌است، وما دراینجا انرژی بستگی را به‌صورت انرژی‌لازم برای انتقال ازحالت مورد بحث به‌انرژی‌صفر درنظر می‌گیریم. به‌علت‌اینکه انرژی بستگی الکترون از مداری به مدار دیگر فرق می‌کند، حتی برای یك گذار معین ΔE هم الکترونهای تبدیل داخلی دارای انرژیهای متفاوتی خواهند بود. بدین‌سان، طیف الکترون چشمه‌ای‌که یك‌گامای منفردگسیل می‌کند از مؤلفه‌های مختلف تشکیل شده است؛ واین مؤلفه‌ها برخلاف الکترونهایی‌که در واپاشی بتازا گسیل می‌شوند انرژیهای گسسته‌ای‌دارند. بیشتر چشمه‌های‌رادیواکتیو، هم‌الکترونهای واپاشی‌بتازا وهم‌الکترونهای تبدیل داخلی‌گسیل می‌کنند، وجداکردن قله‌های ناپیوستهٔ الکترونهای تبدیل‌داخلی که‌روی

طیف پیوستهٔ β قرار دارند نسبتاً کارآسانی است (شکل ۷.۱۰).

طبق معادلهٔ (۱۸.۱۰)، فرایند تبدیل داخلی انرژی آستانه‌ای برابر انرژی بستگی در یك مدار خاص دارد؛ در نتیجه الکترونهای تبدیل با توجه به پوستهٔ الکترونیی که از آن سرچشمه گرفته‌اند با K، L، و M مشخص می‌شوند که متناظر با اعداد کوانتومی اصلی $n = ۱, ۲, ۳, \ldots$ هستند. بعلاوه، اگر توان تفکیك بسیار زیاد باشد، حتی زیرساختار متناظر با تك‌تك الکترونهای هر پوسته‌را ملاحظه خواهیم کرد. برای مثال پوستهٔ L $(n = ۲)$ دارای اوربیتالهای اتمی $۲s_{۱/۲}$، $۲p_{۱/۲}$، و $۲p_{۳/۲}$ است؛ الکترونهای ناشی از این پوسته‌ها به‌ترتیب الکترونهای تبدیل L_I، L_{II}، و L_{III} نامیده می‌شوند.

پس از فرایند تبدیل، جای الکترون گسیل شده در یکی از پوسته‌های اتم خالی می‌ماند که آن را تهیجا می‌گویند. این تهیجا به‌سرعت توسط الکترونهای پوسته‌های بالاتر پر می‌شود، ودر نتیجه گسیل پرتو x مشخصه را نیزهمراه الکترونهای تبدیل داخلی مشاهده می‌کنیم. به‌همین دلیل، درمطالعهٔ گسیل γ از یك چشمهٔ رادیواکتیو، در نزدیکی انتهای کم‌انرژی طیف معمولا پرتوهای x نیز مشاهده می‌شوند.

برای نشان‌دادن چگونگی محاسبهٔ انرژی الکترون، واپاشی بتازای ^{۲۰۳}Hg به ^{۲۰۳}Tl را درنظر می‌گیریم که به‌دنبال آن یك پرتو γ با انرژی keV ۲۷۹٫۱۹۰ گسیل می‌شود. برای محاسبهٔ انرژی الکترونهای تبدیل، باید انرژی بستگی الکترونهای دختر هستهٔ Tl را در نظر بگیریم زیرا گسیل الکترون از این اتم صورت می‌گیرد. (فرض می‌کنیم که پوسته‌های اتمی درفاصلهٔ بین گسیل γ و گسیل بعدی گاما یا الکترون‌تبدیلی وقت کافی دارند تا به‌حالت عادی برسند؛ البته این‌مطلب الزاماً صحیح نیست و به‌محیط شیمیایی وطول‌عمر حالت برانگیخته بستگی دارد.) فهرست انرژی بستگی الکترونها در جدول ایزوتوپها درپیوست ج درج شده‌است. برای Tl با استفاده از این جدول مقادیر زیر به‌دست‌می‌آید



شکل ۷.۱۰ نمونه‌ای از طیف الکترون که ممکن است از یك چشمهٔ رادیواکتیو گسیل شود. چند قلهٔ ناپیوستهٔ تبدیل داخلی روی زمینهٔ پیوستهٔ واپاشی بتازا قرار دارند.

$$B(\mathrm{K}) = ۸۵٫۵۲۹ \text{ keV}$$

$$B(\mathrm{L_I}) = ۱۵٫۳۴۷ \text{ keV}$$

$$B(\mathrm{L_{II}}) = ۱۴٫۶۹۸ \text{ keV}$$

$$B(\mathrm{L_{III}}) = ۱۲٫۶۵۷ \text{ keV}$$

$$B(\mathrm{M_I}) = ۳٫۷۰۴ \text{ keV}$$

وهمین‌طور برای پوسته‌های M، N، و O نیز مقادیر انرژی بستگی الکترونها قابل استخراج است. بنابراین انتظار داریم که الکترونهای تبدیل با انرژیهای زیر گسیل شوند

$$T_e(\mathrm{K}) = ۲۷۹٫۱۹۰ - ۸۵٫۵۲۹ = ۱۹۳٫۶۶۱ \text{ keV}$$

$$T_e(\mathrm{L_I}) = ۲۷۹٫۱۹۰ - ۱۵٫۳۴۷ = ۲۶۳٫۸۴۳ \text{ keV}$$

$$T_e(\mathrm{L_{II}}) = ۲۷۹٫۱۹۰ - ۱۴٫۶۹۸ = ۲۶۴٫۴۹۲ \text{ keV}$$

$$T_e(\mathrm{L_{III}}) = ۲۷۹٫۱۹۰ - ۱۲٫۶۵۷ = ۲۶۶٫۵۳۳ \text{ keV}$$

$$T_e(\mathrm{M_I}) = ۲۷۹٫۱۹۰ - ۳٫۷۰۴ = ۲۷۵٫۴۸۶ \text{ keV}$$

شکل ۸.۱۰ طیف الکترون $^{۲۰۳}\mathrm{Hg}$ را نشان می‌دهد. دراین‌شکل طیف پیوستهٔ β وخطوط الکترونی، درانرژیهای محاسبه شده، قابل مشاهده‌اند.

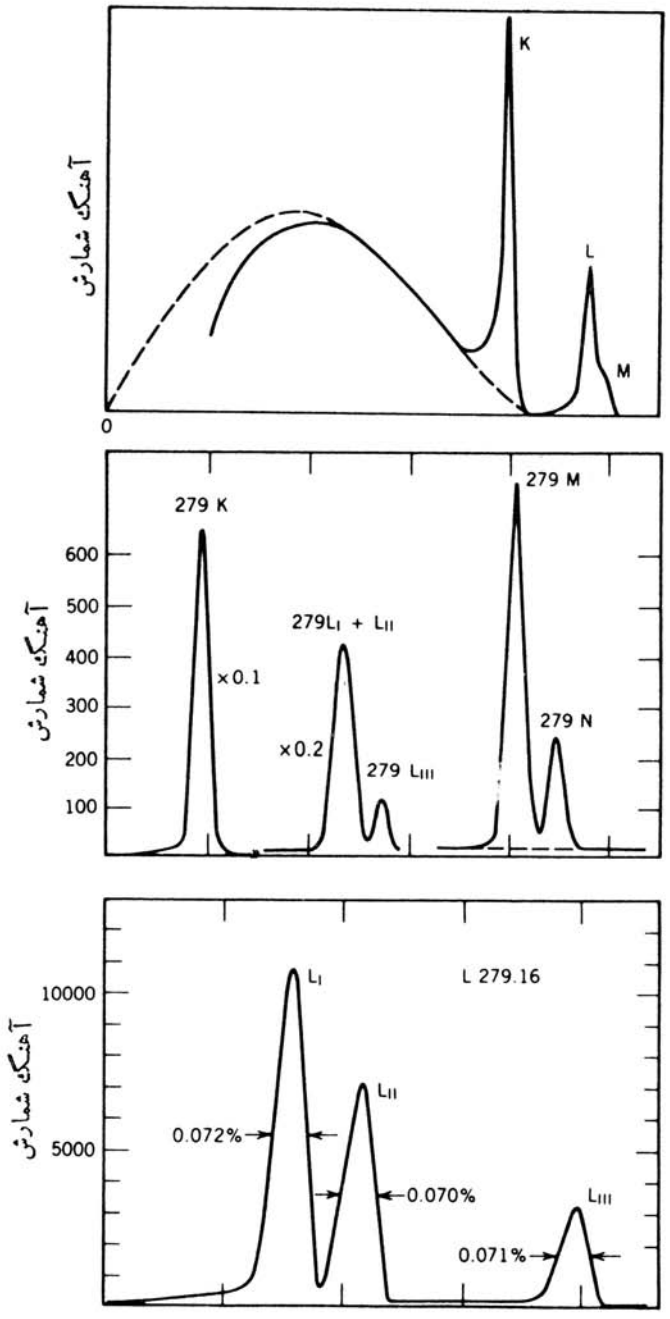
یکی از نکاتی که دراین‌شکل کاملا مشهود است، شدت متغیر الکترونهای تبدیل در واپاشی است. این تغییرات، چنانکه خواهیم دید، به‌خصوصیت چندقطبی میدان تابش بستگی‌دارد؛ درحقیقت، اندازه‌گیری‌احتمالات نسبی گسیل الکترون تبدیلی یکی‌از راههای اصلی‌تعیین مشخصات چندقطبی است.

دربعضی موارد، تبدیل داخلی شدیداً بر تابش γ مرجح است؛ دربقیهٔ موارد ممکن است درمقایسه با گسیل γ کاملا ناچیز باشد. به‌عنوان یك قانون کلی، در محاسبهٔ احتمال گسیل γ باید تصحیح تبدیل‌داخلی انجام‌شود. یعنی‌اگر نیمه‌عمر یك‌تراز خاص رابدانیم، احتمال واپاشی کل λ_t (برابر $۰٫۶۹۳/t_{۱/۲}$) دارای دو مؤلفه است، یکی (λ_γ) ناشی‌از گسیل γ ودیگری (λ_e) ناشی از تبدیل داخلی

$$\lambda_t = \lambda_\gamma + \lambda_e \qquad (۱۹.۱۰)$$

واپاشی تراز از طریق فرایند ترکیبی خیلی سریعتر از گسیل γ به‌تنهایی خواهد بود. بهتر است (چنانکه خواهیم دید) ضریب تبدیل داخلی α را به‌صورت زیر تعریف‌کنیم

$$\alpha = \frac{\lambda_e}{\lambda_\gamma} \qquad (۲۰.۱۰)$$



شکل ۸.۱۰ طیف الکترون حاصل از واپاشی ^{203}Hg. در تصویر بالا، طیف پیوستهٔ β همراه با خطوط تبدیل K، و L و M تفکیک نشده قابل مشاهده است. در تصویر میانی، طیف تبدیل با تفکیک بیشتر نشان‌داده شده است؛ خطوط L و M به‌خوبی‌جداشده‌اند وحتی L_{III} نیز تفکیک شده است. در تفکیک خیلی بهتر شکل‌پایینی، خطوط L_I و L_{II} به‌روشنی ازهم جدا شده‌اند.

دراین‌صورت α احتمال گسیل الکترون را نسبت به گسیل γ نشان می‌دهد، که بزرگی آن از مقادیر بسیار کوچك (تقریباً صفر) تا بسیار بزرگ تغییر می‌کند. بدین‌ترتیب، احتمال کلی واپاشی به‌صورت زیر است

$$\lambda_t = \lambda_\gamma(1+\alpha) \qquad (۲۱.۱۰)$$

اگر α را ضریب تبدیل داخلی کل بدانیم، آنگاه می‌توانیم ضریبهای جزئی مربوط به پوسته‌های اتمی مختلف را به‌صورت زیر درنظر بگیریم

$$\begin{aligned}\lambda_t &= \lambda_\gamma + \lambda_{e,K} + \lambda_{e,L} + \lambda_{e,M} + \cdots \\ &= \lambda_\gamma(1+\alpha_K+\alpha_L+\alpha_M+\cdots)\end{aligned} \qquad (۲۲.۱۰)$$

و درنتیجه

$$\alpha = \alpha_K + \alpha_L + \alpha_M + \cdots \qquad (۲۳.۱۰)$$

البته، با درنظرگرفتن زیرپوسته‌ها، می‌توانیم آن‌را به‌صورت زیر بنویسیم

$$\alpha_L = \alpha_{L_I} + \alpha_{L_{II}} + \alpha_{L_{III}} \qquad (۲۴.۱۰)$$

و برای سایر پوسته‌ها هم می‌توانیم روابط مشابهی بنویسیم.

محاسبهٔ ضرایب تبدیل داخلی، فرایندی مشکل وفراتر ازسطح این کتاب است. درعوض سعی خواهیم کرد تا بعضی از نتایج کلی‌را توجیه و تفاوت این‌محاسبه را با محاسبهٔ مشابه برای گسیل γ نشان دهیم. به‌علت منشأ الکترومغناطیسی این فرایند، جزء ماتریس حاکم بر فرایند با دو استثنا کاملا مشابه معادلهٔ (۹.۱۰) است: حالت‌ابتدایی شامل یك الکترون مقید است، به‌طوری‌که داریم $\psi_i = \psi_{i,N}\psi_{i,e}$ که درآن N نمایندهٔ تابع‌موج هسته و e نمایانگر تابع‌موج الکترون است. همین‌طور $\psi_f = \psi_{f,N}\,\psi_{f,e}$ که در آن $\psi_{f,e}$ تابع موج ذره آزاد $e^{-ik\cdot r_e}$ است. با یك تقریب بسیار خوب، تابع موج اتم تغییرات نسبتاً کمی روی هسته دارد، و می‌توانیم به‌جای $\psi_{i,e}(\mathbf{r}_e)$ مقدار آن‌را در $\mathbf{r}_e = 0$ قرار دهیم. اما نکتهٔ مهم این‌است که کلیهٔ اطلاعات مشخصاً هسته‌ای در تابعهای $\psi_{i,N}$ و $\psi_{f,N}$ نهفته‌اند، وعملگرچندقطبی الکترومغناطیسی یکسانی $m(\sigma L)$ بر گسیل γ وتبدیل داخلی حاکم است. بنابراین، بخش هسته‌ای جزء ماتریس معادلهٔ (۹.۱۰) برای هردو فرایند یکسان است

$$\begin{aligned}\lambda_\gamma(\sigma L) &\propto |m_{fi}(\sigma L)|^2 \\ \lambda_e(\sigma L) &\propto |m_{fi}(\sigma L)|^2\end{aligned} \qquad (۲۵.۱۰)$$

و بدین‌ترتیب، ضریب تبدیل داخلی α، یعنی نسبت λ_e به λ_γ، مستقل از جزئیات ساختار هسته‌ای‌است. ضریب α به‌عدد اتمی، اتمی که فرایند در آن رخ‌می‌دهد، انرژی گذار، وچندقطبی

بودن آن (و بنابراین، به‌طور غیر مستقیم به‌ساختار هسته‌ای آن) بستگی دارد. بدین‌سان می‌توانیم جداول کلی یا منحنیهایی برای مقادیر مختلف Z، T_e، و L داشته باشیم.

در اینجا مطلب را بسیار ساده‌کرده‌ایم، زیرا تابع‌موج الکترون $\psi_{i,e}$ در هسته نفوذ می‌کند و از تابع‌موج ویژهٔ هسته نیز متأثر است، ولی اثر آن برضریب تبدیل بسیار اندك ومعمولا قابل چشمپوشی است.

یك محاسبهٔ نانسبیتی، نتایج آموزندهٔ زیر را برای چند قطبیهای الکتریکی (E) و مغناطیسی (M) به‌دست می‌دهد

$$\alpha(EL)\cong\frac{Z^3}{n^3}\left(\frac{L}{L+1}\right)\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}\right)^4\left(\frac{2m_ec^2}{E}\right)^{L+5/2} \qquad (26.10)$$

$$\alpha(ML)\cong\frac{Z^3}{n^3}\left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}\right)^4\left(\frac{2m_ec^2}{E}\right)^{L+3/2} \qquad (27.10)$$

که در آنها Z عدد اتمی مربوط به‌اتمی است که در آن تبدیل داخلی صورت گرفته است (دختر هسته، درمورد گذارهای پس از واپاشی بتازا) و n عدد کوانتومی اصلی تابع‌موج الکترون مقید است؛ عامل $(Z/n)^3$ ناشی از جملهٔ $|\psi_{i,e}(0)|^2$ است که در آهنگ تبدیل ظاهر می‌شود (تابع‌موجهای هیدروژنی جدول ۵.۲ وجود عامل $(Z/n)^{3/2}$ را در ثابت بهنجارش نشان می‌دهند). عامل بی‌بعد $e^2/4\pi\varepsilon_0\hbar c$ همان ثابت ساختار ریز با مقداری نزدیك به ۱/۱۳۷ است.

این نحوهٔ برخورد با ضرایب تبدیل تقریبی است، زیرا الکترون را باید نسبیتی درنظر گرفت (انرژیهای گذار نوعاً ۰٫۵ تا ۱ MeV هستند، بنابراین شرط $T_e \ll m_ec^2$ حقیقت ندارد) و تابع‌موجهای هستهٔ «نقطه‌ای» کولنی درجدول ۵.۲ اثرات مهمی را که هنگام نفوذ الکترون درهسته رخ می‌دهند، نادیده می‌گیرند. ضرایب تبدیل مبتنی برمحاسبات دقیقتر درجدول پایان‌فصل دیده می‌شوند. اما، این‌عبارات تقریبی‌هم تعدادی ازخصوصیات ضرایب تبدیل را به‌روشنی نشان می‌دهند.

۱. این ضرایب متناسب با Z^3 افزایش می‌یابند، ودرنتیجه فرایند تبدیل درهسته‌های سنگین مهمتر ازهسته‌های سبك‌است. برای مثال، گذار $E2$ با انرژی ۱٫۲۷ MeV در $^{22}_{10}Ne$ دارای $\alpha_K = 6.8\times10^{-6}$ و گذار $E2$ با انرژی ۱٫۲۲ MeV در $^{182}_{74}W$ دارای $\alpha_K = 2.5\times10^{-3}$ است؛ نسبت آنها همان‌طور که انتظار می‌رود برابر $(10/74)^3$ است.

۲. ضریب تبدیل باافزایش انرژی گذار به‌سرعت کاهش می‌یابد. (برعکس، احتمال گسیل γ با افزایش انرژی به‌سرعت افزایش می‌یابد.) برای مثال، درهستهٔ ^{56}Co سه گذار $M1$ با انرژیهای ۱۵۸ keV ($\alpha_K = 0.011$)، ۳۷۰ keV ($\alpha_K = 0.0034$)، و ۸۱۲ keV ($\alpha_K = 0.00025$) وجود دارند، که کاهش آنها همان‌طور که از معادلهٔ (۲۷.۱۰) انتظار می‌رود تقریباً به صورت $E^{-2.5}$ است.

۳. ضرایب تبدیل با افزایش مرتبهٔ چندقطبی به‌سرعت افزایش می‌یابند: درحقیقت، برای مقادیر زیادتر I، گسیل الکترون تبدیل ممکن است بسیار محتملتر از گسیل γ باشد. برای مثال، در ^{99}Tc یك‌گذار $M1$ باانرژی ۱۴۱ keV و $\alpha_K = 0.10$ وجود دارد، درحالی‌که برای گذار $M4$ با انرژی ۱۴۳ keV داریم $\alpha_K = 30$. برمبنای معادلهٔ (۲۷.۱۰) انتظار داریم که نسبت $\alpha_K(143)/\alpha_K(141)$ در حدود $(2m_ec^2/E)^3$ یا حدود ۳۷۰ باشد که با نتیجهٔ مشاهده شده (حدود ۳۰۰) کاملا سازگار است.

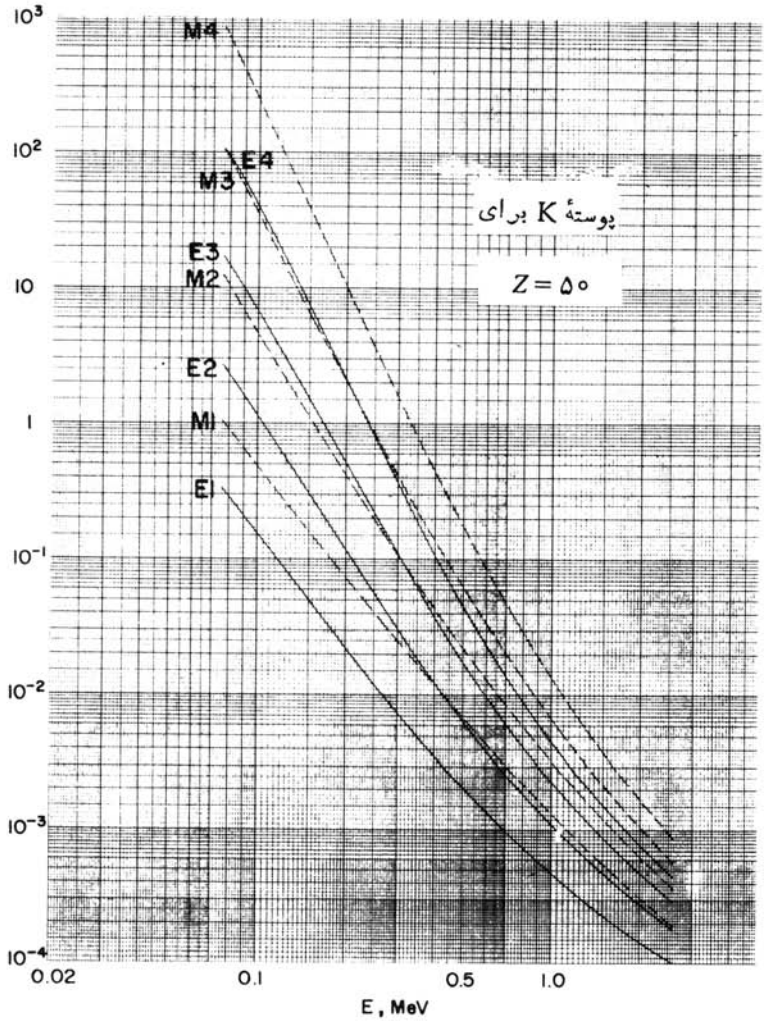
۴. ضرایب تبدیل برای پوسته‌های اتمی بالاتر ($n>1$) متناسب با $1/n^3$ کاهش می‌یابد. بنابراین، برای یك‌گذار معین به‌تقریب می‌توان انتظار داشت که $\alpha_K/\alpha_L \simeq 8$ باشد. استفاده از تابع‌موجهای صحیح الکترون سبب‌تغییر قابل‌ملاحظه دراین براوردمی‌شود، ولی بسیاری‌از مقادیر تجربی α_K/α_L در گسترهٔ ۳ تا ۶ قرار می‌گیرند و بنابراین‌حتی دراین‌مورد هم براورد ما قابل‌استفاده است.

بنابراین‌انتظار داریم که درهسته‌های سنگین برای گذارهای کم انرژی و چندقطبیهای مرتبهٔ‌بالا باضرایب تبدیل نسبتاً بزرگ پوستهٔ K، ودرسایر موارد (پوسته‌های اتمی‌بالاتر، انرژیهای گذار بیشتر، هسته‌های سبکتر و چندقطبیهای مرتبهٔ پایینتر) با مقادیر کوچکتر روبه‌رو شویم.

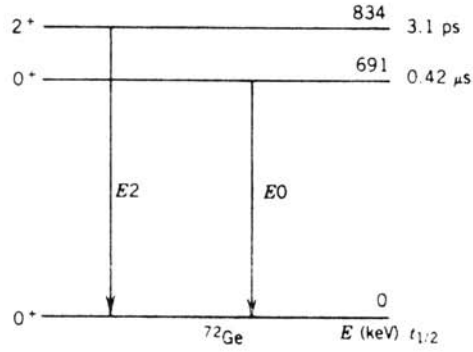
درحالی‌که از این براوردها مقادیر کیفی معقولی عاید می‌شود، برای مقایسهٔ کمی نتایج نظری و تجربی باید با استفاده از تابع‌موجهای اتمی مناسب و محاسبات تفصیلی ضرایب تبدیل را به‌دست‌آورد. شکل ۹.۱۰ برخی از نتایج این‌محاسبات‌را نشان‌می‌دهد. خاطرنشان می‌شود که ضرایب مربوط به گذارهای EL و ML به‌طورقابل‌ملاحظه‌ای باهم تفاوت دارند؛ بنابراین‌بااندازه‌گیری α می‌توانیم‌پاریتهٔ نسبی‌حالات هسته‌ای راتعیین‌کنیم.

در یك‌کاربرد دیگر هم استفاده از تبدیل داخلی نقش حیاتی دارد، وآن مشاهدهٔ گذارهای $E0$ است‌که از طریق تابش الکترومغناطیسی ممنوع‌اند، زیراگشتاور تك‌قطبی هسته (یعنی بارآن) نمی‌تواند به نقاط خارج از هسته تابش کند. گذار $E0$ مخصوصاً در واپاشیهای از حالات اولیهٔ 0^+ به‌حالات نهایی 0^+ که با هیچ فرایند مستقیم دیگری امکان‌پذیر نیست، حائزاهمیت است. دراین‌مورد می‌توانیم هسته را به‌صورت کرهٔ‌کروی باردار متقارن درنظر بگیریم؛که تنها حرکت ممکن درآن به‌صورت تپش است‌که میدان الکتریکی‌را درنقاط خارج از کره تغییر نمی‌دهد ودرنتیجه‌تابشی‌تولیدنمی‌کند.تابع‌موجهای الکترونیی‌که درحوالی $r=0$ به‌صفر میل‌نمی‌کنند (یعنی حالات s) می‌توانند تحت‌تأثیر پتانسیل‌متغیردرون‌هستهٔ‌تپنده‌قرار گیرند، وبدین‌سان‌انتقال‌انرژی‌به‌الکترون‌امکان‌پذیرمی‌شود.

به‌علت‌گسیل‌نشدن‌پرتوهای γ، تعریف‌ضریب‌تبدیل (وقتی $\lambda_\gamma = 0$ باشد، α بینهایت است) امکان‌پذیر نیست. می‌توانیم مورد خاصی را درنظر بگیریم‌که در آن واپاشی با نمودار تراز ^{72}Ge صورت می‌گیرد که در شکل ۱۰.۱۰ نشان‌داده شده است. حالت برانگیختهٔ 0^+ با تبدیل $E0$ و با نیمه‌عمر ۰٫۴۲ μs به‌حالت پایه واپاشیده‌می‌شود. حالت



شکل ۹.۱۰ ضرایب تبدیل داخلی پوستهٔ K برای $Z=۵۰$.



شکل ۱۰.۱۰ ترازهای انرژی در ^{۷۲}Ge.

مجاور 2^+ می‌تواند با گسیل γ بسیار سریعتر واپاشیده شود؛ ضریب تبدیل داخلی برای آن واپاشی فقط درحدود $۴٫۹ \times ۱۰^{-۴}$ است. مقایسهٔ این آهنگها که متضمن برآورد اجزای ماتریس هسته‌ای است (زیرا نمی‌توانیم نسبت λ_e/λ_γ را برای گذار $E0$ درنظر بگیریم، اجزای ماتریس آن حذف نمی‌شوند)، می‌تواند اطلاعاتی درمورد ساختار داخلی حالت برانگیختهٔ 0^+ دراختیار ما بگذارد.

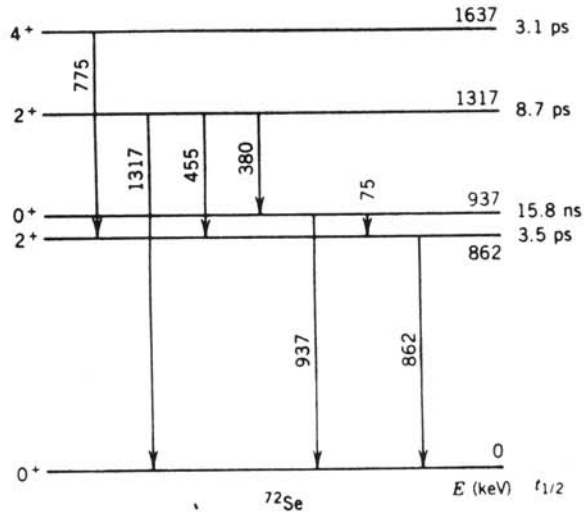
۷.۱۰ طول عمرهای گسیل γ

درفصل ۷، روشهای اندازه‌گیری نیمه‌عمرهای حالات برانگیخته را مورد بحث قرار دادیم. یك مورد استفادهٔ اولیهٔ این مقادیر تجربی، مقایسهٔ آنها با مقادیر نظری مبتنی بر مدلهای مختلف هسته‌ای است. از مقایسهٔ مقادیر محاسبه شدهٔ مختلف با مقادیر تجربی، می‌توانیم اطلاعاتی درمورد ساختار هسته به‌دست آوریم.

قبل از انجام این کار، ابتدا باید آهنگ واپاشی جزئی گسیل گاما را همانند آنچه در پایان بخش ۵.۶ دیدیم، برآورد کنیم. نمونهٔ واپاشی نشان‌داده شده در شکل ۱۱.۱۰ را درنظر می‌گیریم. نیمه‌عمر تراز ۱۳۱۷ keV برابر ۸٫۷ ps اندازه‌گیری شده است. بنابراین، ثابت واپاشی کل آن عبارت است از

$$\lambda_t = \frac{۰٫۶۹۳}{t_{1/2}} = \frac{۰٫۶۹۳}{۸٫۷ \times ۱۰^{-۱۲}\,\mathrm{s}} = ۸٫۰ \times ۱۰^{۱۰}\,\mathrm{s}^{-۱}$$

این آهنگ واپاشی درست برابر مجموع آهنگهای واپاشی متناظر به‌سه گذار تخلیه‌کنندهٔ تراز



شکل ۱۱.۱۰ ترازهای انرژی در ^{۷۲}Se.

مورد بحث است

$$\lambda_t = \lambda_{t,\,۱۳۱۷} + \lambda_{t,۴۵۵} + \lambda_{t,۳۸۰}$$

$$= \lambda_{\gamma,۱۳۱۷}(۱+\alpha_{۱۳۱۷}) + \lambda_{\gamma,۴۵۵}(۱+\alpha_{۴۵۵}) + \lambda_{\gamma,۳۸۰}(۱+\alpha_{۳۸۰})$$

ضرایب تبدیل را می‌توان از مراجع استاندارد به دست آورد (در این مورد، ضرایب اندازه‌گیری نشده‌اند). این ضرایب به‌اندازهٔ کافی کوچك هستند (کوچکتر از ۰٫۰۱) به‌طوری که با دقتی که در این محاسبه وجود دارد، می‌توان از آنها (درمقایسه با ۱) چشمپوشی کرد. بنابراین داریم

$$\lambda_t = \lambda_{\gamma,۱۳۱۷} + {}_{\gamma,۴۵۵} + \lambda_{\gamma,۳۸۰}$$

از اندازه‌گیری شدتهای نسبی این سه پرتو γ نتایج زیر حاصل شده‌اند

$$\lambda_{\gamma,۱۳۱۷} : \lambda_{\gamma,۴۵۵} : \lambda_{\gamma,۳۸۰} = ۵۱ : ۳۹ : ۱۰$$

بنابراین آهنگهای واپاشی جزئی برای این سه پرتو γ عبارت‌اند از

$$\lambda_{\gamma,۱۳۱۷} = ۰٫۵۱(۸٫۰ \times ۱۰^{۱۰}\mathrm{s}^{-۱}) = ۴٫۱ \times ۱۰^{۱۰}\mathrm{s}^{-۱}$$

$$\lambda_{\gamma,۴۵۵} = ۰٫۳۹(۸٫۰ + ۱۰^{۱۰}\mathrm{s}^{-۱}) = ۳٫۱ \times ۱۰^{۱۰}\mathrm{s}^{-۱}$$

$$\lambda_{\gamma,۳۸۰} = ۰٫۱۰(۸٫۰ \times ۱۰^{۱۰}\mathrm{s}^{-۱}) = ۰٫۸۰ \times ۱۰^{۱۰}\mathrm{s}^{-۱}$$

این آهنگهای جزئی تابش γ را می‌توان بامقادیر محاسبه‌شده، مانند براوردهای وایسکوف از معادلهٔ (۱۳.۱۰)، مقایسه کرد. مقادیر انتظاری $\lambda(E۲)$ را محاسبه می‌کنیم

$$\lambda_{E۲,۱۳۱۷} = ۸٫۷ \times ۱۰^{۱۰}\mathrm{s}^{-۱}$$

$$\lambda_{E۲,۴۵۵} = ۴٫۳ \times ۱۰^{۸}\mathrm{s}^{-۱}$$

$$\lambda_{E۲,۳۸۰} = ۱٫۷ \times ۱۰^{۸}\mathrm{s}^{-۱}$$

درمورد تراز ۹۳۷ keV ($t_{۱/۲} = ۱۵٫۸\ \mathrm{ns}$) نیز می‌توان به‌همین ترتیب عمل کرد

$$\lambda_t = \frac{۰٫۶۹۳}{۱۵٫۸\ \mathrm{ns}} = ۴٫۳۹ \times ۱۰^{۷}\mathrm{s}^{-۱}$$

$$\lambda_t = \lambda_{t,۹۳۷} + \lambda_{t,۷۵} = \lambda_{e,۹۳۷} + \lambda_{\gamma,۷۵}(۱+\alpha_{۷۵})$$

زیرا گذار ۹۳۷ keV از نوع $E۰$ و $۰ \to ۰$ است که در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت. ضریب تبدیل کل گذار ۷۵ keV در حدود ۲٫۴ است (با استفاده از جداول یا نمودارها). به‌طور تجربی می‌دانیم که $\lambda_{\gamma,۷۵} : \lambda_{e,۹۳۷} = ۷۳ : ۲۷$ است و درنتیجه داریم

$$\lambda_{۹۳۷,۶} = ۴٫۳ \times ۱۰^{۶} s^{-۱}$$

$$\lambda_{۷۵,۷} = ۱٫۱۶ = ۱۰^{۷} s^{-۱}$$

بالاخره، برای گذار ۸۶۲ keV به‌دست می‌آوریم

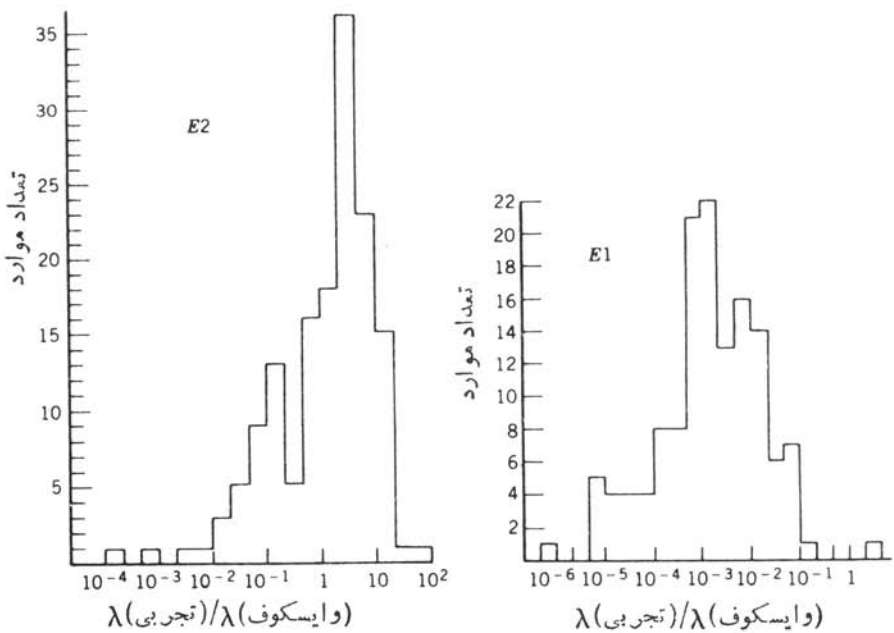
$$\lambda_{۸۶۲,۷} = ۲٫۰ \times ۱۰^{۱۱} s^{-۱}$$

با استفاده از براوردهای وایسکوف، مقادیر محاسبه شده عبارت‌اند از

$$\lambda_{E۲,۷۵} = ۵٫۲ \times ۱۰^{۴} s^{-۱}$$

$$\lambda_{E۲,۸۶۲} = ۱٫۰ \times ۱۰^{۱۰} s^{-۱}$$

نتیجه‌ای که از این محاسبات به‌دست می‌آید نشان می‌دهد که آهنگ گذارهای اندازه‌گیری‌شده معمولا یك مرتبهٔ بزرگی از براوردهای وایسکوف برای گذارهای $E۲$ بزرگتر است. این مطلب، شاهدی قوی بر ویژگیهای جمعی ساختار هسته‌ای است که در فصل ۵ بحث شد. براوردهای وایسکوف براین‌فرض استوارندکه گذار از حرکت یك تك نوکلئون حاصل می‌شود، واین‌حقیقت که این مقادیر بسیار کوچك هستند نشان می‌دهد که نوکلئونهای بسیاری در گذار شرکت دارند. نتایج مشابهی را برای گذارهای متعدد $E۲$ در شکل ۱۲.۱۰ نشان‌داده‌ایم، و چنانکه دیده می‌شود، این تشدید یا شتاب‌گیری



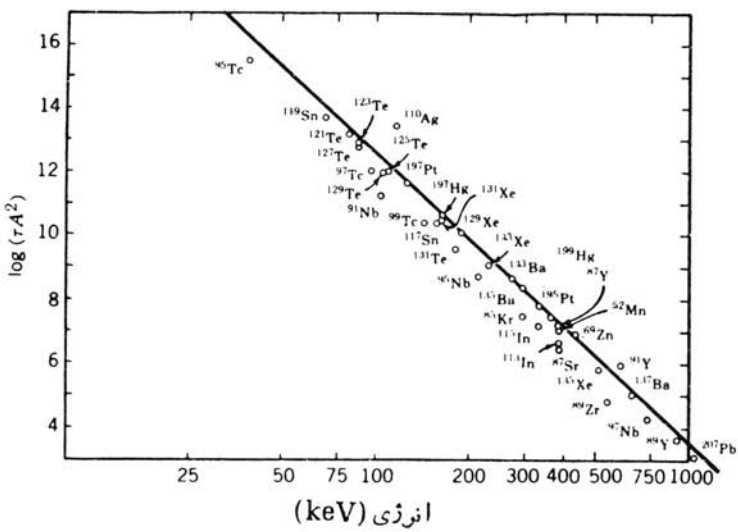
شکل ۱۲.۱۰ نمایش گذارهای $E۱$ و $E۲$. این شکلها نمایش تغییرات تعداد موارد را برحسب نسبت آهنگ واپاشی مشاهده‌شده به‌مقدار محاسبه شدهٔ مبتنی بر فرمول وایسکوف نشان‌می‌دهند.

آهنگ گذار تك ذره‌ای $E2$، خصوصیتی کاملا فراگیر است. این اثر برای گذارهای $E1$ که معمولا کندتر از آهنگهای تك ذره‌ای هستند، رخ نمی‌دهد. ازطرف دیگر، شکل ۱۳.۱۰ را درنظر بگیرید که رفتار منظم $M4$ را نشان می‌دهد. دراین‌مورد، سازگاری بین‌نظریه وتجربه عالی است.

۸.۱۰ طیف‌نمایی پرتو گاما

مطالعهٔ تابشهای گامای گسیل‌شده‌ازچشمه‌های‌رادیواکتیو یکی‌از وسایل‌اولیهٔ شناخت ساختار حالات برانگیختهٔ هسته‌ای است. آشکارسازی پرتوگاما کار نسبتاً آسانی‌است که می‌توان آن‌را باتفکیك خوب(گذارهای بافاصلهٔ کم ۲keV را می‌توان‌به‌آسانی باآشکارسازهای خوب γ از هم جداکرد) و دقت زیاد (با خطاهای چند eV در موارد عادی و چند دهم الکترون ولت در بهترین موارد) انجام داد. اطلاعات مربوط به مواضع و خصوصیات حالات برانگیخته برای ارزیابی محاسبات مبتنی‌بر مدلهای هسته‌ای ضروری است، و طیف‌نمایی پرتو γ مستقیم‌ترین، دقیقترین، و غالباً آسانترین راه برای به‌دست‌آوردن این اطلاعات است.

طرزکارآزمایشهای «ایده‌آل» پرتو γ را در به‌دست آوردن اطلاعات لازم برای حالات برانگیختهٔ هسته‌ای بررسی می‌کنیم:



شکل ۱۳.۱۰ نمایش گذارهای $M4$. اطلاعات برحسب عمر متوسط (عکس ثابت واپاشی λ) رسم شده است. خط مستقیم از معادلهٔ (۱۵.۱۰) به‌دست‌آمده است. مخصوصاً به سازگاری خوب نقاط تجربی ومقادیر انتظاری توجه کنید.

۱. طیف پرتوهای γ انرژی وشدت گذارها را نشان می‌دهد.
۲. اندازه‌گیری همفرودی، شواهدی ازچگونگی ترتیب این گذارها بین‌حالات برانگیخته به‌دست می‌دهند.
۳. اندازه‌گیری ضرایب تبدیل داخلی، شواهدی از خصوصیت تابش و اسپین وپاریته‌های نسبی‌حالات اولیه ونهایی به‌دست می‌دهد. شواهد بیشتر را می‌توان از توزیع‌زاویه‌ای واندازه‌گیریهای همبستگی به‌دست آورد.
۴. با تعیین نیمه‌عمر ترازها می‌توان احتمالات مطلق گذار را به‌دست آورد.

به‌عنوان اولین‌مثال، واپاشی $^{108m}Ag(t_{1/2}=127\,y)$ را درنظر می‌گیریم. شکل ۱۴.۱۰ طیفهای الکترون وپرتو γ را نشان‌می‌دهد، وشدتهای نسبی γ والکترون درجدول ۱.۱۰ آمده است.

اولین‌حالت برانگیختهٔ ^{108}Pd باتوجه به‌واکنشهای‌هسته‌ای‌زیادی که‌مطالعه شده‌اند، مانند اغلب هسته‌های Z زوج و N زوج، یك حالت 2^+ با انرژی $434\,keV$ است. بنابراین، گذار $434\,keV$ را که درجدول ۱.۱۰ نشان‌داده شده است نمایندهٔ واپاشی این‌حالت‌درنظرمی‌گیریم وفرض‌می‌کنیم که‌این گذار یك گذارخالص $E2$، یعنی $2^+ \to 0^+$، است. از جداول ضریب تبدیل، می‌توانیم مقدار نظری ضرایب تبدیل را به صورت $\alpha_K(434)=7.89\times10^{-3}$ و $\alpha_{L+M+\dots}=1.0\times10^{-3}$ تعیین‌کنیم. با استفاده از جدول ۱.۱۰، ضرایب تبدیل باقیمانده را می‌توان به‌طریق زیر تعیین‌کرد

$$\alpha_K(434)=\frac{I_K(434)}{I_\gamma(434)}$$

$$\alpha_K(614)=\frac{I_K(614)}{I_\gamma(614)}$$

که درآن I نمایندهٔ شدتهای موجود درجدول است.

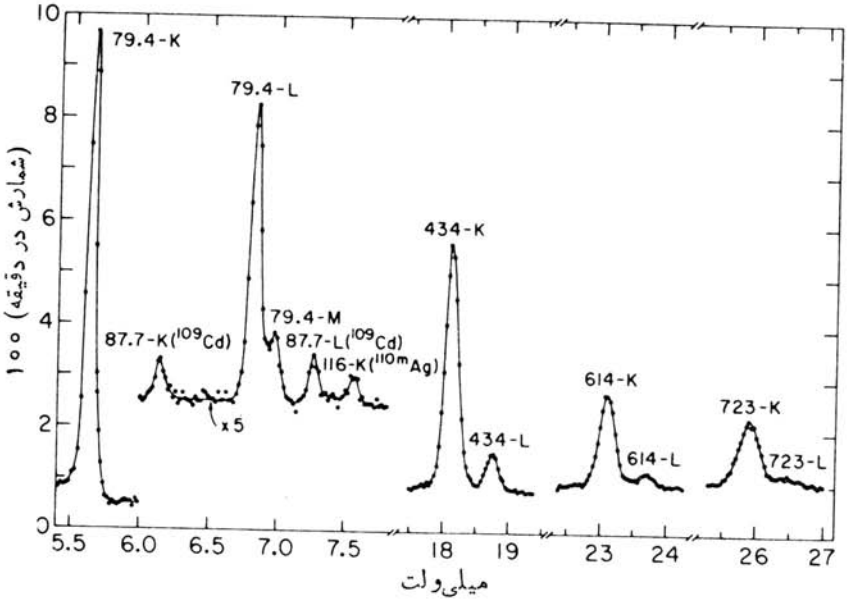
ازآنجاکه به‌جای شدتهای مطلق، شدتهای نسبی را دراختیار داریم، نسبتهای‌زیر را تشکیل می‌دهیم

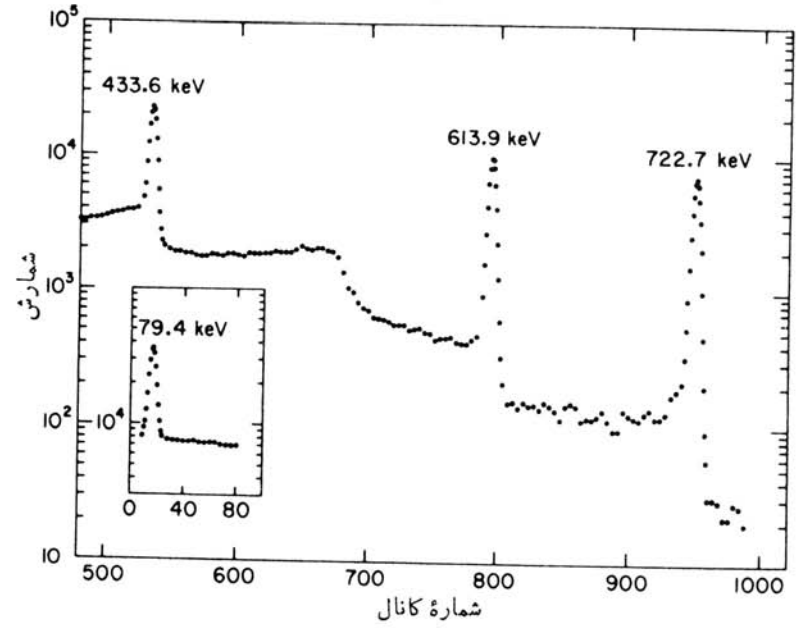
$$\frac{\alpha_K(614)}{\alpha_K(434)}=\frac{I_K(614)}{I_K(434)}\cdot\frac{I_\gamma(434)}{I_\gamma(614)}$$

$$\alpha_K(614)=\alpha_K(434)\cdot\frac{I_K(614)}{I_K(434)}\cdot\frac{I_\gamma(434)}{I_\gamma(614)}$$

$$=7.89\times10^{-3}\cdot\frac{38\pm3}{100}\cdot\frac{100}{103\pm3}$$

$$=(2.83\pm0.24)\times10^{-3}$$

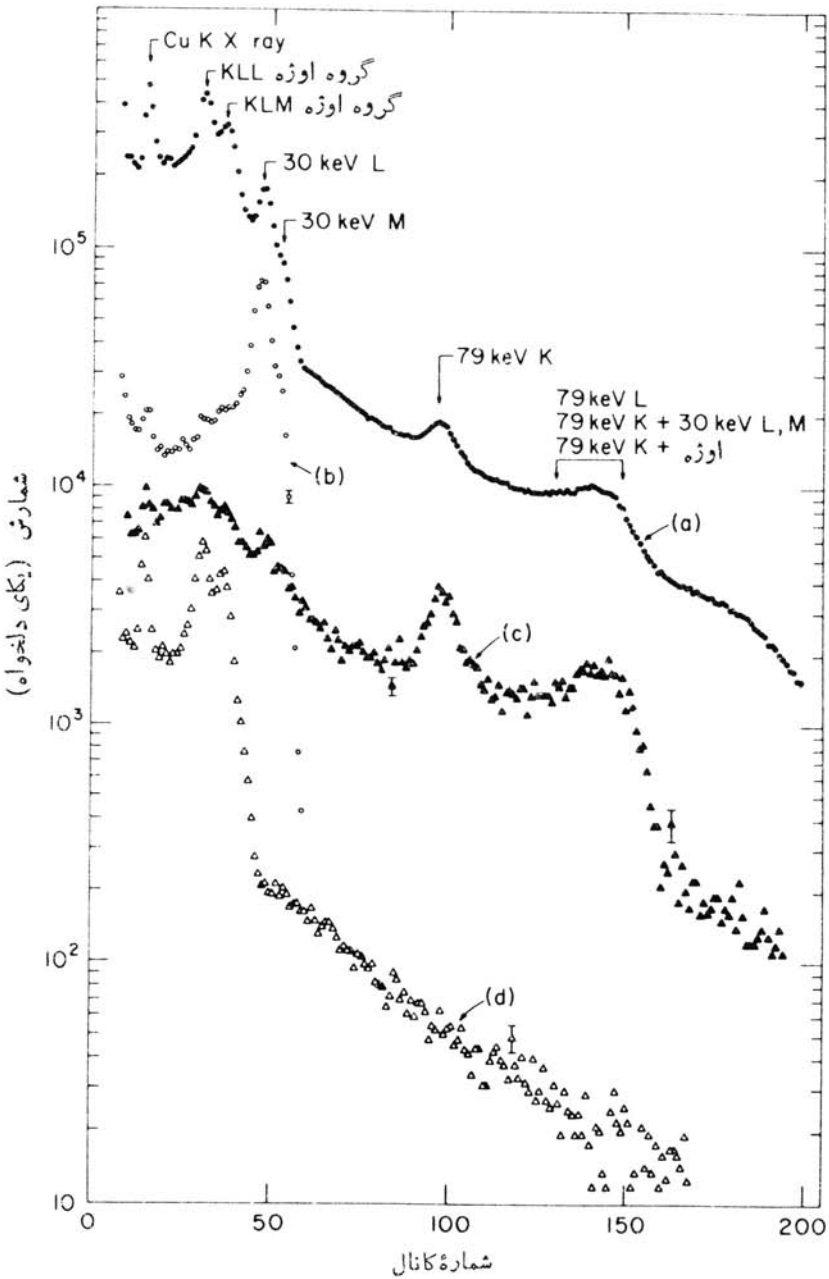




شکل ۱۴.۱۰ طیفهای پرتوگاما (پایین) و الکترون تبدیل (بالا) ناشی از واپاشی ^{108m}Ag. طیف γ با یك آشکارساز Ge(Li) به‌دست آمده است. طیف الکترون که با طیف‌سنج مغناطیسی به‌دست آمده است، از توان تفکیك کافی برای جداسازی خطوط K و L برخوردار است.

جدول ۱۰۱۰ شدتهای الکترون تبدیل وپرتو γ درگذارهای ناشی از واپاشی ^{108m}Ag.

انرژی گذار (keV)	شدت نسبی γ	شدت نسبی الکترون	ضرایب تبدیل ($\times 10^{-3}$)	
			تجربی	نظری
۷۹٫۲	۷٫۳±۰٫۸	۲۰۴±۱۰(K)	۲۲۰±۲۶	۲۷۰(E۱), ۷۱۰(M۱), ۲۴۰۰(E۲)
		۲۵±۲(L)	۲۷±۴	۳۴(E۱), ۸۸(M۱), ۷۷۷(E۲)
۴۳۴٫۰	≡۱۰۰	≡۱۰۰(K)	≡۷٫۸۹	۷٫۸۹(E۲)
		۱۴٫۸±۲٫۳(L+...)	۱٫۱۷±۰٫۱۸	۱٫۰۲(E۲)
۶۱۴٫۴	۱۰۴±۳	۳۷±۳(K)	۲٫۸۳±۰٫۲۴	۱٫۰۳(E۱), ۳٫۰۱(M۱), ۲٫۹۲(E۲)
		۵٫۱±۱٫۶(L+...)	۰٫۳۹±۰٫۱۲	۰٫۱۲(E۱), ۰٫۳۵(M۱), ۰٫۳۶(E۲)
۶۳۲٫۹	۰٫۱۶±۰٫۰۲			
۷۲۴٫۰	۱۰۲±۳	۲۵٫۰±۱٫۲(K)	۱٫۹۳±۰٫۱۱	۰٫۷۲(E۱), ۲٫۰۶(M۱), ۱٫۹۱(E۲)
		۴٫۶±۰٫۸(L+...)	۰٫۳۵±۰٫۰۶	۰٫۰۸(E۱), ۰٫۲۴(M۱), ۰٫۲۳(E۲)



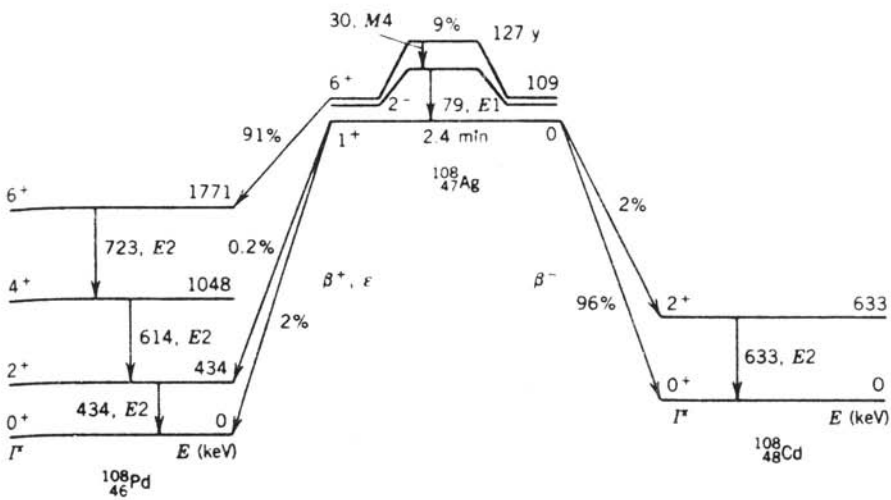
شکل ۱۵.۱۰ طیفهـای همفرودی در واپـاشی ^{108m}Ag. (الف) طیف منفرد بـرای مقایسه. (ب) طیف همفرود با پرتوگامای ۷۹ keV. (ج) طیف همفرود با پرتوهای ایکس K. (د) طیف همفرود با پرتوهای گامای ۴۳۴، ۶۱۴، و ۷۲۳ keV.

با روشی مشابه، می‌توان ضرایب تبدیل باقیمانده را به‌صورتی که درجدول ۱۰.۱۰ آمده است محاسبه کرد، وسپس بااستفاده ازآنها مقادیر نظری را به‌دست آورد که این مقادیرهم درجدول نشان‌داده شده‌اند.

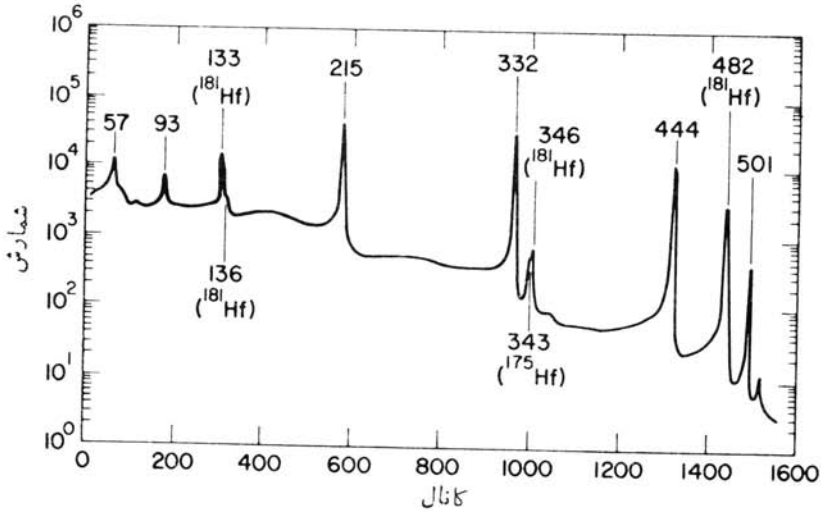
گذارهای ۶۱۴ و۷۲۳ keV یا از نوع $M1$ هستندیا $E2$، ولی باتوجه به‌ضرایب تبدیل نمی‌توان دراین‌مورد قاطعانه اظهارنظر کرد، زیرا درعمل (برای این عدد اتمی و گسترهٔ انرژی γ) مقادیر $M1$ و $E2$ تقریباً باهم برابرند.

اطلاعات بیشتر را می‌توان از آزمایشهای همفرودی که نتایجشان در شکل ۱۵.۱۰ نشان داده شده‌اند، به‌دست آورد. در انتهای کم‌انرژی طیف الکترون، گذار دیگری با انرژی ۳۰٫۴keV دیده می‌شود؛ شدت آن برای مشاهده بسیار کم است ولی با توجه به‌شدت نسبی زیرپوسته‌های $L_{\mathrm{I}}/(L_{\mathrm{II}}+L_{\mathrm{III}})$ نتیجه می‌گیریم که این گذار از نوع $M4$ است. این گذار و گذار ۷۹٫۲ keV هیچکدام با گذارهای ۴۳۴، ۶۱۴ یا ۷۲۳ keV همفرود نیستند. این‌مطلب قویاً براین نکته‌دلالت داردکه گذارهای ۳۰٫۴ و۷۹٫۲ keV درپی واپاشی ایزومری ^{108}Ag اتفاق می‌افتند. بعلاوه، ارتباط همفرودی بین گذارهای ۴۳۴، ۶۱۴، و ۷۲۳ keV حاکی از توالی این‌گذارهاست.

نمودار واپاشی حاصل از این اطلاعات (و اطلاعات دیگر) درشکل ۱۶.۱۰ نشان داده شده‌است. اسپین ترازهای ۱۰۸۴ و ۱۷۷۱ keV از اندازه‌گیری همبستگی‌زاویه‌ای و قطبش خطی به‌دست آمده است و درنتیجه معلوم شده است که گذارها دارای قطبیت $E2$ هستند. همچنین‌استنباط می‌شود که گذار ۶۳۳keV در ^{108}Cd صورت می‌گیرد و باید درپی



شکل ۱۶.۱۰ نمودار واپاشی ^{108}Ag. ایزومر ۱۲۷ساله در ۹۱٪ موارد با واپاشی بتازا و در ۹٪ موارد با گسیل پرتوهای γ واپاشیده می‌شود. نسبتهای انشعاب واپاشی بتازای حالت پایه با نیمه‌عمر ۲٫۴ min نیز نشان‌داده شده است.



شکل ۱۷.۱۰ طیف پرتوگامای ناشی از واپاشی ^{180m}Hf. نمونهٔ رادیواکتیو با فعالسازی نوترونی ساخته شده است که سایر ایزوتوپهای Hf را هم تولید می‌کند؛ پرتوهای گامای ناشی از این ایزوتوپها مشخص شده‌اند.

واپاشی حالت پایهٔ ^{108}Ag اتفاق بیفتد. (درغیراین‌صورت، واپاشی بتازا به‌شکل $6^+ \rightarrow 2^+$ درمی‌آید که با توجه به‌ممنوعیت چهارم آن احتمال مشاهدهٔ بسیار ضعیفی خواهد داشت.)

حالت ایزومری ۱۲۷ ساله در ۹۱٪ موارد ازطریق واپاشی مجاز بتازا به‌حالت 6^+ در ^{108}Pd می‌رسد، واین‌حالت سپس از طریق سه‌گذار متوالی واپاشیده می‌شود. به‌علت ناچیز بودن‌تغذیهٔ بتای ترازهای 4^+ یا 2^+ (تراز 2^+ فقط با ۲٫۵درصد از ۹٪ واپاشیها تغذیه می‌شود)، شدت کل (حاصل‌جمع شدتهای گاما والکترون) این سه‌گذار باید با هم مساوی شود که اطلاعات جدول ۱.۱۰ مؤید این مطلب است. حالت پایهٔ ^{108}Ag ازطریق چهار انشعاب مجاز مختلف β با نیمه‌عمر min ۲٫۴ واپاشیده می‌شود.

به‌عنوان دومین مثال، واپاشی ایزومری ^{180m}Hf را در نظر می‌گیریم. طیف پرتو گامای‌آن درشکل ۱۷.۱۰ و شدتهای گاما و ضرایب تبدیل استنتاج شده درجدول ۲.۱۰ نشان‌داده شده‌اند. ضرایب‌تبدیل گذارهای ۹۳، ۲۱۵، ۳۳۲، و keV ۴۴۳ قویاً نشاندهندهٔ قطبیت $E2$ هستند، درحالی که گذارهای ۵۷ و keV ۵۰۱ به‌ترتیب به‌قطبیتهای $E1$ و $E3$ دلالت می‌کنند.

ازآنجاکه ^{180}Hf یك هستهٔ Z زوج و N زوج است، انتظار داریم که اولین حالت برانگیخته یك‌حالت 2^+ باشد وچنین‌حالتی بااستفاده ازآزمایشهای مختلف در انرژی keV ۹۳ مشخص شده است. در این ناحیه، در انتظار دنبالهٔ حالتهای دورانی 0^+، 2^+، 4^+، 6^+،... بافاصلهٔ مشخصهٔ $I(I+1)$ هستیم، وبنابراین می‌توانیم درجستجوی یك‌حالت 4^+ باانرژی معادل ۱۰/۳ انرژی حالت 2^+ یا keV ۳۱۰، و یك گذار $4^+ - 2^+$ با

جدول ۲.۱۰ واپاشیهای گامازای ^{180m}Hf.

انرژی گذار (keV)	شدت نسبی γ	ضریب تبدیل: تجربه (پوستهٔ اتمی)	ضریب تبدیل: نظریه (چندقطبی)
۵۷٫۵	۵۱٫۳ ± ۱٫۲	۰٫۴۳۰ ± ۰٫۰۲۹(L)	۰٫۴۵۲(E۱)
		۰٫۰۸۳ ± ۰٫۰۰۷(M)	۰٫۱۰۵(E۱)
		۰٫۰۲۳ ± ۰٫۰۰۴(N+...)	۰٫۰۳۱(E۱)
۹۳٫۳	۱۷٫۶ ± ۰٫۴	≡۱٫۱۰(K)	۱٫۱۰(E۲)
		۳٫۱۳ ± ۰٫۱۹(L)	۲٫۷۲(E۲)
		۰٫۹۱ ± ۰٫۱۱(M+...)	۰٫۸۵(E۲)
۲۱۵٫۳	۸۶٫۲ ± ۰٫۸	۰٫۱۲۳ ± ۰٫۰۰۹(K)	۰٫۱۴(E۲)
		۰٫۰۷۷ ± ۰٫۰۱۱(L)	۰٫۰۷۱(E۲)
۳۳۲٫۳	≡۱۰۰٫۰ ± ۱٫۰	۰٫۰۳۸ ± ۰٫۰۰۳(K)	۰٫۰۴۲(E۲)
		۰٫۰۱۵ ± ۰٫۰۰۲(L)	۰٫۰۱۳(E۲)
۴۴۳٫۲	۸۷٫۷ ± ۱٫۶	۰٫۰۱۸۹ ± ۰٫۰۰۱۷(K)	۰٫۰۲۰(E۲)
		۰٫۰۰۴۴ ± ۰٫۰۰۰۷(L)	۰٫۰۰۵(E۲)
۵۰۰٫۷	۱۵٫۴ ± ۰٫۴	۰٫۰۳۷ ± ۰٫۰۱۲(K)	۰٫۱۲۴(M۲), ۰٫۰۳۸(E۳)
		۰٫۰۱۶ ± ۰٫۰۰۵(L)	۰٫۰۶۲(M۲), ۰٫۰۱۶(E۳)

انرژی ۲۱۷ keV = ۹۳ − ۳۱۰ باشیم. این گذار، احتمالا همان گذار $E۲$ با انرژی ۲۱۵ keV است که درطیف γ مشاهده می‌شود. انرژی انتظاری حالت ۶^+ در ۶۵۱ keV است، و گذار $۶^+ - ۴^+$ باید دارای انرژی ۳۴۱ keV = ۳۱۰ − ۶۵۱ باشد که می‌توان آن‌را با گذار مشاهده شدهٔ ۳۳۲ keV یکسان گرفت. انتظار داریم که انرژی حالت ۸^+ برابر ۱۱۱۶ keV باشد، وحدس می‌زنیم که مقدار مشاهده‌شدهٔ ۴۴۳ keV به گذار $۸^+ - ۶^+$ (۴۶۵ keV = ۶۵۱ − ۱۱۱۶) مربوط شود. برای تعیین جایگاه گذارهای ۵۷ و

۵۰۱ keV، انرژی حاصل جمع ۵۰۰٫۷ = ۴۴۳٫۲ + ۵۷٫۵ را موردتوجه قرارمی‌دهیم که قویاً دال‌بر وجود ترازی باانرژی ۵۷٫۵ keV بالاتر از حالت 8^+ است که می‌تواند هر دو گذار ۵۷٫۵ و ۵۰۰٫۷ keV را گسیل کند. به این ترتیب، گذار ۵۰۰٫۷ keV به‌موازات توالی ۴۴۳٫۲ keV + ۵۷٫۵ مستقیماً به‌حالت 6^+ منجرمی‌شود. برای آزمودن این فرض، شدت کل گذارها راکه طبق معادلهٔ (۲۱.۱۰) از رابطهٔ $I_T = I_\gamma(1+\alpha)$ به‌دست می‌آید بررسی می‌کنیم، که درآن α ضریب تبدیل کل (یا حاصل‌جمع ضرایب تبدیل منفرد) است. با استفاده از اطلاعات جدول ۲.۱۰ شدتهای نسبی زیر را می‌توان محاسبه کرد

$$I_T(۵۷٫۵) = ۸۷٫۱ \pm ۲٫۹ \qquad I_T(۳۳۲٫۳) = ۱۰۵٫۳ \pm ۱٫۱$$

$$I_T(۹۳٫۳) = ۱۰۸٫۱ \pm ۴٫۸ \qquad I_T(۴۴۳٫۲) = ۸۹٫۷ \pm ۱٫۶$$

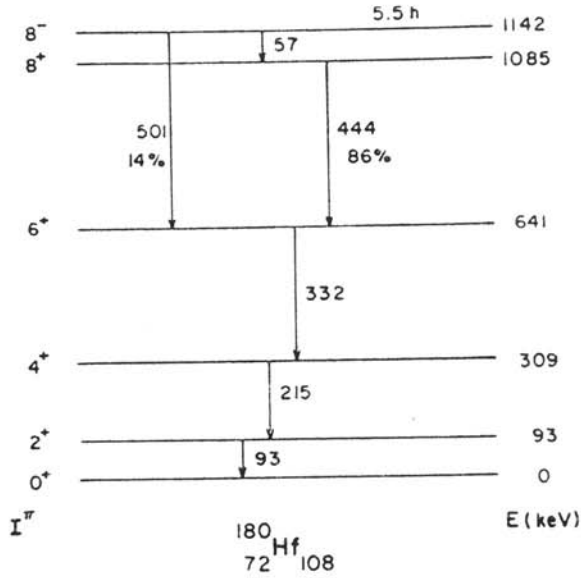
$$I_T(۲۱۵٫۳) = ۱۰۳٫۴ \pm ۱٫۰ \qquad I_T(۵۰۰٫۷) = ۱۶٫۲ \pm ۰٫۴$$

توجه کنید که درمحدودهٔ خطاهای موجود، همان‌طور که درمورد گذارهای متوالی انتظار داریم، $I_T(۹۳٫۳) = I_T(۲۱۵٫۳) = I_T(۳۳۲٫۳)$ است. کوچکتر بودن شدت ۴۴۳٫۲ می‌تواند دال‌بر وجود انشعاب دیگری غیر از گذار $8^+ - 6^+$ با انرژی ۴۴۳٫۲ keV به حالت 6^+ باشد، که این نکته با فرض اینکه گذار ۵۰۰٫۷ keV به حالت 6^+ منتهی می‌شود سازگار است. بالاخره‌توجه کنید که $I_T(۵۷٫۵) = I_T(۴۴۳٫۲)$ نمایانگر متوالی بودن آنهاست؛ ورابطهٔ $I_T(۵۷٫۵) + I_T(۵۰۰٫۷) = I_T(۳۳۲٫۳)$ آن‌دو انشعابی راکه منجر به تغذیهٔ 6^+ می‌شوند، یکی‌ازطریق گذار ۵۷٫۵ keV ودیگری‌با گذار ۵۰۰٫۷keV، نشان می‌دهد.

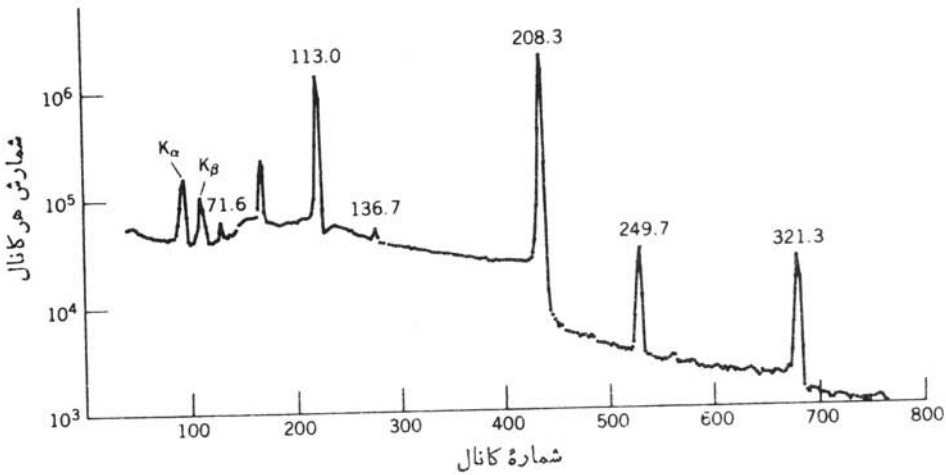
پاریتهٔ ترازی که گذارهای ۵۷٫۵ و ۵۰۰٫۷ keV را گسیل می‌کند، باید منفی‌باشد (به‌علت ماهیت $E1$ و $E3$ آنها)، و اسپین آن باید برابر ۷، ۸، یا ۹ باشد تا واپاشی 8^+ از طریق گذار $E1$ ممکن شود. می‌توان امکان حالت 7^- را منتفی دانست زیرا لازمهٔ آن این‌است که گذار ۵۰۰٫۷ keV به‌حالت 6^+ ازنوع $E1$ باشد، وهمچنین 9^- را می‌توان به‌کمك آزمایشهای همبستگی زاویه‌ای حذف کرد. این آزمایشها نشان می‌دهند که گذار ۵۰۰٫۷ keV دارای یك مؤلفهٔ کوچك (حدود ۳٪) $M2$ است که ضرایب تبدیل برای آشکارکردن آن به‌اندازهٔ کافی حساسیت ندارند.

نمودار واپاشی حاصل در شکل ۱۸.۱۰ نشان‌داده شده است. البته، برای تأیید صحت این حدسیات در مورد واپاشیهای گامازا به‌بسیاری از اندازه‌گیریهای دیگر نیز نیاز است. نیمه‌عمر ۵٫۵ h یکی از طولانی‌ترین موارد شناخته‌شده برای ایزومرهای گاما گسیل است.

به‌عنوان‌مثال آخر، واپاشی ۶٫۷ روزی ^{177}Lu را درنظرمی‌گیریم. طیف پرتوگامای آن در شکل ۱۹.۱۰ آمده، و اطلاعات مربوط به γ و تبدیل در جدول ۳.۱۰ داده



شکل ۱۸.۱۰ واپاشی ایزومری ^{180m}Hf.



شکل ۱۹.۱۰ طیف‌پرتوگاماهای ناشی از واپاشی ^{177}Lu. قلهٔ باانرژی حدود ۹۰ keV ناشی از اکتیویتهٔ یك ناخالصی است که دراین نمونهٔ فعال شده توسط نوترون تولید شده است.

شده‌است. واپاشیهای بتازای ^{177}Lu وتبدیل آن‌را به ^{177}Hf دربخش ۱۰.۹ بررسی کردیم، که عبارت‌اند از چهار واپاشی منتهی به حالت پایه و حالات برانگیختهٔ ۱۱۳، ۲۵۰، و ۳۲۱ keV. گذارهای ناشی ازهریك ازاین حالات برانگیخته به‌حالت پایه را می‌توانیم درجدول ۳.۱۰ مشاهده‌کنیم، وبنابراین می‌توانیم انرژی‌حالات برانگیخته را در ۱۱۳٫۰، ۲۴۹٫۷، و ۳۲۱٫۳ keV درنظربگیریم. (این انرژیهای γ با دقت ۰٫۱ keV ± تعیین

جدول ۳.۱۰ گذارهای گاما در واپاشی ^{177}Lu.

انرژی گذار (keV)	شدت نسبی γ	ضریب تبدیل	
		تجربه (پوستهٔ اتمی)	نظریه (چندقطبی)
۷۱٫۶	۲٫۴±۰٫۱	۰٫۹۰±۰٫۱۱(K)	۰٫۷۲(E۱), ۹۲٫۰(M۲)
		۰٫۰۸۷±۰٫۰۱۰(L_I)	۰٫۰۷۱(E۱), ۲۴٫۳(M۲)
۱۱۳٫۰	≡۱۰۰	۰٫۷۸±۰٫۰۵(K)	۲٫۴(M۱), ۰٫۷۴(E۲)
		۰٫۰۹۱±۰٫۰۱۱(L_I)	۰٫۳۴۵(M۱),۰٫۰۷۶(E۲)
۱۳۶٫۷	۰٫۹۲±۰٫۰۶	۰٫۴۹±۰٫۰۸(K)	۱٫۴۵(M۱), ۰٫۴۸(E۲)
		۰٫۰۸±۰٫۰۲(L_I)	۰٫۲۰(M۱), ۰٫۰۵(E۲)
۲۰۸٫۳	۱۶۴±۱۰	۰٫۰۴۶±۰٫۰۰۴(K)	۰٫۰۴۶(E۱), ۲٫۰۵(M۲)
		۰٫۰۰۶۳±۰٫۰۰۰۶(L_I)	۰٫۰۰۵۳(E۱), ۰٫۳۸(M۲)
۲۴۹٫۷	۳٫۰±۰٫۲	۰٫۱۰۱±۰٫۰۰۹(K)	۰٫۲۶(M۱), ۰٫۰۹۴(E۲)
۳۲۱٫۳	۳٫۶±۰٫۲	۰٫۱۰۲±۰٫۰۱۳(K)	۰٫۰۱۵۵(E۱),۰٫۴۹(M۲)
		۰٫۰۱۷±۰٫۰۰۲(L_I)	۰٫۰۰۱۸(E۱),۰٫۰۸۱(M۲)

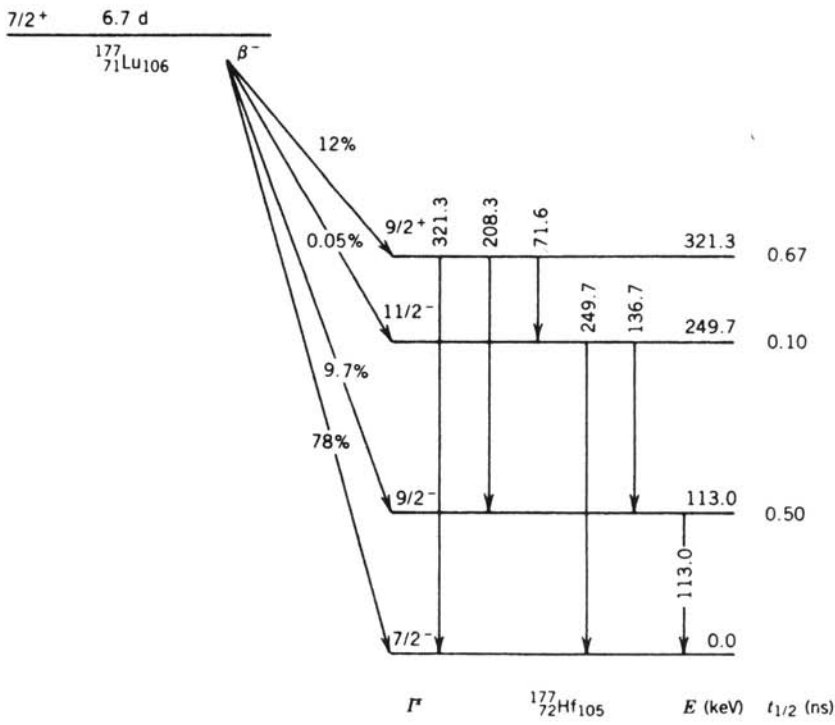
شده‌اند، درحالی که دقت انرژیهای β فقط درحدود ۲± تا ۳keV± است.) در گذارهای جدول ۳.۱۰ با کلیهٔ گذارهای ممکن، بین حالات برانگیخته، روبه‌رو می‌شویم

$$۳۲۱٫۳ - ۲۴۹٫۷\ \text{keV} = ۷۱٫۶\ \text{keV}$$

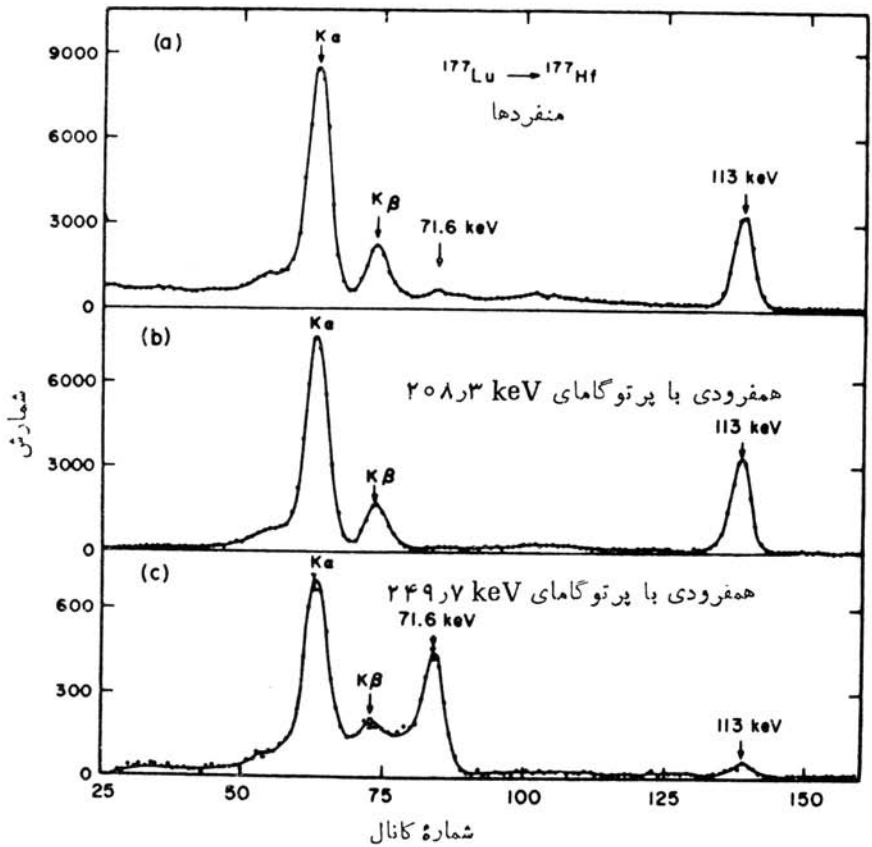
$$۳۲۱٫۳ - ۱۱۳٫۰\ \text{keV} = ۲۰۸٫۳\ \text{keV}$$

$$۲۴۹٫۷ - ۱۱۳٫۰\ \text{keV} = ۱۳۶٫۷\ \text{keV}$$

می‌دانیم که حالت پایه و دو تراز برانگیختهٔ اولیه در ^{۱۷۷}Hf پایینترین حالات یك نوار دورانی با اسپینهای $(۷/۲)^-$، $(۹/۲)^-$، $(۱۱/۲)^-$، . . . هستند. انتظار داریم که گذار ۱۱۳٫۰ keV به صورت $(۹/۲)^- \rightarrow (۷/۲)^-$ و در نتیجه از نوع $M۱+E۲$، گذار ۱۳۶٫۷ keV به صورت $(۱۱/۲)^- \rightarrow (۹/۲)^-$ و از نوع $M۱+E۲$، و گذار ۲۴۹٫۷ keV به‌صورت $(۱۱/۲)^- \rightarrow (۷/۲)^-$ وازنوع $E۲$ باشد. این انتظارات با ضرایب تبدیل هم سازگارند. واپاشیهای تراز ۳۲۱٫۳ به‌هر سه تراز پایینتر از طریق گذارهای $E۱+M۲$ صورت می‌گیرد، و درنتیجه فقط انتساب $(۹/۲)^+$ امکان‌پذیر است. نمودار واپاشی استنباط شده را درشکل ۲۰.۱۰ نشان‌داده‌ایم. برای بررسی صحت



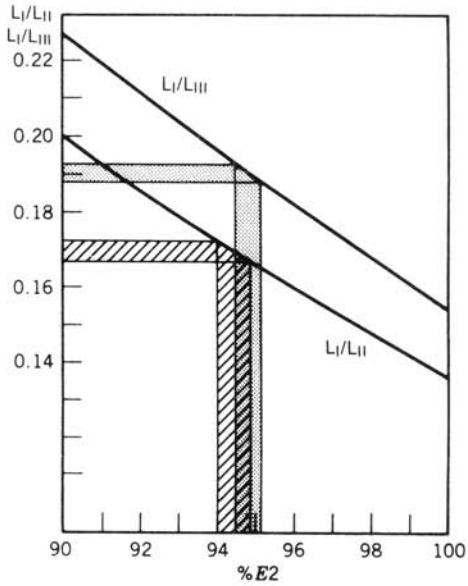
شکل ۲۰.۱۰ نمودار واپاشی ^{۱۷۷}Lu و تبدیل آن به ^{۱۷۷}Hf. شدتهای انشعاب β به‌طورغیرمستقیم از شدتهای پرتو γ استنتاج شده‌اند، وبا آنچه درشکل ۲۹.۹ دیدیم فرق دارند.



شکل ۲۱.۱۰ طیفهای همفرودی حاصل از واپاشی ^{177}Lu. به همفرودی شدید بین ۲۰۸ و ۱۱۳ توجه کنید؛ همچنین دقت کنید که چگونه قلهٔ ۷۱٫۶ keV که در طیف منفردها در بالا به سختی قابل مشاهده است به‌طور بارزی با ۲۴۹٫۷ keV همفرود است. (ظهور قلهٔ کوچک ۱۱۳٫۰ keV در طیف همفرودی ۲۴۹٫۷ keV حاصل آزمایشی استادانه است.)

و سقم جایگاه تخصیص داده شده به‌این گذارها، می‌توان از اندازه‌گیریهای همفرودی پرتو γ استفاده کرد که نمونه‌ای از آن در شکل ۲۱.۱۰ نشان داده شده است. طیف همفرودی، ارتباط همفرودی گذارهای ۱۱۳٫۰–۲۰۸٫۳ و ۷۱٫۶–۲۴۹٫۷ را به روشنی نشان می‌دهد.

به‌عنوان نکتهٔ نهایی دربارهٔ این واپاشی، خاطرنشان می‌کنیم که نسبتهای زیرپوستهٔ L می‌تواند مؤلفه‌های نسبی $M1$ و $E2$ را در گذار ۱۱۳٫۰ keV تعیین کند. شکل ۲۲.۱۰ وابستگی نسبتهای L_I/L_{III} و L_I/L_{II} را درمورد مؤلفهٔ $E2$ نشان می‌دهد. این اطلاعات



شکل ۲۲.۱۰ تعیین سهم $E2$ در گذار keV ۱۱۳٫۰ هستهٔ ^{177}Hf با استفاده از اطلاعات زیرپوستهٔ L. نوارهای افقی گسترهٔ نسبتهای تجربی زیرپوستهٔ L، و نوارهای عمودی نسبتهای متناظر $E2$ را نشان می‌دهند. به‌این ترتیب معلوم می‌شود که ۹۴ تا ۹۵٪ گذار از نوع $E2$ (و درنتیجه ۵ تا ۶٪ از نوع $M1$) است.

دقیق نشان می‌دهند که این گذار ۹۴ تا ۹۵٪ از نوع $E2$ وفقط ۵ تا ۶٪ از نوع $M1$ است. دراین مورد، تابع موجهای هسته‌ای، احتمال گذار $E2$ را به‌اندازه‌ای افزایش می‌دهند که $E2$ بر $M1$ غلبه می‌کند

دراین بخش، چند مثال از نمودارهای واپاشی را که بااستفاده از طیف‌نمایی پرتو γ والکترون تبدیلی قابل توضیح‌اند، بررسی کردیم. البته منزوی ساختن یك روش از سایر روشها برای تعیین خصوصیات حالتهای هسته‌ای غیرممکن است، ولی از مثالهای بحث‌شده دراینجا به‌اهمیت اطلاعات تفصیلی و دقیقی که با استفاده از این روشها به‌دست می‌آیند پی می‌بریم.

۹.۱۰ فلوئورسانی تشدید هسته‌ای و اثر موسباؤر

معکوس فرایند گسیل پرتو γ، جذب پرتو γ است که طی آن هستهٔ درحالت پایه فوتونی با انرژی E_γ را جذب می‌کند و به‌یك حالت برانگیخته در انرژی ΔE بالاتر از حالت پایه می‌جهد. رابطهٔ بین E_γ و ΔE با روشی مشابه آنچه برای به‌دست آوردن معادلهٔ (۴.۱۰) به‌کار بردیم، به‌دست می‌آید

$$\Delta E = E_\gamma - \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2} \qquad (۲۸.۱۰)$$

اگر فرض کنیم که هستهٔ جاذب درحال سکون است. تفاوت بین ΔE و E_γ ناشی از پس‌زنی هسته پس از جذب فوتون است.

فرض می‌کنیم یک چشمه γ داریم که انرژی آن به طور پیوسته تغییر می‌کند. سطح مقطع جذب تشدیدی یك فوتون برابر است با

$$\sigma_0 = 2\pi\left(\frac{\hbar c}{E_\gamma}\right)^2 \frac{2I_e+1}{2I_g+1}\frac{1}{1+\alpha} \qquad (۲۹.۱۰)$$

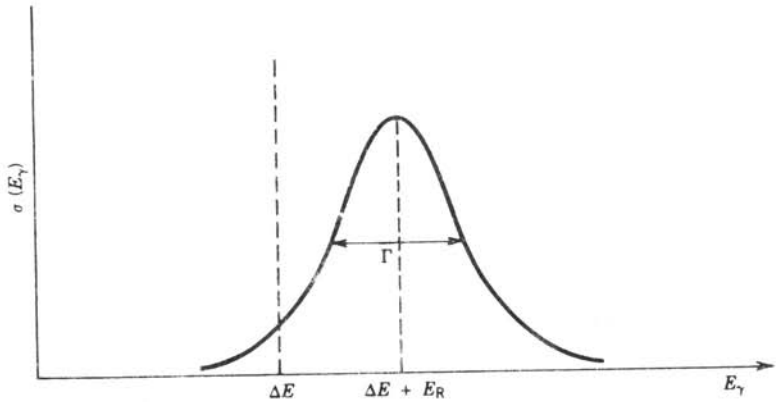
که در آن α ضریب تبدیل و I_g و I_e اعداد کوانتومی مربوط به اسپین حالات پایه و برانگیخته است. چون انرژی حالت برانگیخته «تیز» نیست، حتی اگر انرژی γ تا اندازه‌ای با مقدار تشدید تفاوت داشته باشد، جذب صورت می‌گیرد. همان‌طور که در فصل ۶ بحث شد، هرحالت با عمرمتوسط τ دارای پهنای $\Gamma = \hbar/\tau$ است، وازاندازه‌گیری انرژی حالت توزیعی به‌صورت معادلهٔ (۲۰.۶) وشکل ۳.۶ به‌دست می‌آید. اگر باریکه‌ای از فوتونها را به‌مجموعه‌ای ازهسته‌های برهنه بتابانیم (به‌طوری‌که فرایندهای پراکندگی و جذب مربوط به الکترونهای اتمی از بین بروند)، سطح مقطع جذب تشدیدی برابر خواهد بود با

$$\sigma(E_\gamma) = \sigma_0 \frac{(\Gamma/2)^2}{[E_\gamma - (\Delta E + E_R)]^2 + (\Gamma/2)^2} \qquad (۳۰.۱۰)$$

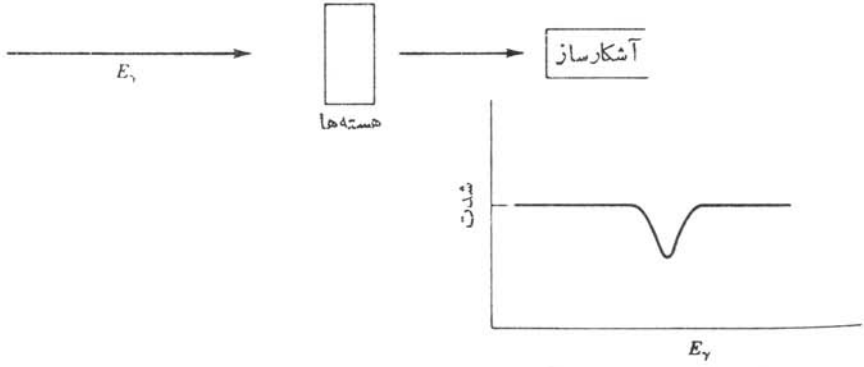
که درآن E_R همان تصحیح پس‌زنی $E_\gamma^2/2Mc^2$ است. این‌توزیع درشکل ۲۳.۱۰ رسم شده‌است. به‌طورکلی برای حالات هسته‌ای با عمرهای متوسط نانوثانیه تا پیکوثانیه، پهنای حالتها درگسترهٔ 10^{-6} تا 10^{-3}eV است.

شکل ۲۴.۱۰ نمای ساده‌ای ازآزمایش‌جذب تشدیدی را نشان می‌دهد. با تغییر E_γ، منحنی تشدید شکل ۲۳.۱۰ به‌دست می‌آید. در انرژیهای دور از تشدید، هسته‌ها نسبت به تابش شفاف هستند و جذبی صورت نمی‌گیرد. در حالت تشدید، شدت عبور حداقل می‌شود.

درعمل مشاهدهٔ پهنای خط طبیعی Γ غیرمحتمل است. یکی از عوامل اصلی دخالت در پهنای خط مشاهده شده، پهن‌شدگی دوپلری Δ وناشی از این علت است که هسته‌ها (برخلاف آنچه فرض کردیم) ساکن نیستند، بلکه درحقیقت متناسب با هر دمای T دارای حرکت گرمایی‌هستند. فوتونهایی که‌درچارچوب مرجع آزمایشگاه گسیل یاجذب می‌شوند، دارای انتقال دوپلر باانرژیهای $E'_\gamma = E_\gamma(1 \pm v_x/c)$ هستند، که‌درآن v_x مؤلفهٔ سرعت هسته در جهت حرکت فوتون است. اگر حرکت هسته‌ها با توزیع سرعت معمولی ماکسول $\exp-[(1/2)mv_x^2]/kT$ نشان داده شود، توزیع انرژی به‌صورت



شکل ۲۳.۱۰ سطح‌مقطع جذب تشدیدی معادلهٔ (۳۰.۱۰). انرژی پس‌زنی E_R تشدید را اندکی از مقدار انتظاری $E_\gamma = \Delta E$ که درغیاب پس‌زنی اتفاق می‌افتد، جابه‌جا می‌کند.



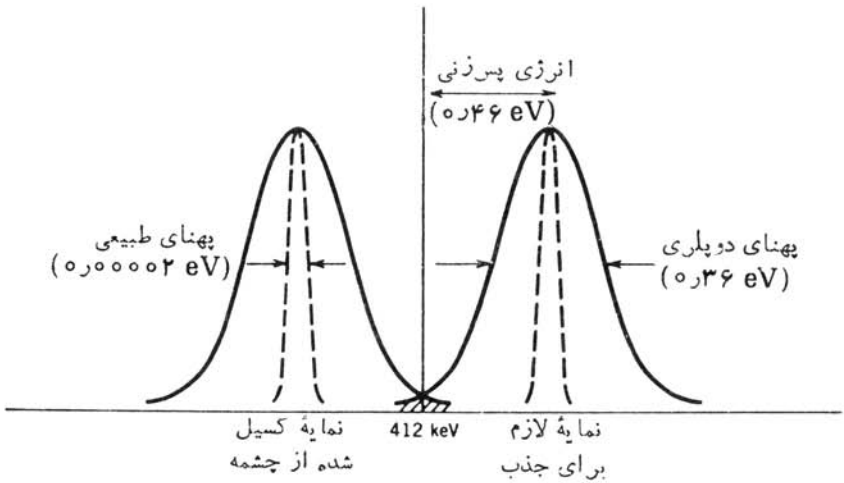
شکل ۲۴.۱۰ طرح یك آزمایش برای مشاهدهٔ جذب تشدیدی در هسته‌ها.

$\exp-(mc^2/2kT)(1-E'_\gamma/E_\gamma)^2$ خواهد بود که توزیعی گاؤسی با پهنای زیر را به‌دست می‌دهد

$$\Delta = 2\sqrt{\ln 2}\, E_\gamma \sqrt{\frac{2kT}{Mc^2}} \qquad (31.10)$$

در دمای اتاق $kT \simeq 0.025\ \mathrm{eV}$ است و برای گذار $100\ \mathrm{keV}$ در هسته‌های میان وزن داریم $\Delta = 0.1\ \mathrm{eV}$، که در بسیاری از گذارهای هسته‌ای بر پهنای خط طبیعی غلبه‌می‌کند. حتی سرد کردن تا دماهای کم (برای مثال، کاهش دما به $4\ \mathrm{K}$ دراثر تماس گرمایی با مخزن هلیم‌مایع) پهنای خط را فقط یك مرتبهٔ بزرگی تا $0.01\ \mathrm{eV}$ کم می‌کند. پهنای مشاهده شده در آزمایشهایی مانند شکل ۲۴.۱۰، ترکیبی از پهنای خط طبیعی و موارد اضافی‌مانند پهن‌شدگی دوپلری است.

چشمه‌های قابل تنظیم فوتون که برای آزمایش تشدید مورد نیازند، وجود ندارند. (بهترین چشمهٔ ممکن درعمل، طیف الکترومغناطیسی پیوستهٔ حاصل از تابش ترمزی یا تابش سنکروترون است که به‌وسیلهٔ شتابدهنده‌های ذرات باردار با انرژیهای نسبیتی تولیدمی‌شود.) بنابراین در آزمایشگاههای معمولی، باید به چشمه‌های عادی تابش γ که فقط فوتونهای با انرژی ناپیوسته گسیل می‌کنند، قناعت کنیم. اما، برای جذب تشدیدی باید چشمهٔ رادیواکتیوی داشته باشیم که پرتوهای γ با فاصله انرژی حداکثر ۰٫۱ eV از انرژی تشدید موردنظر $\Delta E + E_R$ گسیل کند. البته احتمال یافتن چنین چشمه‌ای با خصوصیت چندقطبی مناسب بسیار کم است. بنابراین، بهتر است از چشمه‌ای استفاده کنیم که در آن تابش گامای ناشی از گذار رو به‌پایین مشابه همان تابشی باشد که می‌خواهیم با جذب تشدیدی و گذار رو به‌بالا برانگیزیم. برای مثال، واپاشی ^{198}Au را درنظر بگیرید. پس از واپاشی بتازا به ^{198}Hg یك پرتو گامای قوی با انرژی ۴۱۲ keV گسیل می‌شود. حال اگر بگذاریم که پرتو γ برهدفی از هسته‌های ^{198}Hg پایدار فرود آید، احتمال جذب و برانگیزش از حالت پایه به‌حالت برانگیختهٔ ۴۱۲ keV وجود دارد. عمر متوسط حالت ۴۱۲ keV برابر ۳۲ ps است که با پهنای 2×10^{-5} eV متناظر است. انرژی پس‌زنی E_R برابر $E_\gamma^2/2Mc^2 = 0.46$ eV است، وتوجه به‌این نکته نیز حائز اهمیت است که پس‌زنی در هردو گذار گسیلی وجذبی وجوددارد. یعنی، تابش گسیلی دارای انرژی $\Delta E - E_R$ است، درحالی که انرژی لازم برای جذب برابر $\Delta E + E_R$ می‌شود. این وضعیت درشکل ۲۵.۱۰



شکل ۲۵.۱۰ انرژی تابش گسیلی به‌اندازهٔ E_R نزول می‌کند، درحالی که جذب محتاج به‌افزایش انرژی به‌اندازهٔ E_R است. به‌علت پهن‌شدگی (گرمایی) دوپلر، همپوشی اندکی (ناحیهٔ هاشورزده) بین خطوط گسیلی وجذبی وجود دارد. پهنای طبیعی درمقیاس انرژی این نمودار، اغراق‌آمیز نشان‌داده شده است.

نشان‌داده شده است. دراین‌شکل، پهنای دوپلری خطوط‌را در دمای اتاق‌برابر ۰٫۳۶ eV درنظر گرفتیم. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید، همپوشی بین‌خطوط جذبی و گسیلی، ودرنتیجه احتمال بـرانگیزش تشدیدی، دراین‌مورد بسیارکم است.

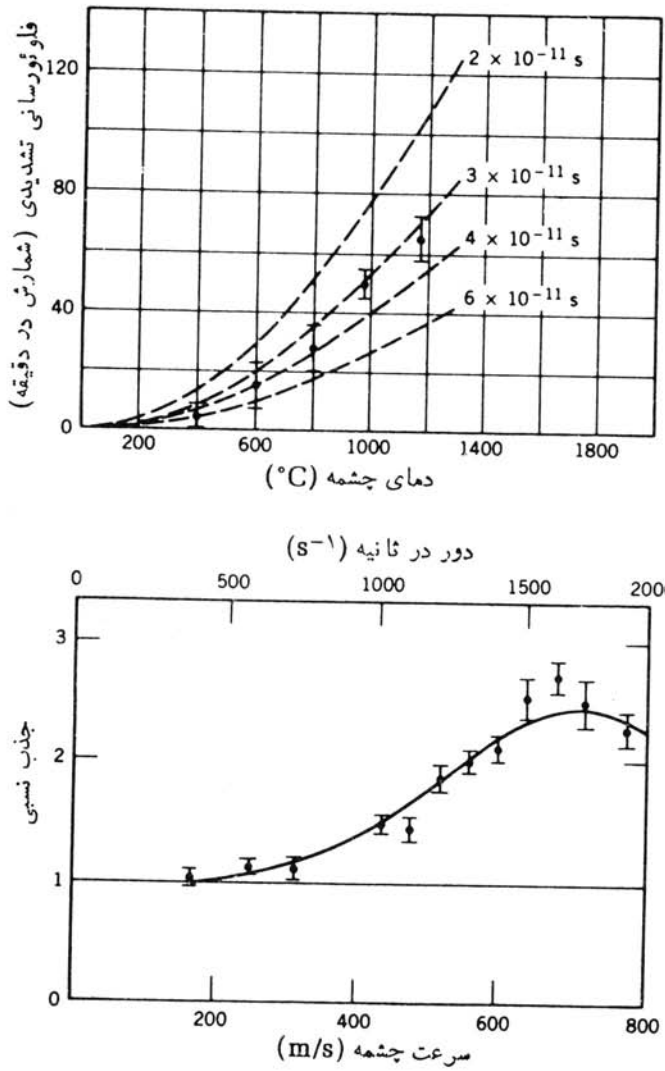
(به‌تفاوت میان این مورد ومورد تابش اتمی توجه کنید. انرژی گـذارهای اپتیکی درحدود چند eV است؛ تصحیح پس‌زنی در Hg برابر $۲٫۷ \times ۱۰^{-۱۲}$ eV است، ودرنتیجه همپوشی تقریباً کاملی بین نمایه‌های گذار چشمه و اتم جاذب وجود دارد. بنابراین، انجام آزمایشهای جذب تشدید اتمی نسبتاً آسان است.)

روشهایی چند برای غلبه برتفاوت انرژی $۲E_R$ بین گذارهای چشمه وهستهٔ جاذب وجود دارند. اولین روش مبتنی‌بر افزایش‌دما ودرنتیجه افزایش پهن‌شدگی دوپلـر است، که براثر آن‌همپوشی نمایه‌ها امکان‌پذیر می‌شود. در روش‌دوم، چشمه با سرعت زیادبه‌طرف هستهٔ جاذب حرکت‌داده می‌شود تا انتقال دوپلری انرژی گسیلی به‌میزان $۲E_R$ برسد. از آنجاکه انرژی انتقال دوپلری برابر $E'_\gamma = E_\gamma(۱+v/c)$ است، سرعت لازم به‌صورت زیر به‌دست می‌آید

$$v = c\frac{۲E_R}{E_\gamma} \qquad (۳۲.۱۰)$$

که برابر $۲٫۲ \times ۱۰^{-۶}c$ یا ۶۷۰ m/s است. آزمایشهایی از این‌نوع، معمولا با اتصال چشمه به‌نوك قسمت چرخنده دریك دستگاه گریز از مرکز انجام می‌شودکه باسرعت $۱۰^۴$ تا $۱۰^۵$ دور در دقیقه می‌چرخد. شکل ۲۶.۱۰ نمونه‌هایی از نتایج حاصل از پهن‌شدگی گرمایی و روشهای گریز از مرکز را نشان می‌دهد.

موفق‌ترین ومفیدترین‌روش برای‌غلبه برمشکل پس‌زنی، اثرموسباؤر نامیده می‌شود. در سال ۱۹۵۸ رودولف مـوسباؤر یك‌آزمـایش جذب تشدیـدی بـا استفاده از چشمهٔ ^{۱۹۱}Ir ($E_\gamma = ۱۲۹$ keV؛ $E_R = ۰٫۰۴۷$ eV) ترتیب‌داد. هسته‌های گسیلنده وجاذب در در شبکه‌ای از بلور مقید بودند. انرژیهای بستگی اتم در شبکهٔ بلور نوعاً درحدود ۱ تا ۱۰eV است، وبنابراین انرژی پس‌زنی کافی برای اینکه اتم جایگاه خود درشبکه را ترك کند وجود ندارد. این اثر تااندازه‌ای مانند تفاوت بین ضربه‌زدن باچوگان به‌یك‌تك‌آجر وضربه‌زدن به‌یك‌آجر در دیوارآجری است. جرمی‌که درعبارت مربوط به‌پس‌زنی به‌کار می‌رود به‌جای جرم یك اتم، جرم تمام جسم جامد خواهدبود. بعلاوه،کسرمعینی از اتمهای موجود در شبکه (که با توجه به‌ملاحظات آماری تعیین می‌شود) درحالت نوسانی پایه در حرکت گرمایی‌است و درنتیجه پهن‌شدگی گرمایی‌دوپلر درآن‌خیلی کم‌است. به‌این‌ترتیب، خطوط گسیلی و جذبی با پهنایی بسیار باریك‌که با پهنای خط طبیعی (۳×۱۰^{-۶}eV در ^{۱۹۱}Ir) مشخص می‌شود، روی هم‌می‌افتند. برای نمایش این پدیده فقط‌کافی است که‌چشمه وجاذب را نسبت به‌یکدیگر با سرعت‌کم حرکت دهیم؛ اگر سرعت به‌اندازه‌ای باشدکه انتقال دوپلری بیش ازپهنای طبیعی خط شود، تشدید از بین می‌رود. برای پهنای خط‌کل

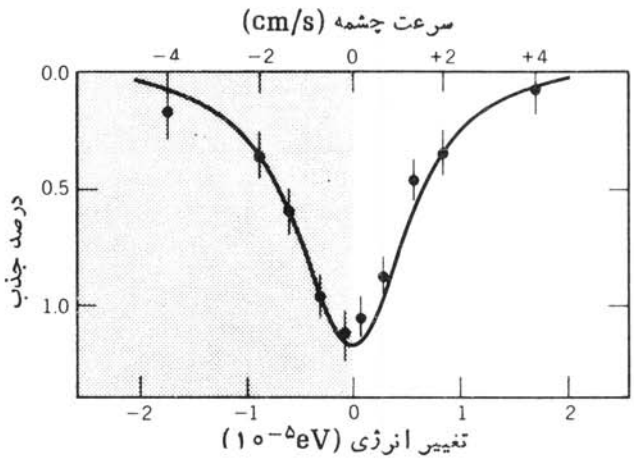


شکل ۲۶.۱۰ روشهای پهن‌شدگی گرمایی (بالا) وگریز از مرکز (پایین) برای مشاهدهٔ تشدید هسته‌ای در ^{198}Hg. نقاط اطلاعاتی شکل بالا، جذب تشدیـدی فزاینده‌ای را با افزایش دما نشان می‌دهد (پهن‌شدن خطوط شکل ۲۵.۱۰ وافزایش همپوشی). خط‌چینها رفتار موردانتظار برای طول‌عمرحالتهای برانگیختهٔ مختلف را نشان‌می‌دهند (یعنی، برای پهناهای طبیعی‌مختلف). با استفاده از این‌داده‌ها طول‌عمر درحدود ۳۰ ps تعیین شده‌است. نمودار پایینی، نتایج انتقال دوپلری تابش گسیل‌شده ازچشمه را پس‌از اتصال به‌نوك یك چرخنده‌نشان می‌دهد. دراین‌مورد، خط گسیلی شکل ۲۵.۱۰ به‌انرژیهای بالاتر منتقل می‌شود تا برخط جـذبی منطبق شود. طبق براورد، این‌حالت درسرعت ۶۷۰ m/s رخ می‌دهد.

6×10^{-6}eV (زیرا چشمه وجاذب هردو دارای پهنای خط طبیعی هستند)، سرعت لازم درحدود $5\times10^{-11}c$ یا ۱۵mm/s می‌شود، که بهبودقابل‌ملاحظه‌ای نسبت به ۷۰۰m/s در آزمایش گریز از مرکز است! شکل ۲۷.۱۰ نتیجهٔ این تشدید راکه نخستین‌بار درسال ۱۹۵۸ توسط موسباؤر به‌دست آمد، نشان می‌دهد.

نکتهٔ قابل‌ملاحظه‌دراثرموسباؤر، دقت بسیار زیادآن‌در اندازه‌گیری انرژیهای نسبی است. برای مثال، فرض کنید که محیط اتمهای چشمه یا جاذب را طوری تنظیم کرده‌ایم که تفاوت انرژی بین حالات اولیه ونهایی به‌میزان اندك δE جابه‌جا شده است. بااستفاده از اثر موسباؤر، باید بتوان این‌انتقال را که ازهمان مرتبهٔ بزرگی پهنای تشدید است، اندازه‌گیری کرد. (اگر انتقال‌درمقایسه باپهنای تشدید خیلی کوچك‌باشد، اندازه‌گیری آن بسیارمشکل می‌شود.) درمورد ^{191}Ir که پهنای‌تشدید مشاهده شده درحدود 10^{-5}eV است، مسئله‌این است‌که باید تغییر انرژی 10^{-5}eV برای انرژی‌گامای 10^{5}eV، یعنی اثر یك‌قسمت در 10^{10}، را اندازه‌گیری کنیم. در ^{57}Fe که اغلب دراندازه‌گیری اثر موسباؤر به‌کار می‌رود، پهنای خط مشاهده شده (طبیعی) از مرتبهٔ 10^{-8}eV است، و بدین‌سان اثرات تجربی از مرتبهٔ یك‌قسمت در 10^{12} قابل‌اندازه‌گیری هستند!

اگرچه نظریهٔ اثر موسباؤر را به تفصیل بررسی نخواهیم کرد، ولی شایسته است‌که در اینجا یکی دیگر از جنبه‌های تشدید یعنی عمق آن را که با کسر هسته‌های گسیلنده (یا جذب‌کننده) بدون‌پس‌زنی‌موجود درشبکه تعیین می‌شود، به‌اختصار مورد توجه قرار دهیم. محاسبهٔ کسر بدون پس‌زنی f، به‌خصوصیاتی بیش‌ازبیشتر یاکمتر بودن انرژی پس‌زنی از



شکل ۲۷.۱۰ اثر موسباؤر بااستفاده ازپرتوهای‌گامای ۱۲۹keV حاصل از ^{191}Ir. چون(۱) پهنای طبیعی خط به‌دست آمده است و (۲) پس‌زنی حذف شده است، اساساً همپوشی کاملی بین چشمه وجاذب وجود دارد. انتقال دوپلری انرژی چشمه به‌میزان اندکی بیش از پهنای طبیعی خط (10^{-5}eV) برای ازبین‌بردن تشدید کافی است.

انرژی بستگی شبکه وابسته است. جامدات می‌توانند انرژی را به‌شیوه‌های متعددی غیر خارج‌ساختن اتمها از جایگاههای شبکه‌ای جذب کنند. در انرژیها و دماهای پایین، عمل در مرحلهٔ اول از طریق ارتعاشات شبکه‌ای که فونون نامیده می‌شوند، صورت می‌گیرد (انتشار این فونونها در شبکه، خصوصیات شناخته شده‌ای مانند امواج مکانیکی و صوتی را موجب می‌شود.) این ارتعاشات در طیفی از بسامدها، ازصفر تا مقدار بیشینهٔ ω_{max}، ایجاد می‌شوند. انرژی متناظر با بیشترین بسامد ارتعاشی معمولا برحسب دمای خاصی بیان می‌شود که آن‌را دمای دبی θ_D می‌نامند. این دما طوری تعریف شده است که $\hbar\omega_{max} = k\,\theta_D$ می‌شود، که در آن k ثابت بولتزمن است. برای اجسام معمولی داریم $\hbar\omega_{max} \sim ۰٫۰۱\,eV$ و $\theta_D \sim ۱۰۰۰\,K$. کسر بدون پس‌زنی برابر است با

$$f = \exp\left[-\frac{\langle x^۲\rangle}{(\lambda/۲\pi)^۲}\right] \qquad (۳۳.۱۰)$$

که در آن $\langle x^۲\rangle$ میانگین مربعی دامنهٔ ارتعاش هستهٔ گسیلنده و λ طول موج پرتو γ است. استفاده از تابع توزیع بوز ـ اینشتین برای طیف فوتون ارتعاشی، محاسبهٔ دامنهٔ میانگین مربعی را امکان‌پذیر می‌سازد و کسر بدون پس‌زنی را به‌صورت زیر به‌دست می‌دهد

$$f = \exp\left\{-\frac{۶E_R}{k\theta_D}\left[\frac{۱}{۴}+\left(\frac{T}{\theta_D}\right)^۲\int_۰^{\theta_D/T}\frac{x\,dx}{e^x-۱}\right]\right\} \qquad (۳۴.۱۰)$$

در دماهای پایین $T \ll \theta_D$، آخرین جمله درنما قابل چشمپوشی است. مقادیر θ_D برای فلزات مختلف تغییر قابل‌ملاحظه‌ای ندارد ($\theta_D \sim ۴۰۰\,K$ برای Fe و ۳۰۰ K برای Ir). بنابراین، در تعیین کسر بدون پس‌زنی، انرژی پس‌زنی E_R نقش اصلی را برعهده دارد. برای گذار ۱۴٫۴ keV در ^{۵۷}Fe داریم $E_R = ۰٫۰۰۲\,eV$ و $f = ۰٫۹۲$، درحالی که برای Ir داریم $f \approx ۰٫۱$. [دومین جمله درنمای معادلهٔ (۳۴.۱۰) همواره منفی است و درنتیجه این جمله سبب کوچکترشدن f ازبراوردهای دمای پایین می‌شود.] چون فرایندهای بدون پس‌زنی در هردو مورد چشمه وجاذب ضروری هستند، کسر بدون پس‌زنی کلی از حاصلضرب عوامل چشمه وجاذب تعیین می‌شود. بنابراین، تعجب‌آور نیست که آزمایش اولیهٔ موسباؤر با Ir اثری فقط به‌میزان ۱٪ را نشان‌داد، درحالی که Fe اثر بسیار بزرگتری را نشان می‌دهد.

اثر موسباؤر درموارد گوناگون کاربردهای فراوان پیدا کرده است. مورد استفادهٔ اصلی آن درکارهایی است که در آنها باید خواص محیط فیزیکی یا شیمیایی یك هسته را تعیین کنیم. ولی یکی ازمهمترین کاربردهای دقت بسیار زیاد آن، تعیین تغییر انرژی فوتونهایی است که در میدان گرانشی زمین سقوط می‌کنند و به‌نام انتقال سرخ گرانشی معروف است. یکی از پایه‌های نظریهٔ نسبیت عام اینشتین، اثر هم‌ارزی است که برطبق آن نمی‌توان تمایزی

بین اثرات یك میدان گرانشی یکنواخت موضعی و اثرات یك چارچوب مرجع شتابدار یکنواخت قائل شد. اگر بخواهیم گسیل و جذب تابش را در چارچوب مرجع شتابداری مشاهده کنیم که درآن فاصلهٔ بین چشمه وجاذب H است، در زمان H/c که تابش مسافت بین چشمه و جاذب را می‌پیماید، هستهٔ جاذب باید سرعتی برابر gH/c کسب کند که در آن g شتاب است و مقدار آن برابر (ولی درخلاف جهت) شتاب گرانشی میدان یکنواخت انتخاب شده است. بنابراین انتقال دوپلری فوتونهای تابش به‌صورت زیر خواهد بود

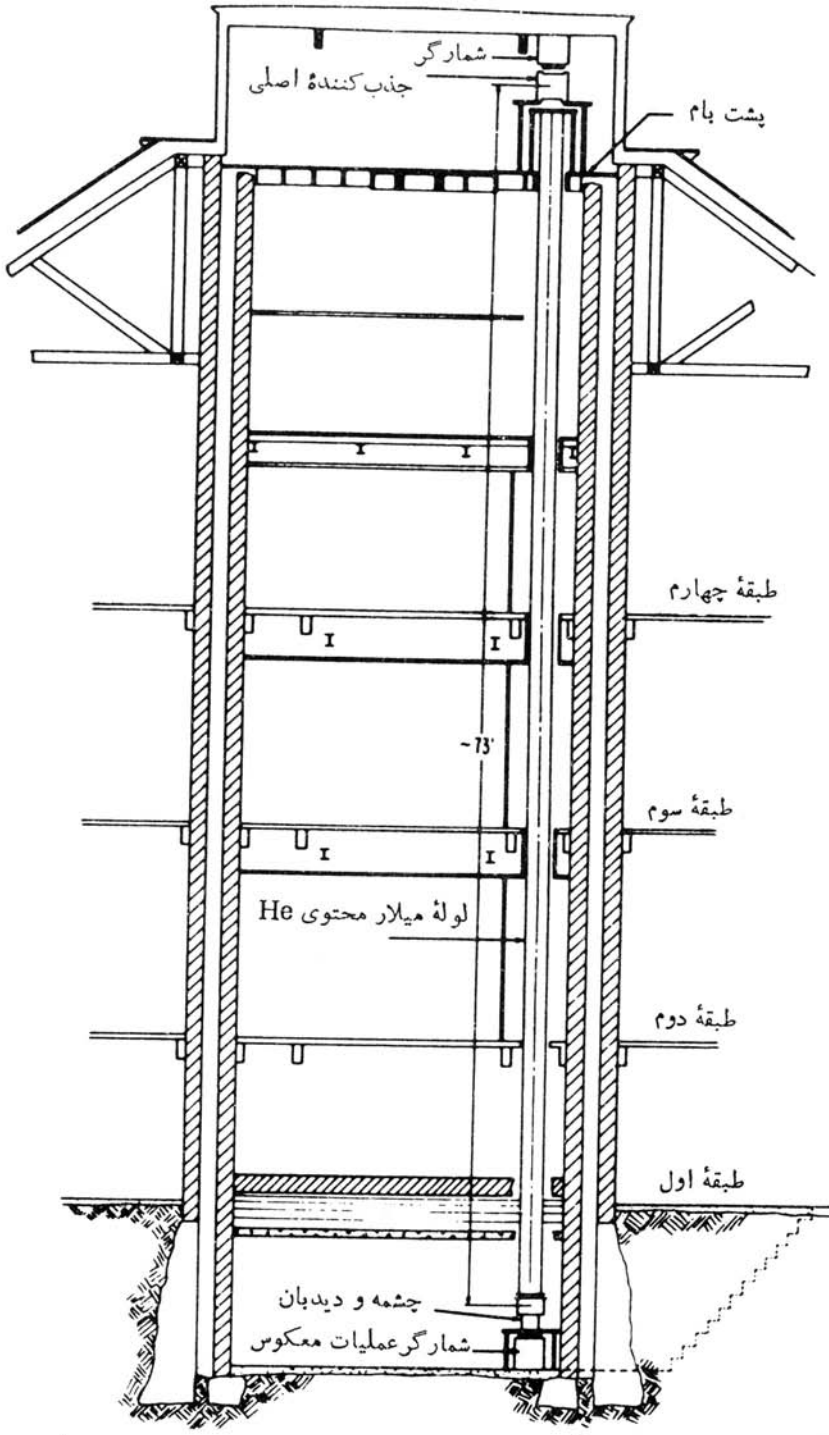
$$\frac{\Delta E}{E}=\frac{\Delta v}{c}=\frac{gH}{c^{2}} \qquad (۳۵.۱۰)$$

که مقدار آن درمیدان گرانشی زمین درحدود 1×10^{-16} درهرمتر است.

درآزمایش اصلی پاوند و ربکا ازهستهٔ ^{57}Fe استفاده شد (ازیك چشمهٔ ^{57}Co به‌قدرت 1 Ci)، وفوتونهای 14.4 keV مسافتی معادل 22.5 m را در برج آزمایشگاه فیزیك جفرسون درهاروارد به‌طرف بالا پیمودند (شکل ۲۸.۱۰). اثرموردانتظار ازمرتبهٔ 2×10^{-15} بود، که حتی برای حساسیت (Γ/E_{γ}) تقریبی 3×10^{-13} در ^{57}Fe مستلزم تلاشی قهرمانانه بود. برای مشاهدهٔ این انتقال اندك (که درحدود 10^{-2} برابر پهنای تشدید بود)، پاوند و ربکا کوشش خود را روی قسمتهایی از طرفین منحنی تشدید که دارای بزرگترین شیب بودند متمرکز کردند. برای کاهش اثرات سیستماتیك، لازم بود که ازدمای چشمه وجاذب بادقت زیادمراقبت شود (اختلاف دمای چشمه وجاذب سبب پهن‌شدگی دوپلری نامساوی می‌شود، که اثری مشابه انتقال قله است) وبه‌طور متناوب جای چشمه و جاذب را عوض کنند تا حرکت فوتونها در جهات متقابل بررسی شود. پس از چهارماه آزمایش، نتیجه به صورت $\Delta E/E=(4.902\pm0.041)\times10^{-15}$ به دست آمد که با مقدار انتظاری 4.905×10^{-15} برای مسیر رفت و برگشت 45m قابل مقایسه بود. این آزمایش بسیار دقیق که یکی ازظریفترین آزمونهای نظریهٔ نسبیت عام است، بدون استفاده از حساسیت بسیار زیاد اثر موسباؤر امکان‌پذیر نبود.

همان طور که ذکر شد، شاید کاربردهای اصلی اثر موسباؤر در مطالعهٔ برهم کنش هسته‌ها بامحیط فیزیکی وشیمیایی آنها بوده است. برهم کنش گشتاورهای الکترومغناطیسی هسته‌ای با میدانهای محیطی را معمولا برهم‌کنشهای فوق‌ریز می‌نامند، که آنها را به‌طور مفصلتر درفصل ۱۶ بررسی خواهیم کرد. درحال‌حاضر، فقط به‌ذکر چند مثال ازکاربردهای طیف‌نمایی موسباؤر و مطالعهٔ آنها خواهیم پرداخت.

در اولین‌مورد، اثر نفوذ تابع موجهای اتمی را درحجم هسته به‌سادگی اندازه می‌گیریم. این کمیت، که در معادلهٔ (۱۲.۳) با نماد ΔE نشان‌داده شد، نمایندهٔ اختلاف انرژی بین ترازهای الکترونی براساس یك هستهٔ «نقطه‌ای» ویك‌هستهٔ باردارکروی به‌شعاع R است. اگرچه هدف ما درفصل ۳ محاسبهٔ اثر این‌امر برترازهای اتمی بود، ولی بااندکی تأمل متوجه می‌شویم که ترازهای هسته‌ای هم باید به‌مقدار مساوی ودرجهت مخالف انتقال



شکل ۲۸.۱۰ نمای ساده‌ای از آزمایش انتقال سرخ گرانشی در برج هاروارد. برای تقلیل جذب درهوا، فوتونها دریك لولهٔ میلار محتوی گاز He حرکت می‌کنند. در این شکل، چشمه در پایین وهستهٔ جاذب ودستگاه شمارگر در بالا قرار گرفته‌اند.

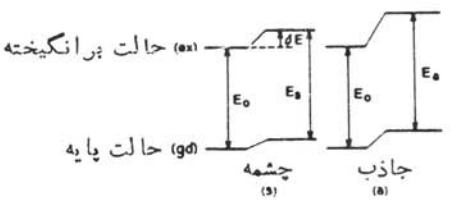
یابند، زیرا انرژی کل مشاهده شده (اتمی + هسته‌ای) نمی‌تواند در اثر نیروهـای داخلی تغییر کند. اگر $E_\circ$ نمایندهٔ انرژی فوتون درغیاب این اثر ($E_\circ = E_e - E_g$ که در آن e نمایندهٔ حالت برانگیخته و g نشاندهندهٔ حالت پایه‌است) باشد، انرژی مشاهده شده‌عبارت است از

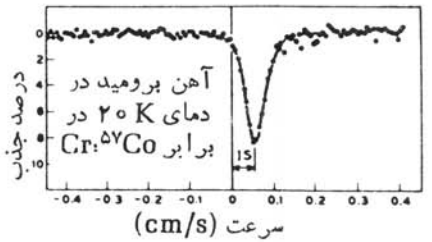
$$E = (E_e + \Delta E_e) - (E_g + \Delta E_g)$$

$$= E_\circ + \Delta E_e - \Delta E_g \qquad (۳۶.۱۰)$$

زیرا حالات‌پایه و برانگیخته دارای‌تابع‌موجهای مختلف ودر نتیجه‌شعاعهای متفاوت‌هستند. اگرچشمه و جاذب درآزمایش موسباؤر دارای محیط شیمیایی یکسان‌باشند، تشدید تغییر نمی‌کند، ولی اگر چشمه و جاذب با هم فرق داشته باشند، انرژیهای گذار اندکی متفاوت خواهند بود. دراین‌مورد، یکی از قله‌های شکل ۲۵.۱۰ نسبت به‌موردی‌که چشمه وجاذب یکسان باشند، جابه‌جا می‌شود. تأثیر آن برطیف موسباؤر دورکردن مرکز تشدید از مکان مربوط به‌سرعت‌صفر است. این‌اثر انتقال ایزومری نامیده می‌شود (یا گاهی‌انتقال‌شیمیایی) و درشکل ۲۹.۱۰ نشان‌داده شده است. چنانکه می‌بینید، این اثرکوچك و از مـرتبهٔ یك قسمت در 10^{12} است.

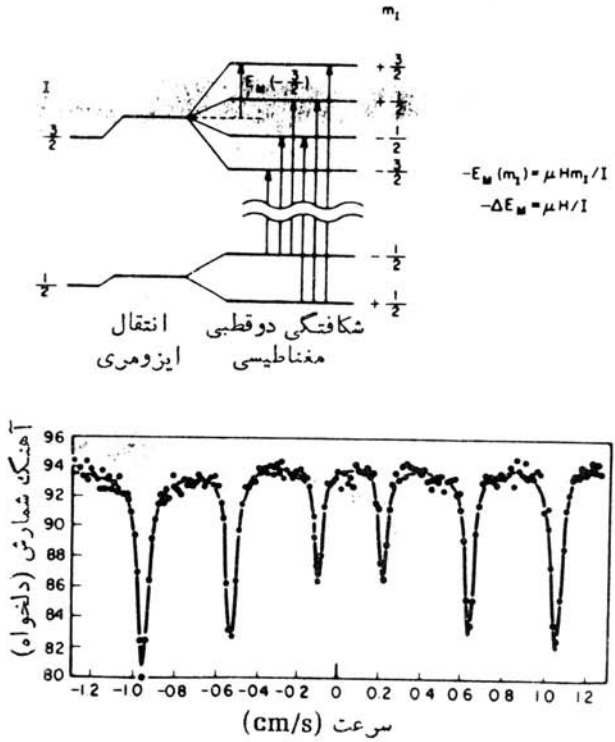
درنوعی دیگـر از جفت‌شدگی فوق‌ریز، شکافتگی ترازهـای هسته‌ای را در میدان مغناطیسی مطالعه می‌کنیم. درفیزیك اتمی، اثر میدان مغناطیسی برخطوط طیف اثر زیمان





شکل ۲۹.۱۰ انتقال ایزومری. در مـواد مختلف، حالات پایه و برانگیخته در اثـر همپوشی تابع‌موجهای الکترونی وهسته‌ای دارای انتقالهای مختلف هستند. تأثیر این امر برتشدید این است‌که موضع‌آن را نسبت به‌سرعت نسبی صفر جلوتر می‌برد.

نامیده می‌شود ومتناظر با از بین‌رفتن واگنی m تایهٔ مربوط به‌یك تراز با تکانهٔ زاویه‌ای I درمیدان‌مغناطیسی‌است ــ میدان تراز را به $2I+1$ زیرتراز بافاصله‌های مساوی‌می‌شکافد. طول‌موجهای اتمی‌دراثر زیمان‌نوعاً به‌اندازهٔ‌یك‌قسمت در 10^4 منتقل‌می‌شوند؛ گشتاورهای مغناطیسی هسته‌ای فقط 10^{-3} برابر گشتاورهای اتمی وانرژیهای گذار هسته‌ای 10^5 برابر انرژیهای اتمی هستند، وبه‌این‌ترتیب اثر هسته‌ای حاصل درحد یك‌قسمت در 10^{12} است. شکل ۳۰.۱۰ مثالی از این مورد را برای ^{57}Fe نشان می‌دهد. علاوه‌بر ساختار فوق‌ریز مغناطیسی، یك‌انتقال‌ایزومری‌نیز وجود دارد. گشتاورهای مغناطیسی‌حالات‌پایه و برانگیخته نامساوی هستند و درحقیقت طیف موسباؤر می‌تواند هنگامی‌که حالت‌پایه پایدار وگشتاور آن با دقت زیاد شناخته شده است (مثل مورد ^{57}Fe)، گشتاور مغناطیسی‌حالت برانگیخته

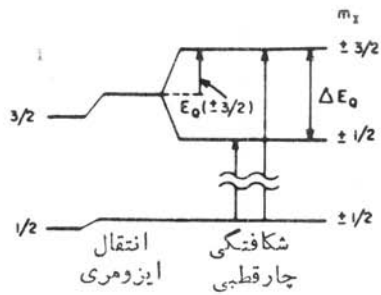


شکل ۳۰.۱۰ شکافتگی دوقطبی‌مغناطیسی ترازهای هسته‌ای‌که به‌کمك اثر موسباؤر مشاهده‌شده است. در طرف راست شکل بالا حالات هسته‌ای m تایه نشان داده شده‌اند کــه در اثر میدان مغناطیسی شکافته شده‌اند. اگــر حالات پایه و برانگیخته گشتاورهای دوقطبی هسته‌ای مختلف داشته باشند، شکافتگی‌های انرژی ΔE_M چنانکه درشکــل آمده است مختلف خواهند بود؛ در اینجا گشتاورها دارای علامت مختلف نیز هستند. بــرای گذارهای دوقطبی، فقط $\Delta m_I=0$ یا $\Delta m_I=\pm 1$ مجاز است، و به‌همین دلیل تعداد ۶ مؤلفهٔ مختلف مشاهده می‌شود.

را به‌دقت تعیین کند. همچنین اگر گشتاور معلوم باشد، می‌توان اندازهٔ میدان مغناطیسی را استنتاج کرد که حاوی اطلاعات مهمی درمورد ساختار اتمی است.

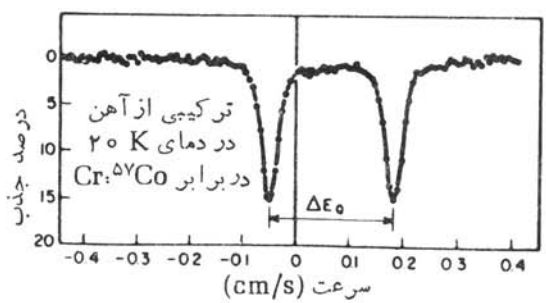
بالاخره، گشتاور چارقطبی هسته‌ای می‌تواند باشیب میدان الکتریکی برهم‌کنش کند وسبب شکافتگی چارقطبی الکتریکی شود. شکافتگی با m^2 متناسب است و درنتیجه $+m$ و $-m$ را از یکدیگر تمیز نمی‌دهد. بعلاوه، درحالت $I = 1/2$ شکافتگی ناپدید می‌شود. شکل ۳۱.۱۰ نمونه‌ای از مورد ^{57}Fe را نشان می‌دهد. توجه کنید که در برهم‌کنشهای چارقطبی الکتریکی در ^{57}Fe دوخط ظاهر می‌شود (درحالی که درمورد دوقطبی‌مغناطیسی شش خط نمایان است). برای ایزوتوپهای دیگری که اسپین حالات پایه و برانگیخته در آنها باهم فرق‌داشته باشد، تعداد خطوط متفاوت خواهد بود.

این مطالعات را می‌توان به مواد با کاربردهای گوناگون گسترش‌داد. برای مثال،



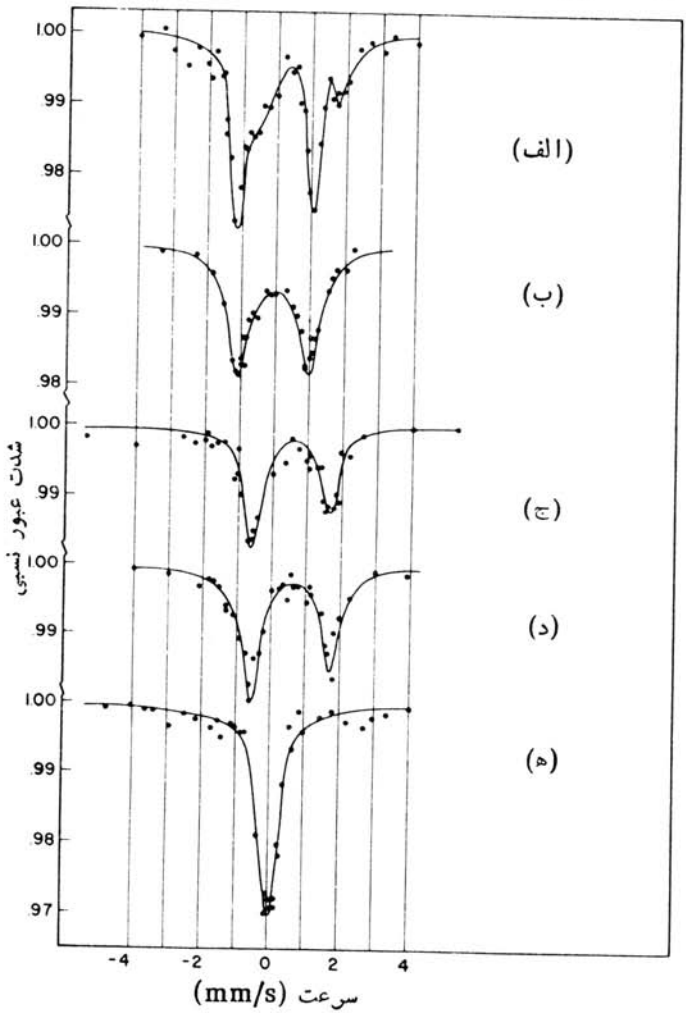
$$E_Q(m_I) = eqQ\left[\frac{3m_I^2 - I(I+1)}{4I(2I-1)}\right]$$

$$\Delta E_Q = E_Q(3/2) - E_Q(1/2) = \frac{eqQ}{2}$$



شکل ۳۱.۱۰ شکافتگی فوق ریزچارقطبی الکتریکی. در رابطهٔ شکافتگی انرژی، Q نمایندهٔ گشتاور چارقطبی الکتریکی هسته و q شیب میدان الکتریکی است (که بعضی‌اوقات V_{zz} یا $\partial^2V/\partial z^2$ نامیده می‌شود). دراین‌مورد فقط دو خط ظاهر می‌شوند، بعلاوه یك انتقال ایزومری هم مرکز طیف موسباؤر را از مکان متناظر به سرعت صفر دور می‌کند.

هموگلوبین پروتئین سبب قرمزشدن رنگ خون می‌شود وعامل پیوند اکسیژن درجریان خون است. هموگلوبین از نظر Fe غنی است و بنابراین می‌تواند درآزمایشهای موسباؤر مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۳۲.۱۰ چند نمونه از نتایج این نوع آزمایش را نشان می‌دهد. خون اکسیژن‌دار یك‌طیف موسباؤر با شکافتگی چارقطبی را نشان می‌دهد، ولی



شکل ۳۲.۱۰ آزمایشهای اثر موسباؤر که محیطهای شیمیایی مختلف Fe را در هموگلوبین نشان می‌دهند. چشمهٔ این آزمایشها ^{57}Co موجود در Pt بود. جاذبها به‌ترتیب عبارت بودند از (الف) گلبولهای قرمزموش در ۴K، (ب) هموگلوبین اکسیژن‌دار موش در ۷۷K، (ج) هموگلوبین انسان در CO_2 در ۷۷K، (د) هموگلوبین انسان در N_2 در ۷۷K، و (ه) هموگلوبین انسان در CO در ۷۷K. به‌تفاوت انتقالهای ایزومری و شکافتگی چارقطبی الکتریکی توجه کنید.

انتقال ایزومری آن با خون بدون اکسیژن اندکی متفاوت است. خون وریدی مخلوطی از هردو نوع را نشان می‌دهد. خونی که درمعرض CO قرار گرفته است، نمایانگر شکافتگی چارقطبی و انتقال ایزومری نیست. هموگلوبین اکسیژن‌دار باقرارگرفتن درمیدان مغناطیسی قوی از خود شکافتگی دوقطبی مغناطیسی نشان می‌دهد، ولی هموگلوبین بدون اکسیژن چنین نیست. کلیهٔ مطالب فوق مربوط به‌یونهای فرو (Fe^{2+}) است؛ یونهای فریك (Fe^{3+}) که ممکن است حضورشان نشانهٔ بیماری خونی باشد، طیفهای موسباؤر متفاوتی از خود نشان می‌دهند.

مراجع مطالعات تکمیلی

کتاب زیر یك اثر جامع دربارهٔ تابش چندقطبی الکترومغناطیسی است

M. E. Rose, *Multipole Fields* (New York: Wiley, 1955),

بحث تابش چندقطبی کلاسیك را درکتاب زیر هم می‌توان خواند

J. M. Blatt and V. F. Weisskopf, *Theoretical Nuclear Physics* (New York: Wiley, 1952),

شرح کوانتوم مکانیکی میدان تابش الکترومغناطیسی را می‌توان در مراجع زیر یافت

M. G. Bowler, *Nuclear Physics* (Oxford, Pergamon, 1973),

Alpha-, Beta-, and Gamma-Ray Spectroscopy, edited by K. Siegbahn (Amsterdam: North-Holland, 1965).

بسیاری از جنبه‌های نظری وتجربی گسیل گاما درکتاب زیر مرور شده است

The Electromagnetic Interaction in Nuclear Spectroscopy, edited by W. D.Hamilton (Amsterdam: North-Holland, 1975),

جداول ضرایب تبدیل نظری را می‌توان درمراجع زیر یافت

R. S. Hager and E. C. Seltzer, *Nuclear Data Tables*, *A* 4, 1(1968),

F. Rösel, H. M. Fries, K. Alder, and H. C. Pauli, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 21, 91(1978),

Alpha - Beta - and Gamma-Ray Spectroscopy, edited by K. Siegbahn (Amsterdam: North-Holland, 1965).

اثر موسباؤر درکتابهای زیر مرور شده است

G. K. Weitheim, *Mössbauer Effect: Principles and Applications* (New York: Academic, 1964),

T. C. Gibb, *Principles of Mössbauer Spectroscopy* (New York: Halsted, 1976),

مقالات جدید دربارهٔ کاربرد اثر موسباؤر در کتابهای زیر گردآوری شده‌اند

Applications of Mössbauer Spectroscopy, Vols. I and II, edited by R. L. Cohen (New York: Academic, 1976 and 1980),

Mössbauer Spectroscopy, edited by U. Gonser (Berlin: Springer-Verlag, 1981).

مسائل

۱. هریك از هسته‌های زیر، در گذار بین‌حالت برانگیخته و حالت پایه، یك فوتون گاما گسیل می‌کنند. با در دست‌داشتن انرژی فوتون، انرژی حالت برانگیخته را بیابید و دربارهٔ رابطهٔ بین انرژی پس‌زنی هسته و خطای تجربی انرژی فوتون بحث کنید: (الف) ^{51}V؛ (ب) $320{,}0 \pm 0{,}0005\,keV$ در $0{,}000842\,keV \pm 1475{,}786$ در ^{110}Cd؛ (ج) $0{,}017\,keV \pm 1274{,}545$ در ^{22}Ne؛ (د) $0{,}047\,keV \pm 3451{,}152$ در ^{56}Fe؛ (ه) $0{,}000074\,keV \pm 884{,}54174$ در ^{192}Ir.

۲. پس از واپاشی ^{198}Au، سه پرتو γ از حالات ^{198}Hg گسیل می‌شوند که انرژی‌شان (برحسب keV) به ترتیب عبارت‌اند از: $411{,}80441 \pm 0{,}00015$؛ $675{,}88743 \pm 0{,}00069$؛ و $1087{,}69033 \pm 0{,}00074$. فرض براین است که این واپاشی به‌دو حالت برانگیختهٔ E_1 و E_2 در ^{198}Hg منجر می‌شود، و گاماها به‌ترتیب متناظر با گذارهای $E_1 \to E_0$، $E_2 \to E_0$، و $E_2 \to E_0$ هستند (که E_0 نمایندهٔ حالت پایه است). اگر این فرض صحیح باشد، انتظار داریم $E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2} = E_{\gamma_3}$ باشد که این رابطه با توجه به خطای آزمایش، به‌تقریب ولی نه به‌دقت برقرار است. نشان دهید که چگونه با درنظر گرفتن پس‌زنی هسته می‌توان این اختلاف را از میان برد.

۳. محاسبهٔ احتمال گسیل تابش چارقطبی الکتریکی شامل جمله‌ای به صورت معادلهٔ (۳۶.۳) با شاخصهای مناسب تابع‌موجهای اولیه و نهایی است. برای این انتگرال، صحت قواعد گزینش پاریته را در گذارهای چارقطبی الکتریکی بیازمایید.

۴. (الف) برای یك هستهٔ سبك ($A \approx 10$) نسبت احتمالات گسیل تابش چارقطبی و دوقطبی را طبق براورد وایسکوف محاسبه کنید. کلیهٔ انتخابهای ممکن برای پاریتهٔ حالات اولیه و نهایی را در نظر بگیرید. (ب) این محاسبه را برای یك هستهٔ سنگین تکرار کنید ($A \approx 200$).

۵. درهسته‌ای که بامدل دورانی توصیف شده‌است (شکل ۲۲.۵)، دومین حالت برانگیخته همواره به صورت 4^+ است. این حالت با تابش $E2$ به‌حالت 2^+ واپاشیده می‌شود. این مشاهده‌را بامحاسبهٔ مبتنی‌بر براوردهای وایسکوف درموارد زیر توجیه کنید: (الف) نسبت بین احتمال واپاشی $E2$ وواپاشیهای هشت‌قطبی ($L = 3$) وشانزده‌قطبی ($L = 4$) به حالت 2^+، و (ب) نسبت بین احتمال واپاشی $E2$ و واپاشی شانزده‌قطبی به حالت

پایه. (یادآوری: این‌حالات، حالات دورانی جمعی هستند که برای آنها براوردهای وایسکوف را نباید چندان جدی گرفت.)

۶. برای گذارهای گامای زیر، کلیهٔ چندقطبیهای مجاز را به دست آورید و نشان دهید که کدام چندقطبی در تابش گسیلی شدت بیشتری دارد.

(الف) $\frac{9^-}{2} \to \frac{7^+}{2}$ (د) $4^+ \to 2^+$

(ب) $\frac{1^-}{2} \to \frac{7^-}{2}$ (ه) $\frac{11^-}{2} \to \frac{3^+}{2}$

(ج) $1^- \to 2^+$ (و) $3^+ \to 3^+$

۷. در یك فرایند واپاشی که به‌حالت نهایی دریك هستهٔ Z زوج و N زوج می‌انجامد، فقط سه پرتو γ باانرژیهای ۱۰۰، ۲۰۰، و ۳۰۰ keV گسیل می‌شوندکه به‌ترتیب ازنوع $E1$، $E2$، و $E3$ هستند. دو نمودار تراز مختلف وقابل‌قبول را برای این هسته (که ضمناً با نظام شناخته‌شدهٔ ساختار هسته‌ای سازگار باشند) رسم کنید ومحتملترین اسپین و پاریتهٔ مربوط به‌این‌حالات را تعیین کنید. با چه نوع آزمایشی می‌توان بین این‌دو نمودار پیشنهادی تفاوت قایل‌شد.

۸. یك‌هسته باشروع‌ازحالات‌پایه دارای حالات‌متوالی زیر است: $(3/2)^+$، $(7/2)^+$، $(5/2)^+$، $(1/2)^-$، و $(3/2)^+$. نمودار ترازها را رسم کنید و گذارهای مجاز γ با شدت زیاد را نشان‌دهید ونوع آنها را تعیین کنید.

۹. حالت ایزومری 2^+ در ^{60}Co با انرژی ۵۸٫۶ keV به‌حالت پایهٔ 5^+ واپاشیده می‌شود. تبدیل‌داخلی با گسیل γ رقابت می‌کند؛ ضرایب تبدیل‌مشاهده شده $\alpha_K = 41$، $\alpha_L = 7$، و $\alpha_M = 1$ هستند. (الف) نیمه‌عمر انتظاری حالت 2^+ را درصورتی که نوع گذار $M3$ فرض‌شود، به‌دست آورید و آن‌را بانیمه‌عمر مشاهده‌شدهٔ ۱۰٫۵min مقایسه‌کنید. (ب) اگر گذار حاوی جزء کوچکی از تابش $E4$ باشد، تغییر نیمه‌عمر را چگونه براورد می‌کنید؟ (ج) حالت 2^+ با گسیل مستقیم β نیز به ^{60}Ni واپاشیده می‌شود. انرژی بیشینهٔ β برابر ۱٫۵۵ MeV و $\log ft$ برابر ۷٫۲ است. حالت 2^+ در ۰٫۲۵ درصد موارد با گسیل β و در ۹۹٫۷۵ درصد موارد با گسیل γ و تبدیل داخلی واپاشیده می‌شود. درنظر گرفتن گسیل β چه تأثیری در نیمه‌عمر مشاهده شده دارد؟

۱۰. یك هستهٔ Z زوج و N زوج دارای رشته ترازهای متوالی زیر در بالای حالت پایهٔ 0^+ است: 2^+(۸۹ keV)، 4^+(۲۸۸ keV)، 6^+(۵۸۵ keV)، 0^+(۱۰۵۰keV)، 2^+(۱۱۲۹ keV). (الف) نمودار ترازهای انرژی را رسم کنید و کلیهٔ گذارهای قابل‌قبول γ ونوع چندقطبی آنهارا مشخص کنید. (ب) با درنظر گرفتن تبدیل‌داخلی، چه گذارهای اضافی و چه نوع چندقطبیتی ظاهر می‌شوند؟

۱۱. (الف) پنج یا شش نمونه از گذارهای $0^+ \rightarrow 2^+$ از اولین حالات برانگیختهٔ «دورانی» هسته‌های $150 < A < 190$ را انتخاب کنید. (برای دستیابی به اطلاعات طیف‌نمایی هسته از مراجع استاندارد استفاده کنید.) نسبت بین آهنگ واپاشی مشاهده‌شدهٔ γ و براورد وایسکوف متناظر آن را محاسبه کنید. تصحیح تبدیل داخلی در طول‌عمرهای محاسبه شده را درصورت لزوم انجام دهید. (ب) این محاسبه را برای هسته‌های «ارتعاشی» $60 < A < 150$، بدون‌درنظر گرفتن پوسته‌های بسته، تکرار کنید. (ج) در مورد تفاوتهای بین گذارهای «دورانی» و «ارتعاشی» گاما به‌چه نتایجی می‌توان رسید؟

۱۲. جدول ایزوتوپها چندقطبی بودن گذارهای γ وطول‌عمر حالات برانگیخته را نشان می‌دهد. با جستجو دراطلاعات داده شده، نموداری مشابه شکل ۱۳.۱۰ آماده کنید که طول‌عمر گذارهای $M2$ را نشان دهد. رابطهٔ بین طول‌عمر و انرژی گذار را بررسی کنید (درمواردی که تراز با چندگذار واپاشیده می‌شود از نیمه‌عمرهای جزئی استفاده کنید.) نمونه‌های مورد بررسی شامل ^{39}Ar، ^{73}As، ^{147}Eu، ^{165}Ho، ^{181}Ta، و ^{182}W است، ولی می‌توانید بسیاری از موارد دیگر را نیز درنظر بگیرید.

۱۳. از جمله هسته‌هایی که درآنها گذارهای $E4$ دیده می‌شود، هسته‌های ^{44}Sc، ^{52}Mn، ^{86}Rb، ^{93}Mo، ^{114}In، و ^{202}Pb هستند. طول‌عمرهای جزئی این گذارها را بااستفاده از اطلاعات طیف‌نمایی به‌دست آورید، وآنها را با مقادیر محاسبه‌شده از براوردهای وایسکوف مقایسه کنید.

۱۴. جذب یك نوترون بسیارکم‌انرژی توسط ^{113}Cd منجر به تولید حالت برانگیختهٔ ^{114}Cd می‌شود، که با گسیل پرتو γ مستقیماً به‌حالت پایهٔ ^{114}Cd واپاشیده می‌شود. (الف) انرژی پرتو γ را با چشمپوشی از پس‌زنی هسته محاسبه کنید. (ب) انرژی جنبشی ^{114}Cd پس‌زن را محاسبه کنید.

۱۵. در بخش ۲.۵، حالات مدل ارتعاشی برای هسته‌های Z زوج و N زوج تا چندتایهٔ سه‌فونونی 0^+، 2^+، 3^+، 4^+، و 6^+ مورد بحث قرار گرفت. این مدل قواعد گزینش گسیل γ را نیز به‌دست‌می‌دهد: عدد فونونی باید دقیقاً به‌اندازهٔ یك واحد تغییر کند، وفقط گذارهای $E2$ مجاز هستند. یك‌نمودار تراز ارتعاشی رسم کنید که کلیهٔ گذارهای مجاز γ را با شروع از چندتایهٔ سه فونونی نشان دهد (از شکل ۱۹.۵ به عنوان مبنا استفاده کنید).

۱۶. یك‌نمودار واپاشی، انرژیهای زیررا (برحسب keV) نشان‌می‌دهد: ۳۲٫۷، ۴۲٫۱، ۷۴٫۸، ۸۴٫۰، ۱۲۶٫۱، و ۱۵۸٫۸. از مطالعات همفرودی این واپاشی به‌دونتیجه می‌رسیم: فقط یکی از گاماها باهیچ گامای دیگری همفرود نیست، وهیچیك ازگاماها با بیش ازسه گامای دیگر همفرود نیست. گاماها پس از یك واپاشی بتازا که فقط به‌یك تراز منتهی می‌شود گسیل می‌شوند. بااستفاده ازاین‌اطلاعات یك‌نمودار تراز قابل‌قبول پیشنهاد کنید. (یادآوری: دوترتیب سازگار با اطلاعات داده شده برای این پرتوهای گاما می‌توان ارائه‌داد.)

۱۷. درمطالعهٔ الکترونهای تبدیل گسیل‌شده‌ازیك‌فرایند واپاشی،انرژیهای زیراندازه‌گیری شده‌اند (برحسب keV): ۲۰۷٫۴۰، ۲۰۴٫۶۴، ۱۹۳٫۳۶، ۱۵۷٫۵۷، ۱۵۴٫۸۱، ۱۴۳٫۵۳، ۱۲۵٫۱۰، ۷۵٫۲۷، ۴۹٫۰۳، ۴۶٫۲۷، ۳۴٫۹۹. انـرژی بستگـی الکترونها درپوسته‌های‌مختلف‌عبارت‌انداز: ۸۳٫۱۰ keV (پوستهٔK)، ۱۴٫۸۴keV (پوستهٔL)، ۳٫۵۶keV (پوستهٔM)، و ۰٫۸۰ keV (پوستهٔN). حداقل‌تعداد گاماهای مولد این‌گروه الکترونهای مشاهده شده وانرژیهایشان را به‌دست‌آورید.

۱۸. برمبنای اطلاعات شکل ۱۸.۱۰ وجدول ۲.۱۰، کلیهٔ طول‌عمرهای جزئی برای گسیل گاما و الکترون را از تراز $^{-}8$ هستهٔ ^{180}Hf پیدا کنید.

۱۹. برای هریك از گذارهای اثر موسباؤر که در زیـر مشخص شده‌انـد، پهنای طبیعی، پهنای دوپلری در دمای اتاق، پهنای دوپلری در دمای هلیم مایع (۴K)، و انـرژی پس‌زنی هسته را پیدا کنید: (الف) گذار ۷۳ keV، ۳٫۶ ns در ^{193}Ir؛ (ب) گذار ۱۴٫۴ keV، ۹۸ ns در ^{57}Fe؛ (ج) گذار ۶٫۲ keV، ۸٫۶ μs در ^{181}Ta؛ (د) گذار ۲۳٫۹ keV، ۱۷٫۸ ns در ^{119}Sn؛ (ه) گذار ۹۵ keV، ۲۲ ps در ^{165}Ho. نیمه‌عمرها داده شده‌اند.

۲۰. جذب‌تابش دوقطبی مغناطیسی گذار موسباؤر ۲۷٫۸ keV در ^{129}I هسته را از حالت پایهٔ $(7/2)^{+}$ به‌حالت برانگیختهٔ $(5/2)^{+}$ می‌برد. مقدار گشتاورهای دوقطبی مغناطیسی و چارقطبی الکتریکی به‌ترتیب $\mu(7/2) = +2.6\ \mu_N$، $\mu(5/2) = +2.8\ \mu_N$، $Q(7/2) = -0.55\ b$، و $Q(5/2) = -0.68\ b$ است. نمودار شکافتگی‌حالت mتایـه را (**مشابه شکلهای** ۳۰.۱۰ و ۳۱.۱۰) بـرای مـوارد دوقطبی مغناطیسی و چارقطبی‌الکتریکی‌رسم کنید،وتعدادمؤلفه‌های طیف‌موسباؤر را نشان‌دهید. (راهنمایی: میدان‌مغناطیسی(BیاH)وشیب‌میدان‌الکتریکی(V_{zz}یاq) را می‌توان‌مثبت‌درنظر گرفت.

۲۱. دراغلب‌کارهای فیزیك هسته‌ای، ثابت واپاشی λ را برای یك نمونهٔ هسته‌ای، ثـابت واقعی درنظرمی‌گیریم. اما، دراین‌فصل ودرفصل‌قبلی با دوفرایند روبه‌رو شده‌ایم که درآنها آهنگ واپاشی هسته‌ها می‌تواند تا حدی به‌حالت شیمیایی اتمهایشان بستگی داشته‌باشد. دربارهٔ این‌دوفرایند بحث‌کنید ونشان‌دهیدکه چگونه حالت‌اتمی می‌تواند درآهنگ واپاشی هسته‌ها مؤثر باشد. [برای‌بحث‌پیرامون‌این‌موضوع ونمونه‌های‌این فرایند، می‌توانید به‌مقالهٔ مروری زیر رجوع‌کنید:

G. T. Emery, *Ann. Rev. Nucl. Sci.* 22, 165(1972)].

پیوستها

پیوست الف

نسبیت خاص

معادلات موردنیاز درواپاشی بتازای هسته‌ها و دربسیاری ازمحاسبات مربوط به‌فرایندهای پرانرژی ومیان ـ انرژی، معادلات سینماتیك نسبیتی هستند. مختصری از این معـادلات را ذیلا مرور می‌کنیم.

الف.۱ تبدیل لورنتس

اغلب‌لازم می‌شود که معادلات‌را از چارچوب مرجع آزمایشگاه به‌چارچوب متحرك‌دیگری که نسبت به‌آزمایشگاه سرعت ثابت دارد، مثلا به‌چارچوب مرکز جرم یا چارچوب‌سکون ذرهٔ متحرك،منتقل کنیم. تبدیل نسبیتی این‌انتقال چارچوب مرجع‌را تبدیل‌لورنتس‌می‌گویند.

حرکت ذره را دریك چارچوب بامختصات (x, y, z, t) و درچارچوب دیگر با مختصات (x', y', z', t') مشخص‌می‌کنیم. فرض‌می‌کنیم که‌چارچوب دوم نسبت به‌اولی با سرعت u درجهت مشترك x و x' درحرکت است. دراین‌صورت داریم

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(x-ut) \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \gamma(t-ux/c^{2}) \end{aligned} \qquad (\text{الف.۱})$$

که در آن $\gamma=(1-u^2/c^2)^{-1/2}$ است.

سرعت ذره را می‌توان با استفاده از معادلات بالا و بامحاسبهٔ dx'/dt'، dy'/dt' و dz'/dt' از یك چارچوب به‌چارچوب دیگر تبدیل کرد. معادلات تبدیل سرعت چنین می‌شوند

$$v'_x=\frac{v_x-u}{1-uv_x/c^2}$$

$$v'_y=\frac{v_y}{\gamma(1-uv_x/c^2)} \qquad \text{(الف.۲)}$$

$$v'_z=\frac{v_z}{\gamma(1-uv_x/c^2)}$$

یکی از پیامدهای مهم این تبدیلها در فیزیك هسته‌ای و ذرات بنیادی، اتساع زمان است. این بدان معنی است که مدت‌زمان تحقق یك پدیده که در یك چارچوب مرجع اندازه‌گیری می‌شود، با اندازه‌گیری زمان‌همان پدیده درچارچوب مرجعی که نسبت به‌اولی درحرکت است متفاوت خواهد بود. مدت‌زمان تحقق پدیده درچارچوبی که نسبت بدان «درحال سکون» است، یعنی چارچوبی که رویدادهای ابتدا وانتهای فاصلهٔ زمانی تحقق پدیدهٔ موردنظر در آن دریك نقطهٔ ثابت (x, y, z) رخ می‌دهد، از مدت‌زمان‌اندازه‌گیری شده در چارچوب مرجع **متحرك کمتر است**. این مدت زمان اندازگیری شده در چارچوب مرجع «درحال سکون» را زمان ویژه می‌گویند. فاصلهٔ زمان اندازه‌گیری شده درتمام چارچوبهای مرجع متحرك، طولانیتر از زمان ویژه است. برای نمونه، طول عمر ذرات واپاشنده عموماً درچارچوب آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شود که‌در آن‌ذره‌ممکن است درحال حرکت باشد. بنابراین طول عمری که ما در آزمایشگاه اندازه می‌گیریم از طول‌عمر ویژه، که درچارچوب سکون ذره اندازه‌گیری می‌شود، بیشتر است. رابطهٔ بین فاصله‌زمانی ویژه Δt_0 و فاصلهٔ زمانی Δt که در چارچوب متحرك اندازه‌گیری می‌شود، به‌صورت زیر است

$$\Delta t=\gamma\Delta t_0 \qquad \text{(الف.۳)}$$

باید توجه داشت که درسرعتهای نسبی کم $\gamma\approx 1$ است، درحالی که درسرعتهای‌نسبی نزدیك به‌سرعت نور داریم $\gamma\to\infty$.

الف.۲ دینامیك نسبیتی

درنسبیت خاص، برای آنکه فرمولبندی تحلیل برخوردها از سازگاری درونی برخوردار باشد، مجبور می‌شویم که مفاهیم بنیادی جرم، تکانه، و انرژی را از نو تعریف کنیم. تکانهٔ نسبیتی ذره‌ای که با سرعت v درحرکت است، چنین می‌شود

$$p=\frac{mv}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \qquad \text{(الف.۴)}$$

که در آن m جرم سکون ذره است، ومنظور از آن جرم اندازه‌گیری شدهٔ ذره درچارچوب مرجعی است که ذره نسبت به آن درحال سکون است. در بسیاری از معادلات نسبیت خاص، جرم نسبیتی به‌صورت γm ظاهر می‌شود که این‌طرز نمایش می‌تواند با مشکلاتی همراه باشد. زیرا به‌طور کلی این درست نیست که در عبارتهای کلاسیك صرفاً جرم را با جرم نسبیتی جایگزین کنیم. اما اگر تکانه را به‌صورت معادلهٔ (الف. ۴) درنظر بگیریم، مفهوم کلاسیك پایستگی تکانه همچنان برقرار خواهد بود. با وجود اینکه استفاده از افزایش جرم نسبیتی ذرهٔ متحرك گهگاه کار محاسبه را آسانتر می‌کند (مانند مورد سیکلوترونها)، دراین کتاب فقط جرم سکون m را به‌کار می‌بریم تا از هرگونه اشتباهی جلوگیری شود. در انحراف مغناطیسی ذرات باردار می‌توانیم شعاع مسیر را برحسب تکانهٔ ذرهٔ منحرف شده بنویسیم تا اشکالی پیش نیاید.

اگر تکانهٔ ذره به صورت معادلهٔ (الف.۴) تعریف شود، انرژی جنبشی نسبیتی چنین می‌شود

$$T=E-mc^2 \qquad \text{(الف.۵)}$$

که در آن E انرژی نسبیتی کل ذره است

$$E=\sqrt{p^2c^2+m^2c^4} \qquad \text{(الف.۶)}$$

برای ذرات بدون جرم (مانند فوتون و نوترینو) که با سرعت نور حرکت می‌کنند، داریم

$$E=pc \qquad \text{(الف.۷)}$$

برای ذراتی که انرژی کل E در آنها خیلی بزرگتر از انرژی سکون‌شان mc^2 است، معادلهٔ (الف.۷) تقریب خوبی به شمار می‌رود.

با استفاده از بسط دوجمله‌ای، معادلهٔ (الف. ۵) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت

$$T=\frac{1}{2}mv^2\left(1+\frac{3}{4}\frac{v^2}{c^2}+\dots\right) \qquad \text{(الف.۸)}$$

بدین گونه، درسرعتهایی که نسبت به c کوچك‌اند، فرمول کلاسیك $(1/2)mv^2$ از دقت کافی برخوردار است.

در فرایندهای واپاشی بتازا ودیگر برهم‌کنشهای ضعیف، عبارات مربوط به طیف انرژی وتوزیع زاویه‌ای اغلب شامل v/c است. بااستفاده از معادلهٔ (الف. ۶) می‌توان نشان‌داد که

$$\frac{v}{c}=\frac{p}{E} \qquad \text{(الف.۹)}$$

در برخوردهای باانرژی پایین، می‌توان از فرمولهای کلاسیك پایستگی تکانهٔ خطی وپایستگی انرژی استفاده کرد [دراینجا فرض این است که معادلهٔ مقدار Q به صورت $Q=(m_i-m_f)c^2$ به‌کار برده می‌شود، که عملا یك فرمول نسبیتی است]. در برخورد با انرژی بالا باید فرمولهای نسبیتی‌را به‌کار ببریم. هرچندکه فرمولهای نسبیتی درانرژیهای پایین‌هم قابلیت‌کاربرد دارند، ولی این‌کاربردها اغلب اسباب‌زحمت‌اند وباعث پیچیدگی عملیات‌جبری می‌شوند. ازاین‌رو، درهرجایی که ممکن‌باشد، برای‌تحلیل فرایندهای‌واپاشی وواکنش هسته‌ای از فرمولهای نانسبیتی استفاده خواهیم کرد.

الف.۳ تبدیل انرژی و تکانه

بااستفاده از تبدیل‌لورنتس، می‌توان معادلات نسبیتی‌تبدیل‌انرژی وتکانهٔ خطی‌را به‌صورت زیر به‌دست آورد

$$\begin{aligned} p'_x &= \gamma(p_x - uE/c^2) \\ p'_y &= p_y \\ p'_z &= p_z \\ E' &= \gamma(E - up_x) \end{aligned} \qquad \text{(الف.۱۰)}$$

که در آن $\mathbf{p}$ و E دریکی ازچارچوبها، و $\mathbf{p}'$ و E' در چارچوب دیگری‌که با سرعت u نسبت به‌اولی درجهت x درحرکت است، اندازه‌گیری می‌شوند.

پیوست ب

چارچوب مرجع مرکز جرم

آسانترین‌راه برای بررسی‌واکنشهای هسته‌ای، استفاده‌ازچارچوب‌مرجع مرکزجرم(CM) است‌که درآن تکانهٔ خطی‌کل ذرات واکنش‌کننده برابر صفر می‌شود. [چنانکه در بحث زیر خواهیم‌دید، کاربرد نسبیت خاص‌باعث می‌شودکه چارچوب مرکز جرم با چارچوب مرکزتکانه تفاوت داشته‌باشد. برای واکنشها و واپاشیهایی‌که دراین‌کتاب بررسی‌می‌شوند و درانرژیهای‌پایین‌رخ می‌دهند، بااطمینان‌خاطر می‌توان معادلات نانسبیتی را به‌کار برد و وجه افتراق بین چارچوبها را بی‌اهمیت دانست. اگر بخواهیم‌کاملا درست‌عمل‌کنیم، باید مطابق معادلهٔ (ب.۲) چارچوب CM را به صورت چارچـوب مرکز تکانه تعریف‌کنیم و درعین‌حال تکانه را با عبارت نسبیتی‌اش درنظر بگیریم، یعنی به‌جای عبارت‌کلاسیك mv معادلهٔ (الف.۴) را قراردهیم.] در دستگاه‌آزمایشگاه (L)، واکنشها معمولا بـا فرود یك باریکه از ذرات تابشی برهدفی از ذرات درحال سکون انجام می‌شوند. بنابراین، پیش ازآنکه بتوانیم‌آزمایش ونظریه را باهـم مقایسه‌کنیم، باید خواص موردمشاهدهٔ واکنش (انرژی و تکانهٔ ذرات حاصل، سطح مقطعها) را از چارچوب مرجع L به‌چارچوب CM برگردانیم.

ب.۱ سینماتیك واکنش

واکنش مورد بررسی را به‌صورت زیر درنظر می‌گیریم

$$a+X \rightarrow Y+b$$

که در آن انرژی جنبشی باریکهٔ ذرات فرودی a در آزمایشگاه برابر T_a است وذرات هدف X در آزمایشگاه ساکن‌اند. برای آنکه در اثـر تعدد شاخصها سردرگم نشویم، تمـام مختصه‌های دستگاه L را بامتغیرهای بدون‌پریم $(T_a, v_a, T_Y, T_b, \theta_Y, \theta_b, \ldots)$ وتمام مختصه‌های متناظر در دستگاه CM را بامتغیرهای پریم‌دار $(T'_a, v'_a, T'_Y, \ldots)$ نشان می‌دهیم.

برای آسانی کاربررسی، تکانهٔ ذرات فرودی a را درجهت محور x درنظر می‌گیریم. دراین‌صورت، برای واکنشهای انجام شونده در انرژی پایین که در آن سینماتیك نانسبیتی قابل استفاده است، تکانه‌های خطی اولیه عبارت‌اند از

$$p_x = m_a v_a \qquad (ب.۱)$$

$$p'_x = m_a v'_a + m_X v'_X = 0 \qquad (ب.۲)$$

این دو معادله، به‌ترتیب در چارچوبهای L و CM نوشته شده‌اند. اگر سرعت چارچوب CM از دیدگاه L برابر v_{CM} باشد، آنگاه داریم

$$v'_a = v_a - v_{CM} \qquad (ب.۳)$$

$$v'_X = -v_{CM} \qquad (ب.۴)$$

می‌توان نشان‌داد که شرط لازم وکافی برای برقراری معادلهٔ (ب. ۲) چنین است

$$v_{CM} = v_a \frac{m_a}{m_a + m_X} \qquad (ب.۵)$$

پس از بـرخورد، از دیدگاه چارچوب CM ذرات b و Y باید درخلاف جهت یکدیگـر در حرکت باشند (به طوری که تکانهٔ خطی کل همچنان صفر بماند). مؤلفه‌های x و y تکانهٔ نهایی را درچارچوب L به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم

$$p_x = m_b v_b \cos\theta_b + m_Y v_Y \cos\theta_Y \qquad (ب.۶)$$

$$p_y = m_b v_b \sin\theta_b - m_Y v_Y \sin\theta_Y \qquad (ب.۷)$$

که در آنها با فرض θ_b و θ_Y در دوطرف محور x، علامتهای مؤلفه‌های y را به‌طور صریح درمعادلهٔ (ب. ۷) مشخص کرده‌ایم.

جهات حرکت ذرات نهایی را درچارچوب CM با θ'_b و $\theta'_Y = -\theta'_b$ نشان می‌دهیم. تکانهٔ کل ذرات در راستای حرکت باید برابر صفر باشد، یعنی

$$m_b \mathbf{v}'_b + m_Y \mathbf{v}'_Y = 0 \qquad (ب.۸)$$

بااستفاده ازمعادلات (ب.۶) تا (ب.۸) می‌توان به نتایج جالب‌توجهی دست‌یافت: سرعت مرکز جرم پس از واکنش باسرعت پیش از واکنش برابر نیست. (این نکته‌ممکن

است شرط یکنواخت‌بودن حرکت مرکز جرم را، دریك سیستم منزوی تحت‌تأثیر نیروهای داخلی، نقض کند. اما باید توجه داشت که بنا بر فیزیك کلاسیك، جرم کل سیستم نمی‌تواند تغییر کند. چون جرم اولیه با جرم نهایی مساوی نیست، واختلاف‌میان آنها به‌اندازهٔ مقدار Q است، معادلات کلاسیك به‌طورکامل برقرار نیستند.) رابطهٔ بین سرعت نهایی و سرعت اولیهٔ CM چنین به‌دست می‌آید

$$v_{\mathrm{CM},f}=\left(\frac{m_{\mathrm{a}}+m_{\mathrm{X}}}{m_{\mathrm{b}}+m_{\mathrm{Y}}}\right)v_{\mathrm{CM},i} \qquad (\text{ب.۹})$$

یادآور می‌شود که دربرخورد الاستیك، داریم $v_{\mathrm{CM},f}=v_{\mathrm{CM},i}$. نسبت بین‌جرمها درمعادلهٔ (ب. ۹) معمولا خیلی به‌واحد نزدیك است. اختلاف جرمهای‌اولیه ونهایی مساوی مقدار Q می‌شود، که در واکنشهای انرژی پایین نوعاً درحدود 10^{-3} تا 10^{-5} برابر کل انرژی واکنش است.

بااستفاده از قانون پایستگی انرژی در چارچوبهای L و CM انرژی ذرهٔ b را به‌صورت زیر به‌دست می‌آوریم

$$T'_{\mathrm{b}}=\frac{m_{\mathrm{b}}}{m_{\mathrm{Y}}+m_{\mathrm{b}}}\left[Q+\left(1-\frac{m_{\mathrm{a}}}{m_{\mathrm{Y}}+m_{\mathrm{b}}}\right)T_{\mathrm{a}}\right] \qquad (\text{ب.۱۰})$$

معادلهٔ متناظر برای‌انرژی T_{b} را درچارچوب L به‌صورت‌معادلهٔ (۵.۱۱) دراختیارداشتیم.

اگر معادلات تکانه وسرعت را به‌همین‌ترتیب بررسی کنیم، رابطهٔ زیر را برای تبدیل زوایا به‌دست می‌آوریم

$$\tan\theta_{\mathrm{b}}=\frac{\sin\theta'_{\mathrm{b}}}{\cos\theta'_{\mathrm{b}}+\gamma} \qquad (\text{ب.۱۱})$$

که درآن داریم

$$\gamma=\frac{v_{\mathrm{CM}}}{v'_{\mathrm{b}}} \qquad (\text{ب.۱۲})$$

$$=\left[\frac{m_{\mathrm{a}}m_{\mathrm{b}}}{m_{\mathrm{X}}m_{\mathrm{Y}}}\,\frac{T_{\mathrm{a}}}{T_{\mathrm{a}}+Q(1+m_{\mathrm{a}}/m_{\mathrm{X}})}\right]^{1/2} \qquad (\text{ب.۱۳})$$

ب.۲ سطح مقطعها

سطح‌مقطع کل فقط احتمال مطلق وقوع واکنش را به دست می‌دهد، و بنابراین تبدیل چارچوبهای L و CM درآن اثری ندارد. اما سطح مقطع دیفرانسیلی وابسته به متغیر زاویه‌ای است، ودرنتیجه به‌نوع چارچوب مرجع بستگی پیدا می‌کند.

تعداد ذراتی که به‌یك آشکارساز کوچك می‌رسند، درهر دوچارچوب برابر $d\sigma$ است که اگر آن‌را به‌صورت $d\sigma=(d\sigma/d\Omega)d\Omega\equiv\sigma(\theta)d\Omega$ بنویسیم، رابطهٔ بین‌سطح‌مقطعهای دیفرانسیلی چنین می‌شود

$$d\sigma=\sigma(\theta)d\Omega=\sigma(\theta')d\Omega' \qquad (\text{ب}.۱۴)$$

با دردست‌داشتن سطح مقطع دیفرانسیلی $\sigma(\theta)$ که در آزمایشگاه اندازه‌گیری می‌شود، سطح مقطع دیفرانسیلی چارچوب CM عبارت است از

$$\sigma(\theta')=\sigma(\theta)\frac{d\Omega}{d\Omega'} \qquad (\text{ب}.۱۵)$$

با انتگرال‌گیری متغیر نامطلوب سمتی در هر دو چارچوب مرجع، داریم $d\Omega=۲\pi\sin\theta\, d\theta$ و $d\Omega'=۲\pi\sin\theta' d\theta'$ و باتوجه به معادلهٔ (ب. ۱۱) خواهیم داشت

$$\frac{d\Omega}{d\Omega'}=\frac{|۱+\gamma\cos\theta'|}{(۱+۲\gamma\cos\theta'+\gamma^۲)^{۳/۲}} \qquad (\text{ب}.۱۶)$$

ب.۳ معادلهٔ شرودینگر مرکز جرم (CM)

معادلهٔ‌شرودینگر ناظر بر برهم‌کنش‌متقابل‌ذرات درگیر در واکنش‌را نیزمی‌توان‌به‌صورت CM درآورد. درمختصات دکارتی، معادلهٔ ترکیبی دو ذره را می‌توان چنین نوشت

$$-\frac{\hbar^۲}{۲m_a}\left(\frac{\partial^۲\Psi}{\partial x_a^۲}+\frac{\partial^۲\Psi}{\partial y_a^۲}+\frac{\partial^۲\Psi}{\partial z_a^۲}\right)-\frac{\hbar^۲}{۲m_X}\left(\frac{\partial^۲\Psi}{\partial x_X^۲}+\frac{\partial^۲\Psi}{\partial y_X^۲}+\frac{\partial^۲\Psi}{\partial z_X^۲}\right)$$
$$+V(\mathbf{r}_a,\mathbf{r}_X)\Psi=E\Psi \qquad (\text{ب}.۱۷)$$

که در آن $\mathbf{r}_a=(x_a, y_a, z_a)$ و $\mathbf{r}_X=(x_X, y_X, z_X)$ معرف مختصات دو ذره و Ψ معرف تابع موج ترکیبی است. با تعریف مختصات CM به‌صورت

$$\mathbf{R}=(X,Y,Z)=(m_a\mathbf{r}_a+m_X\mathbf{r}_X)/(m_a+m_X)$$

ومختصات نسبی $\mathbf{r}=(x,y,z)=\mathbf{r}_a-\mathbf{r}_X$، می‌توان مشتقات جزئی را برحسب مختصات جدید نوشت. مثلا داریم

$$\frac{\partial\Psi}{\partial x_a}=\frac{\partial\Psi}{\partial X}\frac{\partial X}{\partial x_a}+\frac{\partial\Psi}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial x_a}$$
$$=\frac{m_a}{m_a+m_X}\frac{\partial\Psi}{\partial X}+\frac{\partial\Psi}{\partial x}$$

وهمین‌طور برای سایر مشتقات اول ودوم. نتیجه چنین می‌شود

$$-\frac{\hbar^2}{2M}\left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial Y^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial Z^2}\right)-\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2}\right)+V\Psi=E\Psi$$

(ب. ۱۸)

که در آن $M=m_a+m_X$ جرم کل، و $m=m_a m_X/(m_a+m_X)$ جرم کاهیده است. اگر تابع پتانسیل فقط به‌مختصات نسبی $\mathbf{r}$ بستگی داشته باشد، آنگاه معادله به‌دو بخش جدا از هم تقسیم می‌شود که یکی از آنها فقط به حرکت CM بستگی دارد، و دیگری بخش نسبی است که به‌برهم‌کنش متقابل مربوط می‌شود. جداشدن تابع موج به صورت $\Psi=\psi_{CM}(X, Y, Z)\psi(x, y, z)$ خواهد بود. در بخش CM با یك ذرهٔ منفرد به‌جرم M سروکار داریم که آزادانه درحرکت است (یعنی با یك موج تخت روبه‌رو هستیم). بخش نسبی ψ ازحل معادلهٔ زیر به‌دست‌می‌آید

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right)+V(\mathbf{r})\psi=E\psi \qquad (\text{ب. ۱۹})$$

که‌در آن $\psi(x, y, z)$ تابع‌موج معرف برهم‌کنش بین ذرات است. اکنون این‌شکل ساده شدهٔ معادلهٔ دوجسمی را می‌توان به‌صورت معادلهٔ شرودینگر برای یك ذرهٔ منفرد به‌جرم کاهیدهٔ m که در پتانسیل ثابت $V(\mathbf{r})$، همانند پتانسیل بین‌دوجسم در آزمایشگاه، درحرکت است حل کرد. به‌کمك این حل می‌توان سطح مقطع را تعیین کرد، وسپس بااستفاده از معادلات تبدیل (ب.۱۵) و (ب.۱۶)، نتیجه را باسطح‌مقطع‌اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مقایسه کرد. معادلهٔ(ب.۱۹) را درمختصات قطبی کروی‌هم‌می‌توان‌نوشت[معادلهٔ (۱۶.۲)].

پیوست ج

جدول خواص هسته‌ای

خواص تعدادی از ایزوتوپهای انتخابی را در جدول زیر نشان‌داده‌ایم. برای هـر عنصر فقط ایزوتوپهای پایدار و ایزوتوپهای نسبتاً دراز ـ عمر را درنظر گرفته‌ایم. بـرای تمامی ایزوتوپها، جرم اتمی حالت پایه ووضعیت اسپین ـ پاریته‌را مشخص کرده‌ایم، ووضعیتهای نامطمئن اسپین ـ پاریته در داخل پرانتز مشخص شده‌اند. برای ایزوتوپهای پایدار، درصد فراوانی وبرای‌ایزوتوپهای‌رادیواکتیو، نیمه‌عمر ومد اصلی واپاشی (باعلامتهای قراردادی ε برای گیراندازی الکترون وهمچنین گسیل پوزیترون، β^- بـرای واپاشی بتای منفی، α برای واپاشی‌آلفا، f برای شکافت خود به‌خود) نشان‌داده شده‌اند. جرم‌اتمی برای اتمهای خنثی‌داده‌شده‌است. درستون نیمه‌عمر، یکای My معادل 10^6 سال است. میزان خطا درجرم اتمی، نوعاً درحدود 10^{-5}u (وبرای برخی از موارد ناپایدار درحدود 10^{-4}u) است. میزان‌خطاهای درصد فراوانی‌ونیمه‌عمر، نوعاًدرحدود آخرین‌رقمهای مندرج‌درجدول‌است.

	Z	A	جرم اتمی (u)[1]	I^π	فراوانی یا نیمه‌عمر
H	1	1	1.007825	$\frac{1}{2}^+$	*99.985%*
		2	2.014102	1^+	*0.015%*
		3	3.016049	$\frac{1}{2}^+$	12.3 y (β^-)
He	2	3	3.016029	$\frac{1}{2}^+$	*1.38×10^{-4}%*
		4	4.002603	0^+	*99.99986%*
Li	3	6	6.015121	1^+	*7.5%*
		7	7.016003	$\frac{3}{2}^-$	*92.5%*
		8	8.022486	2^+	0.84 s (β^-)
Be	4	7	7.016928	$\frac{3}{2}^-$	53.3 d (ε)
		8	8.005305	0^+	0.07 fs (α)
		9	9.012182	$\frac{3}{2}^-$	*100%*
		10	10.013534	0^+	1.6 My (β^-)
		11	11.021658	$\frac{1}{2}^+$	13.8 s (β^-)
B	5	8	8.024606	2^+	0.77 s (ε)
		9	9.013329	$\frac{3}{2}^-$	0.85 as (α)
		10	10.012937	3^+	*19.8%*
		11	11.009305	$\frac{3}{2}^-$	*80.2%*
		12	12.014353	1^+	20.4 ms (β^-)
		13	13.017780	$\frac{3}{2}^-$	17.4 ms (β^-)
C	6	9	9.031039	$\frac{3}{2}^-$	0.13 s (ε)
		10	10.016856	0^+	19.2 s (ε)
		11	11.011433	$\frac{3}{2}^-$	20.4 m (ε)
		12	12.000000	0^+	*98.89%*
		13	13.003355	$\frac{1}{2}^-$	*1.11%*
		14	14.003242	0^+	5730 y (β^-)
		15	15.010599	$\frac{1}{2}^+$	2.45 s (β^-)
N	7	12	12.018613	1^+	11 ms (ε)
		13	13.005739	$\frac{1}{2}^-$	9.96 m (ε)
		14	14.003074	1^+	*99.63%*
		15	15.000109	$\frac{1}{2}^-$	*0.366%*
		16	16.006100	2^-	7.13 s (β^-)

	Z	A	جرم اتمی (u).	I^π	فراوانی یا نیمه‌عمر
		17	17.008450	$\frac{1}{2}^-$	4.17 s (β^-)
		18	18.014081	1^-	0.63 s (β^-)
O	8	14	14.008595	0^+	71 s (ε)
		15	15.003065	$\frac{1}{2}^-$	122 s (ε)
		16	15.994915	0^+	*99.76%*
		17	16.999131	$\frac{5}{2}^+$	*0.038%*
		18	17.999160	0^+	*0.204%*
		19	19.003577	$\frac{5}{2}^+$	26.9 s (β^-)
		20	20.004076	0^+	13.5 s (β^-)
F	9	17	17.002095	$\frac{5}{2}^+$	64.5 s (ε)
		18	18.000937	1^+	110 m (ε)
		19	18.998403	$\frac{1}{2}^+$	*100 %*
		20	19.999981	2^+	11 s (β^-)
		21	20.999948	$\frac{5}{2}^+$	4.3 s (β^-)
		22	22.003030	$(3,4)^+$	4.2 s (β^-)
		23	23.003600	$(\frac{3}{2},\frac{5}{2})^+$	2.2 s (β^-)
Ne	10	17	17.017690	$\frac{1}{2}^-$	0.11 s (ε)
		18	18.005710	0^+	1.7 s (ε)
		19	19.001880	$\frac{1}{2}^+$	17.3 s (ε)
		20	19.992436	0^+	*90.51%*
		21	20.993843	$\frac{3}{2}^+$	*0.27%*
		22	21.991383	0^+	*9.22%*
		23	22.994465	$\frac{5}{2}^+$	37.6 s (β^-)
		24	23.993613	0^+	3.4 m (β^-)
		25	24.997690	$(\frac{1}{2},\frac{3}{2})^+$	0.60 s (β^-)
Na	11	20	20.007344	2^+	0.45 s (ε)
		21	20.997651	$\frac{3}{2}^+$	22.5 s (ε)
		22	21.994434	3^+	2.60 y (ε)
		23	22.989768	$\frac{3}{2}^+$	*100 %*
		24	23.990961	4^+	15.0 h (β^-)
		25	24.989953	$\frac{5}{2}^+$	60 s (β^-)
		26	25.992586	3^+	1.1 s (β^-)
		27	26.993940	$\frac{5}{2}^+$	0.30 s (β^-)
Mg	12	21	21.011716	$(\frac{3}{2},\frac{5}{2})^+$	0.123 s (ε)
		22	21.999574	0^+	3.86 s (ε)
		23	22.994124	$\frac{3}{2}^+$	11.3 s (ε)
		24	23.985042	0^+	*78.99%*
		25	24.985837	$\frac{5}{2}^+$	*10.00%*
		26	25.982594	0^+	*11.01%*
		27	26.984341	$\frac{1}{2}^+$	9.46 m (β^-)
		28	27.983877	0^+	21.0 h (β^-)
		29	28.988480	$\frac{3}{2}^+$	1.4 s (β^-)
Al	13	24	23.999941	4^+	2.07 s (ε)
		25	24.990429	$\frac{5}{2}^+$	7.18 s (ε)
		26	25.986892	5^+	0.72 My (ε)
		27	26.981539	$\frac{5}{2}^+$	*100 %*
		28	27.981910	3^+	2.24 m (β^-)
		29	28.980446	$\frac{5}{2}^+$	6.6 m (β^-)
		30	29.982940	3^+	3.7 s (β^-)
Si	14	26	25.992330	0^+	2.21 s (ε)
		27	26.986704	$\frac{5}{2}^+$	4.13 s (ε)
		28	27.976927	0^+	*92.23%*
		29	28.976495	$\frac{1}{2}^+$	*4.67%*
		30	29.973770	0^+	*3.10%*
		31	30.975362	$\frac{3}{2}^+$	2.62 h (β^-)
		32	31.974148	0^+	105 y (β^-)
		33	32.997920	$(\frac{3}{2}^+)$	6.2 s (β^-)
P	15	29	28.981803	$\frac{1}{2}^+$	4.1 s (ε)
		30	29.978307	1^+	2.50 m (ε)
		31	30.973762	$\frac{1}{2}^+$	*100 %*
		32	31.973907	1^+	14.3 d (β^-)
		33	32.971725	$\frac{1}{2}^+$	25.3 d (β^-)
		34	33.973636	1^+	12.4 s (β^-)
S	16	30	29.984903	0^+	1.2 s (ε)
		31	30.979554	$\frac{1}{2}^+$	2.6 s (ε)
		32	31.972071	0^+	*95.02%*
		33	32.971458	$\frac{3}{2}^+$	*0.75%*
		34	33.967867	0^+	*4.21%*
		35	34.969032	$\frac{3}{2}^+$	87.4 d (β^-)
		36	35.967081	0^+	*0.017%*
		37	36.971126	$\frac{7}{2}^-$	5.0 m (β^-)
		38	37.971162	0^+	170 m (β^-)
Cl	17	33	32.977452	$\frac{3}{2}^+$	2.51 s (ε)
		34	33.973763	0^+	1.53 s (ε)
		35	34.968853	$\frac{3}{2}^+$	*75.77%*
		36	35.968307	2^+	0.30 My (β^-)
		37	36.965903	$\frac{3}{2}^+$	*24.23%*
		38	37.968011	2^-	37.3 m (β^-)
		39	38.968005	$\frac{3}{2}^+$	56 m (β^-)
		40	39.970440	2^-	1.35 m (β^-)
		41	40.970590	$(\frac{1}{2},\frac{3}{2})^+$	31 s (β^-)
Ar	18	34	33.980269	0^+	0.844 s (ε)
		35	34.975256	$\frac{3}{2}^+$	1.78 s (ε)
		36	35.967546	0^+	*0.337%*
		37	36.966776	$\frac{3}{2}^+$	35.0 d (ε)
		38	37.962732	0^+	*0.063%*
		39	38.964314	$\frac{7}{2}^-$	269 y (β^-)
		40	39.962384	0^+	*99.60%*
		41	40.964501	$\frac{7}{2}^-$	1.83 h (β^-)

	Z	A	جرم اتمی (u)	I^{π}	فراوانی یا نیمه‌عمر
		42	41.963050	0^+	33 y (β^-)
		43	42.965670		5.4 m (β^-)
		44	43.965365	0^+	11.9 m (β^-)
K	19	37	36.973377	$\frac{3}{2}^+$	1.23 s (ε)
		38	37.969080	3^+	7.61 m (ε)
		39	38.963707	$\frac{3}{2}^+$	*93.26%*
		40	39.963999	4^-	1.28 Gy (β^-)
		41	40.961825	$\frac{3}{2}^+$	*6.73%*
		42	41.962402	2^-	12.4 h (β^-)
		43	42.960717	$\frac{3}{2}^-$	22.3 h (β^-)
		44	43.961560	2^-	22.1 m (β^-)
		45	44.960696	$\frac{3}{2}^+$	17 m (β^-)
		46	45.961976	(2^-)	115 s (β^-)
		47	46.961677	$\frac{1}{2}^+$	17.5 s (β^-)
Ca	20	38	37.976318	0^+	0.44 s (ε)
		39	38.970718	$\frac{3}{2}^+$	0.86 s (ε)
		40	39.962591	0^+	*96.94%*
		41	40.962278	$\frac{7}{2}^-$	0.10 My (ε)
		42	41.958618	0^+	*0.647%*
		43	42.958766	$\frac{7}{2}^-$	*0.135%*
		44	43.955481	0^+	*2.09%*
		45	44.956185	$\frac{7}{2}^-$	165 d (β^-)
		46	45.953689	0^+	*0.0035%*
		47	46.954543	$\frac{7}{2}^-$	4.54 d (β^-)
		48	47.952533	0^+	*0.187%*
		49	48.955672	$\frac{3}{2}^-$	8.72 m (β^-)
		50	49.957519	0^+	14 s (β^-)
Sc	21	42	41.965514	0^+	0.68 s (ε)
		43	42.961150	$\frac{7}{2}^-$	3.89 h (ε)
		44	43.959404	2^+	3.93 h (ε)
		45	44.955910	$\frac{7}{2}^-$	*100 %*
		46	45.955170	4^+	83.8 d (β^-)
		47	46.952409	$\frac{7}{2}^-$	3.35 d (β^-)
		48	47.952235	6^+	43.7 h (β^-)
		49	48.950022	$\frac{7}{2}^-$	57.0 m (β^-)
		50	49.952186	5^+	1.71 m (β^-)
Ti	22	43	42.968523	$\frac{7}{2}^-$	0.51 s (ε)
		44	43.959690	0^+	54 y (ε)
		45	44.958124	$\frac{7}{2}^-$	3.09 h (ε)
		46	45.952629	0^+	*8.2%*
		47	46.951764	$\frac{5}{2}^-$	*7.4%*
		48	47.947947	0^+	*73.7%*
		49	48.947871	$\frac{7}{2}^-$	*5.4%*
		50	49.944792	0^+	*5.2%*
		51	50.946616	$\frac{3}{2}^-$	5.80 m (β^-)
		52	51.946898	0^+	1.7 m (β^-)
		53	52.949730	$(\frac{3}{2})^-$	33 s (β^-)
V	23	46	45.960198	0^+	0.42 s (ε)
		47	46.954906	$\frac{3}{2}^-$	32.6 m (ε)
		48	47.952257	4^+	16.0 d (ε)
		49	48.948517	$\frac{7}{2}^-$	330 d (ε)
		50	49.947161	6^+	*0.250%*
		51	50.943962	$\frac{7}{2}^-$	*99.750%*
		52	51.944778	3^+	3.76 m (β^-)
		53	52.944340	$\frac{7}{2}^-$	1.6 m (β^-)
		54	53.946442	$(3,4,5)^+$	50 s (β^-)
Cr	24	46	45.968360	0^+	0.26 s (ε)
		47	46.962905	$\frac{3}{2}^-$	0.51 s (ε)
		48	47.954033	0^+	21.6 h (ε)
		49	48.951338	$\frac{5}{2}^-$	41.9 m (ε)
		50	49.946046	0^+	*4.35%*
		51	50.944768	$\frac{7}{2}^-$	27.7 d (ε)
		52	51.940510	0^+	*83.79%*
		53	52.940651	$\frac{3}{2}^-$	*9.50%*
		54	53.938882	0^+	*2.36%*
		55	54.940842	$\frac{3}{2}^-$	3.50 m (β^-)
		56	55.940643		5.9 m (β^-)
Mn	25	50	49.954240	0^+	0.28 s (ε)
		51	50.948213	$\frac{5}{2}^-$	46.2 m (ε)
		52	51.945568	6^+	5.59 d (ε)
		53	52.941291	$\frac{7}{2}^-$	3.7 My (ε)
		54	53.940361	3^+	312 d (ε)
		55	54.938047	$\frac{5}{2}^-$	*100 %*
		56	55.938907	3^+	2.58 h (β^-)
		57	56.938285	$\frac{5}{2}^-$	1.6 m (β^-)
		58	57.940060	3^+	65 s (β^-)
Fe	26	51	50.956825	$(\frac{5}{2})^-$	0.25 s (ε)
		52	51.948114	0^+	8.27 h (ε)
		53	52.945310	$\frac{7}{2}^-$	8.51 m (ε)
		54	53.939613	0^+	*5.8%*
		55	54.938296	$\frac{3}{2}^-$	2.7 y (ε)
		56	55.934939	0^+	*91.8%*
		57	56.935396	$\frac{1}{2}^-$	*2.15%*
		58	57.933277	0^+	*0.29%*
		59	58.934877	$\frac{3}{2}^-$	44.6 d (β^-)
		60	59.934078	0^+	1.5 My (β^-)
		61	60.936748	$(\frac{3}{2},\frac{5}{2})^-$	6.0 m (β^-)
		62	61.936773	0^+	68 s (β^-)
Co	27	54	53.948460	0^+	0.19 s (ε)

	Z	A	جرم اتمی (u)	I^{π}	فراوانی یا نیمه‌عمر
		55	54.942001	$\frac{7}{2}^-$	17.5 h (ε)
		56	55.939841	4^+	78.8 d (ε)
		57	56.936294	$\frac{7}{2}^-$	271 d (ε)
		58	57.935755	2^+	70.8 d (ε)
		59	58.933198	$\frac{7}{2}^-$	*100 %*
		60	59.933820	5^+	5.27 y (β^-)
		61	60.932478	$\frac{7}{2}^-$	1.65 h (β^-)
		62	61.934060	2^+	1.5 m (β^-)
		63	62.933614	$(\frac{7}{2})^-$	27.5 s (β^-)
Ni	28	55	54.951336	$\frac{7}{2}^-$	0.19 s (ε)
		56	55.942134	0^+	6.10 d (ε)
		57	56.939799	$\frac{3}{2}^-$	36.0 h (ε)
		58	57.935346	0^+	*68.3%*
		59	58.934349	$\frac{3}{2}^-$	0.075 My (ε)
		60	59.930788	0^+	*26.1%*
		61	60.931058	$\frac{3}{2}^-$	*1.13%*
		62	61.928346	0^+	*3.59%*
		63	62.929670	$\frac{1}{2}^-$	100 y (β^-)
		64	63.927968	0^+	*0.91%*
		65	64.930086	$\frac{5}{2}^-$	2.52 h (β^-)
		66	65.929116	0^+	54.8 h (β^-)
		67	66.931570	?	21 s (β^-)
Cu	29	59	58.939503	$\frac{3}{2}^-$	82 s (ε)
		60	59.937366	2^+	23.4 m (ε)
		61	60.933461	$\frac{3}{2}^-$	3.41 h (ε)
		62	61.932586	1^+	9.73 m (ε)
		63	62.929599	$\frac{3}{2}^-$	*69.2%*
		64	63.292766	1^+	12.7 h (ε)
		65	64.927793	$\frac{3}{2}^-$	*30.8%*
		66	65.928872	1^+	5.10 m (β^-)
		67	66.927747	$\frac{3}{2}^-$	61.9 h (β^-)
		68	67.929620	1^+	31 s (β^-)
Zn	30	61	60.939514	$\frac{3}{2}^-$	89 s (ε)
		62	61.934332	0^+	9.2 h (ε)
		63	62.933214	$\frac{3}{2}^-$	38.1 m (ε)
		64	63.929145	0^+	*48.6%*
		65	64.929243	$\frac{5}{2}^-$	244 d (ε)
		66	65.926035	0^+	*27.9%*
		67	66.927129	$\frac{5}{2}^-$	*4.10%*
		68	67.924846	0^+	*18.8%*
		69	68.926552	$\frac{1}{2}^-$	56 m (β^-)
		70	69.925325	0^+	*0.62%*
		71	70.927727	$\frac{1}{2}^-$	2.4 m (β^-)
		72	71.926856	0^+	46.5 h (β^-)
		73	72.929780	$(\frac{3}{2})^-$	24 s (β^-)

	Z	A	جرم اتمی (u)	I^{π}	فراوانی یا نیمه‌عمر
Ga	31	64	63.936836	0^+	2.6 m (ε)
		65	64.932738	$\frac{3}{2}^-$	15.2 m (ε)
		66	65.931590	0^+	9.4 h (ε)
		67	66.928204	$\frac{3}{2}^-$	78.3 h (ε)
		68	67.927982	1^+	68.1 m (ε)
		69	68.925580	$\frac{3}{2}^-$	*60.1%*
		70	69.926028	1^+	21.1 m (β^-)
		71	70.924701	$\frac{3}{2}^-$	*39.9%*
		72	71.926365	3^-	14.1 h (β^-)
		73	72.925169	$\frac{3}{2}^-$	4.87 h (β^-)
		74	73.926940	$(4)^-$	8.1 m (β^-)
		75	74.926499	$\frac{3}{2}^-$	2.1 m (β^-)
Ge	32	66	65.933847	0^+	2.3 h (ε)
		67	66.932737	$(\frac{1}{2})^-$	19.0 m (ε)
		68	67.928096	0^+	271 d (ε)
		69	68.927969	$\frac{5}{2}^-$	39.0 h (ε)
		70	69.924250	0^+	*20.5%*
		71	70.924954	$\frac{1}{2}^-$	11.2 d (ε)
		72	71.922079	0^+	*27.4%*
		73	72.923463	$\frac{9}{2}^+$	*7.8%*
		74	73.921177	0^+	*36.5%*
		75	74.922858	$\frac{1}{2}^-$	82.8 m (β^-)
		76	75.921402	0^+	*7.8%*
		77	76.923548	$\frac{7}{2}^+$	11.3 h (β^-)
		78	77.922853	0^+	1.45 h (β^-)
		79	78.925360	$(\frac{1}{2})^-$	19 s (β^-)
As	33	70	69.930929	4^+	53 m (ε)
		71	70.927114	$\frac{5}{2}^-$	61 h (ε)
		72	71.926755	2^-	26.0 h (ε)
		73	72.923827	$\frac{3}{2}^-$	80.3 d (ε)
		74	73.923928	2^-	17.8 d (ε)
		75	74.921594	$\frac{3}{2}^-$	*100 %*
		76	75.922393	2^-	26.3 h (β^-)
		77	76.920646	$\frac{3}{2}^-$	38.8 h (β^-)
		78	77.921830	(2^-)	91 m (β^-)
		79	78.920946	$\frac{3}{2}^-$	9.0 m (β^-)
Se	34	71	70.932270	$\frac{5}{2}^-$	4.7 m (ε)
		72	71.927110	0^+	8.4 d (ε)
		73	72.926768	$\frac{9}{2}^+$	7.1 h (ε)
		74	73.922475	0^+	*0.87%*
		75	74.922522	$\frac{5}{2}^+$	119.8 d (ε)
		76	75.919212	0^+	*9.0%*
		77	76.919913	$\frac{1}{2}^-$	*7.6%*
		78	77.917308	0^+	*23.5%*
		79	78.918498	$\frac{7}{2}^+$	< 0.065 My (β^-)

Z	A	جرم اتمی (u)	I^π	فراوانی یا نیمه‌عمر
	80	79.916520	0^+	*49.8%*
	81	80.917991	$(\frac{1}{2})^-$	18.5 m (β^-)
	82	81.916698	0^+	*9.2%*
	83	82.919117	$(\frac{9}{2})^+$	22.5 m (β^-)
	84	83.918463	0^+	3.3 m (β^-)
Br 35	76	75.924528	1^-	16.1 h (ε)
	77	76.921378	$\frac{3}{2}^-$	57.0 h (ε)
	78	77.921144	1^+	6.46 m (ε)
	79	78 918336	$\frac{3}{2}^-$	*50.69%*
	80	79.918528	1^+	17.6 m (β^-)
	81	80.916289	$\frac{3}{2}^-$	*49.31%*
	82	81.916802	5^-	35.3 h (β^-)
	83	82.915179	$(\frac{3}{2})^-$	2.39 h (β^-)
	84	83.916503	2^-	31.8 m (β^-)
	85	84.915612	$(\frac{3}{2})^-$	2.9 m (β^-)
Kr 36	75	74.931029	?	4.3 m (ε)
	76	75.925959	0^+	14.8 h (ε)
	77	76.924610	$\frac{5}{2}^+$	75 m (ε)
	78	77.920396	0^+	*0.356%*
	79	78.920084	$\frac{1}{2}^-$	35.0 h (ε)
	80	79.916380	0^+	*2.27%*
	81	80.916590	$\frac{7}{2}^+$	0.21 My (ε)
	82	81.913482	0^+	*11.6%*
	83	82.914135	$\frac{9}{2}^+$	*11.5%*
	84	83.911507	0^+	*57.0%*
	85	84.912531	$\frac{9}{2}^+$	10.7 y (β^-)
	86	85.910616	0^+	*17.3%*
	87	86.913360	$\frac{5}{2}^+$	76 m (β^-)
	88	87.914453	0^+	2.84 h (β^-)
	89	88.917640	$(\frac{5}{2})^+$	3.18 m (β^-)
Rb 37	82	81.918195	1^+	1.25 m (ε)
	83	82.915144	$\frac{5}{2}^-$	86.2 d (ε)
	84	83.914390	2^-	32.9 d (ε)
	85	84.911794	$\frac{5}{2}^-$	*72.17%*
	86	85.911172	2^-	18.8 d (β^-)
	87	86.909187	$\frac{3}{2}^-$	*27.83%*
	88	87.911326	2^-	17.8 m (β^-)
	89	88.912278	$(\frac{3}{2})^-$	15.2 m (β^-)
	90	89.914811	(1^-)	153 s (β^-)
Sr 38	81	80.923270	$(\frac{1}{2}^-)$	22 m (ε)
	82	81.918414	0^+	25.0 d (ε)
	83	82.917566	$\frac{7}{2}^+$	32.4 d (ε)
	84	83.913430	0^+	*0.56%*
	85	84.912937	$\frac{9}{2}^+$	64.8 d (ε)
	86	85.909267	0^+	*9.8%*
	87	86.908884	$\frac{9}{2}^+$	*7.0%*
	88	87.905619	0^+	*82.6%*
	89	88.907450	$\frac{5}{2}^+$	50.5 d (β^-)
	90	89.907738	0^+	28.8 y (β^-)
	91	90.910187	$(\frac{5}{2})^+$	9.5 h (β^-)
	92	91.910944	0^+	2.7 h (β^-)
	93	92.913987	$(\frac{7}{2}^+)$	7.4 m (β^-)
Y 39	84	83.920310	(5^-)	39 m (ε)
	85	84.916437	$(\frac{1}{2})^-$	2.7 h (ε)
	86	85.914893	4^-	14.7 h (ε)
	87	86.910882	$\frac{1}{2}^-$	80.3 h (ε)
	88	87.909508	4^-	106.6 d (ε)
	89	88.905849	$\frac{1}{2}^-$	*100 %*
	90	89.907152	2^-	64.1 h (β^-)
	91	90.907303	$\frac{1}{2}^-$	58.5 d (β^-)
	92	91.908917	2^-	3.54 h (β^-)
	93	92.909571	$\frac{1}{2}^-$	10.2 h (β^-)
	94	93.911597	2^-	18.7 m (β^-)
Zr 40	87	86.914817	$(\frac{9}{2}^+)$	1.6 h (ε)
	88	87.910225	0^+	83.4 d (ε)
	89	88.908890	$\frac{9}{2}^+$	78.4 h (ε)
	90	89.904703	0^+	*51.5%*
	91	90.905644	$\frac{5}{2}^+$	*11.2%*
	92	91.905039	0^+	*17.1%*
	93	92.906474	$\frac{5}{2}^+$	1.5 My (β^-)
	94	93.906315	0^+	*17.4%*
	95	94.908042	$\frac{5}{2}^+$	64.0 d (β^-)
	96	95.908275	0^+	*2.80%*
	97	96.910950	$\frac{1}{2}^+$	16.9 h (β^-)
	98	97.912735	0^+	31 s (β^-)
Nb 41	89	88.913449	$(\frac{1}{2})^-$	2.0 h (ε)
	90	89.911263	8^+	14.6 h (ε)
	91	90.906991	$(\frac{9}{2})^+$	700 y (ε)
	92	91.907192	$(7)^+$	35 My (ε)
	93	92.906377	$\frac{9}{2}^+$	*100 %*
	94	93.907281	6^+	0.020 My (β^-)
	95	94.906835	$\frac{9}{2}^+$	35.0 d (β^-)
	96	95.908100	6^+	23.4 h (β^-)
	97	96.908097	$\frac{9}{2}^+$	72 m (β^-)
Mo 42	90	89.913933	0^+	5.67 h (ε)
	91	90.911755	$\frac{9}{2}^+$	15.5 m (ε)
	92	91.906808	0^+	*14.8%*
	93	92.906813	$\frac{5}{2}^+$	3500 y (ε)
	94	93.905085	0^+	*9.3%*
	95	94.905841	$\frac{5}{2}^+$	*15.9%*

	Z	A	جرم اتمی (u)	I^π	فراوانی یا نیمه‌عمر
		96	95.904679	0^+	*16.7%*
		97	96.906021	$\frac{5}{2}^+$	*9.6%*
		98	97.905407	0^+	*24.1%*
		99	98.907711	$\frac{1}{2}^+$	66.0 h (β^-)
		100	99.907477	0^+	*9.6%*
		101	100.910345	$\frac{1}{2}^+$	14.6 m (β^-)
Tc	43	94	93.909654	7^+	293 m (ε)
		95	94.907657	$\frac{9}{2}^+$	20.0 h (ε)
		96	95.907870	7^+	4.3 d (ε)
		97	96.906364	$\frac{9}{2}^+$	2.6 My (ε)
		98	97.907215	$(6)^+$	4.2 My (β^-)
		99	98.906254	$\frac{9}{2}^+$	0.214 My (β^-)
		100	99.907657	1^+	15.8 s (β^-)
Ru	44	94	93.911361	0^+	52 m (ε)
		95	94.910414	$\frac{5}{2}^+$	1.65 h (ε)
		96	95.907599	0^+	*5.5%*
		97	96.907556	$\frac{5}{2}^+$	2.88 d (ε)
		98	97.905287	0^+	*1.86%*
		99	98.905939	$\frac{5}{2}^+$	*12.7%*
		100	99.904219	0^+	*12.6%*
		101	100.905582	$\frac{5}{2}^+$	*17.0%*
		102	101.904348	0^+	*31.6%*
		103	102.906323	$\frac{3}{2}^+$	39.4 d (β^-)
		104	103.905424	0^+	*18.7%*
		105	104.907744	$\frac{3}{2}^+$	4.44 h (β^-)
		106	105.907321	0^+	372 d (β^-)
		107	106.910130	$(\frac{5}{2}^+)$	3.8 m (β^-)
Rh	45	98	97.910716	$(2)^+$	8.7 m (ε)
		99	98.908192	$(\frac{1}{2}^-)$	16.1 d (ε)
		100	99.908116	1^-	20.8 h (ε)
		101	100.906159	$\frac{1}{2}^-$	3.3 y (ε)
		102	101.906814	6^+	2.9 y (ε)
		103	102.905500	$\frac{1}{2}^-$	*100 %*
		104	103.906651	1^+	42.3 s (β^-)
		105	104.905686	$\frac{7}{2}^+$	35.4 h (β^-)
		106	105.907279	1^+	29.8 s (β^-)
Pd	46	99	98.911763	$(\frac{5}{2}^+)$	21.4 m (ε)
		100	99.908527	0^+	3.6 d (ε)
		101	100.908287	$\frac{5}{2}^+$	8.5 h (ε)
		102	101.905634	0^+	*1.0%*
		103	102.906114	$\frac{5}{2}^+$	17.0 d (ε)
		104	103.904029	0^+	*11.0%*
		105	104.905079	$\frac{5}{2}^+$	*22.2%*
		106	105.903478	0^+	*27.3%*
		107	106.905127	$\frac{5}{2}^+$	6.5 My (β^-)
		108	107.903895	0^+	*26.7%*
		109	108.905954	$\frac{5}{2}^+$	13.4 h (β^-)
		110	109.905167	0^+	*11.8%*
		111	110.907660	$\frac{5}{2}^+$	23 m (β^-)
		112	111.907323	0^+	21.0 h (β^-)
Ag	47	103	102.908980	$\frac{7}{2}^+$	65.7 m (ε)
		104	103.908623	5^+	69.2 m (ε)
		105	104.906520	$\frac{1}{2}^-$	41.3 d (ε)
		106	105.906662	1^+	24.0 m (ε)
		107	106.905092	$\frac{1}{2}^-$	*51.83%*
		108	107.905952	1^+	2.4 m (β^-)
		109	108.904756	$\frac{1}{2}^-$	*48.17%*
		110	109.906111	1^+	24.4 s (β^-)
		111	110.905295	$\frac{1}{2}^-$	7.45 d (β^-)
		112	111.907010	2^-	3.14 h (β^-)
Cd	48	104	103.909851	0^+	58 m (ε)
		105	104.909459	$\frac{5}{2}^+$	56.0 m (ε)
		106	105.906461	0^+	*1.25%*
		107	106.906613	$\frac{5}{2}^+$	6.50 h (ε)
		108	107.904176	0^+	*0.89%*
		109	108.904953	$\frac{5}{2}^+$	463 d (ε)
		110	109.903005	0^+	*12.5%*
		111	110.904182	$\frac{1}{2}^+$	*12.8%*
		112	111.902757	0^+	*24.1%*
		113	112.904400	$\frac{1}{2}^+$	*12.2%*
		114	113.903357	0^+	*28.7%*
		115	114.905430	$\frac{1}{2}^+$	53.4 h (β^-)
		116	115.904755	0^+	*7.5%*
		117	116.907228	$\frac{1}{2}^+$	2.4 h (β^-)
		118	117.911700	0^+	50.3 m (β^-)
In	49	110	109.907230	2^+	69.1 m (ε)
		111	110.905109	$\frac{9}{2}^+$	2.83 d (ε)
		112	111.905536	1^+	14.4 m (ε)
		113	112.904061	$\frac{9}{2}^+$	*4.3%*
		114	113.904916	1^+	71.9 s (β^-)
		115	114.903882	$\frac{9}{2}^+$	*95.7%*
		116	115.905264	1^+	14.1 s (β^-)
		117	116.904517	$\frac{9}{2}^+$	43.8 m (β^-)
Sn	50	109	108.911294	$\frac{7}{2}^+$	18.0 m (ε)
		110	109.907858	0^+	4.1 h (ε)
		111	110.907741	$\frac{7}{2}^+$	35 m (ε)
		112	111.904826	0^+	*1.01%*
		113	112.905176	$\frac{1}{2}^+$	115.1 d (ε)
		114	113.902784	0^+	*0.67%*
		115	114.903348	$\frac{1}{2}^+$	*0.38%*

	Z	A	جرم اتمی (u)	I^{π}	فراوانی یا نیمه‌عمر
		116	115.901747	0^+	*14.6%*
		117	116.902956	$\frac{1}{2}^+$	*7.75%*
		118	117.901609	0^+	*24.3%*
		119	118.903311	$\frac{1}{2}^+$	*8.6%*
		120	119.902199	0^+	*32.4%*
		121	120.904239	$\frac{3}{2}^+$	27.1 h (β^-)
		122	121.903440	0^+	*4.56%*
		123	122.905722	$\frac{11}{2}^-$	129 d (β^-)
		124	123.905274	0^+	*5.64%*
		125	124.907785	$\frac{11}{2}^-$	9.62 d (β^-)
		126	125.907654	0^+	0.1 My (β^-)
		127	126.910355	$(\frac{11}{2}^-)$	2.1 h (β^-)
Sb	51	118	117.905534	1^+	3.6 m (ε)
		119	118.903948	$\frac{5}{2}^+$	38.0 h (ε)
		120	119.905077	1^+	15.8 m (ε)
		121	120.903821	$\frac{5}{2}^+$	*57.3%*
		122	121.905179	2^-	2.70 d (β^-)
		123	122.904216	$\frac{7}{2}^+$	*42.7%*
		124	123.905938	3^-	60.2 d (β^-)
		125	124.905252	$\frac{7}{2}^+$	2.7 y (β^-)
		126	125.907250	8^-	12.4 d (β^-)
		127	126.906919	$\frac{7}{2}^+$	3.85 d (β^-)
Te	52	117	116.908630	$\frac{1}{2}^+$	62 m (ε)
		118	117.905908	0^+	6.00 d (ε)
		119	118.906411	$\frac{1}{2}^+$	16.0 h (ε)
		120	119.904048	0^+	*0.091%*
		121	120.904947	$\frac{1}{2}^+$	16.8 d (ε)
		122	121.903050	0^+	*2.5%*
		123	122.904271	$\frac{1}{2}^+$	*0.89%*
		124	123.902818	0^+	*4.6%*
		125	124.904429	$\frac{1}{2}^+$	*7.0%*
		126	125.903310	0^+	*18.7%*
		127	126.905221	$\frac{3}{2}^+$	9.4 h (β^-)
		128	127.904463	0^+	*31.7%*
		129	128.906594	$\frac{3}{2}^+$	69 m (β^-)
		130	129.906229	0^+	*34.5%*
		131	130.908528	$\frac{3}{2}^+$	25.0 m (β^-)
		132	131.908517	0^+	78.2 h (β^-)
		133	132.910910	$(\frac{3}{2}^+)$	12.5 m (β^-)
I	53	123	122.905594	$\frac{5}{2}^+$	13.2 h (ε)
		124	123.906207	2^-	4.18 d (ε)
		125	124.904620	$\frac{5}{2}^+$	60.2 d (ε)
		126	125.905624	2^-	13.0 d (ε)
		127	126.904473	$\frac{5}{2}^+$	*100 %*
		128	127.905810	1^+	25.0 m (β^-)
		129	128.904986	$\frac{7}{2}^+$	16 My (β^-)
		130	129.906713	5^+	12.4 h (β^-)
		131	130.906114	$\frac{7}{2}^+$	8.04 d (β^-)
		132	131.907987	4^+	2.30 h (β^-)
Xe	54	121	120.911450	$(\frac{5}{2}^+)$	40.1 m (ε)
		122	121.908170	0^+	20.1 h (ε)
		123	122.908469	$(\frac{1}{2}^+)$	2.08 h (ε)
		124	123.905894	0^+	*0.096%*
		125	124.906397	$(\frac{1}{2})^+$	17 h (ε)
		126	125.904281	0^+	*0.090%*
		127	126.905182	$(\frac{1}{2}^+)$	36.4 d (ε)
		128	127.903531	0^+	*1.92%*
		129	128.904780	$\frac{1}{2}^+$	*26.4%*
		130	129.903509	0^+	*4.1%*
		131	130.905072	$\frac{3}{2}^+$	*21.2%*
		132	131.904144	0^+	*26.9%*
		133	132.905888	$\frac{3}{2}^+$	5.25 d (β^-)
		134	133.905395	0^+	*10.4%*
		135	134.907130	$\frac{3}{2}^+$	9.1 h (β^-)
		136	135.907214	0^+	*8.9%*
		137	136.911557	$\frac{7}{2}^-$	3.82 m (β^-)
Cs	55	130	129.906753	1^+	29.2 m (ε)
		131	130.905444	$\frac{5}{2}^+$	9.69 d (ε)
		132	131.906431	2^-	6.47 d (ε)
		133	132.905429	$\frac{7}{2}^+$	*100 %*
		134	133.906696	4^+	2.06 y (β^-)
		135	134.905885	$\frac{7}{2}^+$	3 My (β^-)
		136	135.907289	5^+	13.1 d (β^-)
		137	136.907073	$\frac{7}{2}^+$	30.2 y (β^-)
		138	137.911004	3^-	32.2 m (β^-)
Ba	56	127	126.911130	$(\frac{1}{2}^+)$	12.7 m (ε)
		128	127.908237	0^+	2.43 d (ε)
		129	128.908642	$\frac{1}{2}^+$	2.2 h (ε)
		130	129.906282	0^+	*0.106%*
		131	130.906902	$\frac{1}{2}^+$	12.0 d (ε)
		132	131.905042	0^+	*0.101%*
		133	132.905988	$\frac{1}{2}^+$	10.7 y (ε)
		134	133.904486	0^+	*2.42%*
		135	134.905665	$\frac{3}{2}^+$	*6.59%*
		136	135.904553	0^+	*7.85%*
		137	136.905812	$\frac{3}{2}^+$	*11.2%*
		138	137.905232	0^+	*71.7%*
		139	138.908826	$\frac{7}{2}^-$	82.9 m (β^-)
		140	139.910581	0^+	12.7 d (β^-)
		141	140.914363	$\frac{3}{2}^-$	18.3 m (β^-)

	Z	A	جرم اتمی (u)	I^{π}	فراوانی یا نیمه‌عمر
La	57	135	134.906953	$\frac{5}{2}^+$	19.5 h (ε)
		136	135.907630	1^+	9.87 m (ε)
		137	136.906460	$\frac{7}{2}^+$	0.06 My (ε)
		138	137.907105	5^+	*0.089%*
		139	138.906347	$\frac{7}{2}^+$	*99.911%*
		140	139.909471	3^-	40.3 h (β^-)
		141	140.910896	$\frac{7}{2}^+$	3.90 h (β^-)
		142	141.914090	2^-	91.1 m (β^-)
Ce	58	133	132.911360	$\frac{1}{2}^+$	5.4 h (ε)
		134	133.908890	0^+	76 h (ε)
		135	134.909117	$\frac{1}{2}^+$	17.6 h (ε)
		136	135.907140	0^+	*0.190%*
		137	136.907780	$\frac{3}{2}^+$	9.0 h (ε)
		138	137.905985	0^+	*0.254%*
		139	138.906631	$\frac{3}{2}^+$	137.2 d (ε)
		140	139.905433	0^+	*88.5%*
		141	140.908271	$\frac{7}{2}^-$	32.5 d (β^-)
		142	141.909241	0^+	*11.1%*
		143	142.912383	$\frac{3}{2}^-$	33.0 h (β^-)
		144	143.913643	0^+	284 d (β^-)
		145	144.917230	$\frac{5}{2}^+$	2.98 m (β^-)
Pr	59	138	137.910748	1^+	1.45 m (ε)
		139	138.908917	$\frac{5}{2}^+$	4.4 h (ε)
		140	139.909071	1^+	3.39 m (ε)
		141	140.907647	$\frac{5}{2}^+$	*100 %*
		142	141.910039	2^-	19.2 h (β^-)
		143	142.910814	$\frac{7}{2}^+$	13.6 d (β^-)
		144	143.913301	0^-	17.3 m (β^-)
Nd	60	139	138.911920	$\frac{3}{2}^+$	29.7 m (ε)
		140	139.909306	0^+	3.37 d (ε)
		141	140.909594	$\frac{3}{2}^+$	2.5 h (ε)
		142	141.907719	0^+	*27.2%*
		143	142.909810	$\frac{7}{2}^-$	*12.2%*
		144	143.910083	0^+	*23.8%*
		145	144.912570	$\frac{7}{2}^-$	*8.3%*
		146	145.913113	0^+	*17.2%*
		147	146.916097	$\frac{5}{2}^-$	11.0 d (β^-)
		148	147.916889	0^+	*5.7%*
		149	148.920145	$\frac{5}{2}^-$	1.73 h (β^-)
		150	149.920887	0^+	*5.6%*
		151	150.923825	$(\frac{3}{2}^+)$	12.4 m (β^-)
		152	151.924680	0^+	11.4 m (β^-)
Pm	61	142	141.912970	1^+	40.5 s (ε)
		143	142.910930	$\frac{5}{2}^+$	265 d (ε)
		144	143.912588	5^-	349 d (ε)
		145	144.912743	$\frac{5}{2}^+$	17.7 y (ε)
		146	145.914708	3^-	5.5 y (ε)
		147	146.915135	$\frac{7}{2}^+$	2.62 y (β^-)
		148	147.917473	1^-	5.37 d (β^-)
		149	148.918332	$\frac{7}{2}^+$	53.1 h (β^-)
		150	149.920981	(1^-)	2.68 h (β^-)
Sm	62	142	141.915206	0^+	72.5 m (ε)
		143	142.914626	$\frac{3}{2}^+$	8.83 m (ε)
		144	143.911998	0^+	*3.1%*
		145	144.913409	$\frac{7}{2}^-$	340 d (ε)
		146	145.913053	0^+	103 My (α)
		147	146.914894	$\frac{7}{2}^-$	*15.1%*
		148	147.914819	0^+	*11.3%*
		149	148.917180	$\frac{7}{2}^-$	*13.9%*
		150	149.917273	0^+	*7.4%*
		151	150.919929	$\frac{5}{2}^-$	90 y (β^-)
		152	151.919728	0^+	*26.6%*
		153	152.922094	$\frac{3}{2}^+$	46.8 h (β^-)
		154	153.922205	0^+	*22.6%*
		155	154.924636	$\frac{3}{2}^-$	22.4 m (β^-)
Eu	63	148	147.918125	5^-	54.5 d (ε)
		149	148.917926	$\frac{5}{2}^+$	93.1 d (ε)
		150	149.919702	0^-	36 y (ε)
		151	150.919847	$\frac{5}{2}^+$	*47.9%*
		152	151.921742	3^-	13 y (ε)
		153	152.921225	$\frac{5}{2}^+$	*52.1%*
		154	153.922975	3^-	8.5 y (β^-)
		155	154.922889	$\frac{5}{2}^+$	4.9 y (β^-)
		156	155.924752	0^+	15 d (β^-)
		157	156.925418	$\frac{5}{2}^+$	15 h (β^-)
Gd	64	149	148.919344	$\frac{7}{2}^-$	9.4 d (ε)
		150	149.918662	0^+	1.8 My (α)
		151	150.920346	$\frac{7}{2}^-$	120 d (ε)
		152	151.919786	0^+	*0.20%*
		153	152.921745	$\frac{3}{2}^-$	242 d (ε)
		154	153.920861	0^+	*2.1%*
		155	154.922618	$\frac{3}{2}^-$	*14.8%*
		156	155.922118	0^+	*20.6%*
		157	156.923956	$\frac{3}{2}^-$	*15.7%*
		158	157.924099	0^+	*24.8%*
		159	158.926384	$\frac{3}{2}^-$	18.6 h (β^-)
		160	159.927049	0^+	*21.8%*
		161	160.929664	$\frac{5}{2}^-$	3.7 m (β^-)
Tb	65	156	155.924742	3^-	5.34 d (ε)
		157	156.924023	$\frac{3}{2}^+$	150 y (ε)

Z	A	جرم اتمی (u)	I^{π}	فراوانی یا نیمه‌عمر
	158	157.925411	3^-	150 y (ε)
	159	158.925342	$\frac{3}{2}^+$	*100 %*
	160	159.927163	3^-	72.1 d (β^-)
	161	160.927566	$\frac{3}{2}^+$	6.90 d (β^-)
	162	161.929510	1^-	7.76 m (β^-)
Dy 66	153	152.925769	$\frac{7}{2}^-$	6.4 h (ε)
	154	153.924429	0^+	3 My (α)
	155	154.925747	$\frac{3}{2}^-$	10.0 h (ε)
	156	155.924277	0^+	*0.057%*
	157	156.925460	$\frac{3}{2}^-$	8.1 h (ε)
	158	157.924403	0^+	*0.100 %*
	159	158.925735	$\frac{3}{2}^-$	144.4 d (ε)
	160	159.925193	0^+	*2.3%*
	161	160.926930	$\frac{5}{2}^+$	*19.90%*
	162	161.926795	0^+	*25.5%*
	163	162.928728	$\frac{5}{2}^-$	*24.9%*
	164	163.929171	0^+	*28.1%*
	165	164.931700	$\frac{7}{2}^+$	2.33 h (β^-)
	166	165.932803	0^+	81.6 h (β^-)
Ho 67	162	161.929092	1^+	15 m (ε)
	163	162.928731	$(\frac{7}{2})^-$	33 y (ε)
	164	163.930285	1^+	29.0 m (ε)
	165	164.930319	$\frac{7}{2}^-$	*100 %*
	166	165.932281	0^-	26.8 h (β^-)
	167	166.933127	$(\frac{7}{2}^-)$	3.1 h (β^-)
Er 68	160	159.929080	0^+	28.6 h (ε)
	161	160.929996	$\frac{3}{2}^-$	3.24 h (ε)
	162	161.928775	0^+	*0.14%*
	163	162.930030	$\frac{5}{2}^-$	75.1 m (ε)
	164	163.929198	0^+	*1.56%*
	165	164.930723	$\frac{5}{2}^-$	10.4 h (ε)
	166	165.930290	0^+	*33.4%*
	167	166.932046	$\frac{7}{2}^+$	*22.9%*
	168	167.932368	0^+	*27.1%*
	169	168.934588	$\frac{1}{2}^-$	9.40 d (β^-)
	170	169.935461	0^+	*14.9%*
	171	170.938027	$\frac{5}{2}^-$	7.52 h (β^-)
	172	171.939353	0^+	49.3 h (β^-)
Tm 69	166	165.933561	2^+	7.70 h (ε)
	167	166.932848	$\frac{1}{2}^+$	9.25 d (ε)
	168	167.934170	3^+	93.1 d (ε)
	169	168.934212	$\frac{1}{2}^+$	*100 %*
	170	169.935798	1^-	128.6 d (β^-)
	171	170.936427	$\frac{1}{2}^+$	1.92 y (β^-)
	172	171.938397	2^-	63.6 h (β^-)
Yb 70	166	165.933875	0^+	56.7 h (ε)
	167	166.934946	$\frac{5}{2}^-$	17.5 m (ε)
	168	167.933894	0^+	*0.135%*
	169	168.935186	$\frac{7}{2}^+$	32.0 d (ε)
	170	169.934759	0^+	*3.1%*
	171	170.936323	$\frac{1}{2}^-$	*14.4%*
	172	171.936378	0^+	*21.9%*
	173	172.938208	$\frac{5}{2}^-$	*16.2%*
	174	173.938859	0^+	*31.6%*
	175	174.941273	$\frac{7}{2}^-$	4.19 d (β^-)
	176	175.942564	0^+	*12.6%*
	177	176.945253	$\frac{9}{2}^+$	1.9 h (β^-)
	178	177.946639	0^+	74 m (β^-)
Lu 71	172	171.939085	(4^-)	6.70 d (ε)
	173	172.938929	$\frac{7}{2}^+$	1.37 y (ε)
	174	173.940336	1^-	3.3 y (ε)
	175	174.940770	$\frac{7}{2}^+$	*97.39%*
	176	175.942679	7^-	*2.61%*
	177	176.943752	$\frac{7}{2}^+$	6.71 d (β^-)
	178	177.945963	1^+	28.4 m (β^-)
Hf 72	171	170.940490	$(\frac{7}{2}^+)$	12.1 h (ε)
	172	171.939460	0^+	1.87 y (ε)
	173	172.940650	$\frac{1}{2}^-$	24.0 h (ε)
	174	173.940044	0^+	*0.16%*
	175	174.941507	$\frac{5}{2}^-$	70 d (ε)
	176	175.941406	0^+	*5.2%*
	177	176.943217	$\frac{7}{2}^-$	*18.6%*
	178	177.943696	0^+	*27.1%*
	179	178.945812	$\frac{9}{2}^+$	*13.7%*
	180	179.946546	0^+	*35.2%*
	181	180.949096	$\frac{1}{2}^-$	42.4 d (β^-)
	182	181.950550	0^+	9 My (β^-)
	183	182.953530	$(\frac{3}{2}^-)$	64 m (β^-)
Ta 73	178	177.945750	1^+	9.31 m (ε)
	179	178.945930	$(\frac{7}{2}^+)$	665 d (ε)
	180	179.947462	1^+	*0.0123%*
	181	180.947992	$\frac{7}{2}^+$	*99.9877%*
	182	181.950149	3^-	115 d (β^-)
	183	182.951369	$\frac{7}{2}^+$	5.1 d (β^-)
W 74	178	177.945840	0^+	21.5 d (ε)
	179	178.947067	$(\frac{7}{2}^-)$	38 m (ε)
	180	179.946701	0^+	*0.13%*
	181	180.948192	$\frac{9}{2}^+$	121 d (ε)
	182	181.948202	0^+	*26.3%*
	183	182.950220	$\frac{1}{2}^-$	*14.3%*

Z	A	جرم اتمی (u)	I^π	فراوانی یا نیمه‌عمر
	184	183.950928	0^+	*30.7%*
	185	184.953416	$\frac{3}{2}^-$	75.1 d (β^-)
	186	185.954357	0^+	*28.6%*
	187	186.957153	$\frac{3}{2}^-$	23.9 h (β^-)
	188	187.958480	0^+	69.4 d (β^-)
Re 75	182	181.951210	2^+	12.7 h (ε)
	183	182.950817	$(\frac{5}{2})^+$	71 d (ε)
	184	183.952530	3^-	38 d (ε)
	185	184.952951	$\frac{5}{2}^+$	*37.40%*
	186	185.954984	1^-	90.6 h (β^-)
	187	186.955744	$\frac{5}{2}^+$	*62.60%*
	188	187.958106	1^-	16.9 h (β^-)
	189	188.959219	$(\frac{5}{2})^+$	24.3 h (β^-)
Os 76	182	181.952120	0^+	21.5 h (ε)
	183	182.953290	$(\frac{9}{2})^+$	13.0 h (ε)
	184	183.952488	0^+	*0.018%*
	185	184.954041	$\frac{1}{2}^-$	93.6 d (ε)
	186	185.953830	0^+	*1.6%*
	187	186.955741	$\frac{1}{2}^-$	*1.6%*
	188	187.955830	0^+	*13.3%*
	189	188.958137	$\frac{3}{2}^-$	*16.1%*
	190	189.958436	0^+	*26.4%*
	191	190.960920	$\frac{9}{2}^-$	15.4 d (β^-)
	192	191.961467	0^+	*41.0%*
	193	192.964138	$\frac{3}{2}^-$	30.6 h (β^-)
	194	193.965173	0^+	6.0 y (β^-)
Ir 77	188	187.958830	(2^-)	41.5 h (ε)
	189	188.958712	$\frac{3}{2}^+$	13.1 d (ε)
	190	189.960580	(4^+)	11.8 d (ε)
	191	190.960584	$\frac{3}{2}^+$	*37.3%*
	192	191.962580	4^-	74.2 d (β^-)
	193	192.962917	$\frac{3}{2}^+$	*62.7%*
	194	193.965069	1^-	19.2 h (β^-)
	195	194.965966	$(\frac{3}{2}^+)$	2.8 h (β^-)
Pt 78	187	186.960470	$\frac{3}{2}^-$	2.35 h (ε)
	188	187.959386	0^+	10.2 d (ε)
	189	188.960817	$\frac{3}{2}^-$	10.9 h (ε)
	190	189.959917	0^+	*0.013%*
	191	190.961665	$\frac{3}{2}^-$	2.9 d (ε)
	192	191.961019	0^+	*0.78%*
	193	192.962977	$(\frac{1}{2}^-)$	50 y (ε)
	194	193.962655	0^+	*32.9%*
	195	194.964766	$\frac{1}{2}^-$	*33.8%*
	196	195.964926	0^+	*25.3%*
	197	196.967315	$\frac{1}{2}^-$	18.3 h (β^-)
	198	197.967869	0^+	*7.2%*
	199	198.970552	$(\frac{5}{2}^-)$	30.8 m (β^-)
	200	199.971417	0^+	12.5 h (β^-)
Au 79	194	193.965348	1^-	39.5 h (ε)
	195	194.965013	$\frac{3}{2}^+$	186 d (ε)
	196	195.966544	2^-	6.18 d (ε)
	197	196.966543	$\frac{3}{2}^+$	*100 %*
	198	197.968217	2^-	2.696 d (β^-)
	199	198.968740	$\frac{3}{2}^+$	3.14 d (β^-)
	200	199.970670	1^-	48.4 m (β^-)
Hg 80	193	192.966560	$\frac{3}{2}^-$	3.8 h (ε)
	194	193.965391	0^+	520 y (ε)
	195	194.966640	$\frac{1}{2}^-$	9.5 h (ε)
	196	195.965807	0^+	*0.15%*
	197	196.967187	$\frac{1}{2}^-$	64.1 h (ε)
	198	197.966743	0^+	*10.0%*
	199	198.968254	$\frac{1}{2}^-$	*16.8%*
	200	199.968300	0^+	*23.1%*
	201	200.970277	$\frac{3}{2}^-$	*13.2%*
	202	201.970617	0^+	*29.8%*
	203	202.972848	$\frac{5}{2}^-$	46.6 d (β^-)
	204	203.973467	0^+	*6.9%*
	205	204.976047	$\frac{1}{2}^-$	5.2 m (β^-)
Tl 81	200	199.970934	2^-	26.1 h (ε)
	201	200.970794	$\frac{1}{2}^+$	73 h (ε)
	202	201.972085	2^-	12.2 d (ε)
	203	202.972320	$\frac{1}{2}^+$	*29.5%*
	204	203.973839	2^-	3.77 y (β^-)
	205	204.974401	$\frac{1}{2}^+$	*70.5%*
	206	205.976084	0^-	4.20 m (β^-)
Pb 82	201	200.972830	$\frac{5}{2}^-$	9.3 h (ε)
	202	201.972134	0^+	0.05 My (ε)
	203	202.973365	$\frac{5}{2}^-$	51.9 h (ε)
	204	203.973020	0^+	*1.42%*
	205	204.974458	$\frac{5}{2}^-$	15 My (ε)
	206	205.974440	0^+	*24.1%*
	207	206.975872	$\frac{1}{2}^-$	*22.1%*
	208	207.976627	0^+	*52.3%*
	209	208.981065	$\frac{9}{2}^+$	3.25 h (β^-)
	210	209.984163	0^+	22.3 y (β^-)
	211	210.988735	$(\frac{9}{2}^+)$	36.1 m (β^-)
	212	211.991871	0^+	10.6 h (β^-)
Bi 83	206	205.978478	6^+	6.24 d (ε)
	207	206.978446	$\frac{9}{2}^-$	32 y (ε)

Z	A	جرم اتمی (u)	I^{π}	فراوانی یا نیمه‌عمر
	208	207.979717	(5^+)	0.368 My (ε)
	209	208.980374	$\frac{9}{2}^-$	*100 %*
	210	209.984095	1^-	5.01 d (β^-)
	211	210.987255	$\frac{9}{2}^-$	2.15 m (α)
	212	211.991255	1^-	60.6 m (β^-)
Po 84	206	205.980456	0^+	8.8 d (ε)
	207	206.981570	$\frac{5}{2}^-$	5.8 h (ε)
	208	207.981222	0^+	2.90 y (α)
	209	208.982404	$\frac{1}{2}^-$	102 y (α)
	210	209.982848	0^+	138.4 d (α)
	211	210.986627	$\frac{9}{2}^+$	0.52 s (α)
At 85	208	207.986510	6^+	1.63 h (ε)
	209	208.986149	$\frac{9}{2}^-$	5.4 h (ε)
	210	209.987126	5^+	8.3 h (ε)
	211	210.987469	$\frac{9}{2}^-$	7.21 h (ε)
	212	211.990725	(1^-)	0.31 s (α)
	213	212.992911	$\frac{9}{2}^-$	0.11 μs (α)
Rn 86	207	206.990690	$\frac{5}{2}^-$	9.3 m (ε)
	210	209.989669	0^+	2.4 h (α)
	211	210.990576	$\frac{1}{2}^-$	14.6 h (ε)
	212	211.990697	0^+	24 m (α)
	218	218.005580	0^+	35 ms (α)
	222	222.017571	0^+	3.82 d (α)
	224		0^+	107 m (β^-)
Fr 87	209	208.995870	$\frac{9}{2}^-$	50 s (α)
	212	211.996130	5^+	20 m (ε)
	215	215.000310	$\frac{9}{2}^-$	0.12 μs (α)
	220	220.012293	1	27.4 s (α)
	223	223.019733	$(\frac{3}{2})$	21.8 m (β^-)
Ra 88	222	222.015353	0^+	38 s (α)
	223	223.018501	$\frac{1}{2}^+$	11.4 d (α)
	224	224.020186	0^+	3.66 d (α)
	225	225.023604	$(\frac{3}{2})^+$	14.8 d (β^-)
	226	226.025403	0^+	1602 y (α)
	227	227.029171	$(\frac{3}{2}^+)$	42 m (β^-)
Ac 89	224	224.021685	(0^-)	2.9 h (ε)
	225	225.023205	$(\frac{3}{2}^-)$	10.0 d (α)
	226	226.026084	(1^-)	29 h (β^-)
	227	227.027750	$\frac{3}{2}^-$	21.77 y (β^-)
	228	228.031015	(3^+)	6.1 h (β^-)
Th 90	228	228.028715	0^+	1.91 y (α)
	229	229.031755	$\frac{5}{2}^+$	7300 y (α)
	230	230.033128	0^+	75,400 y (α)
	231	231.036299	$\frac{5}{2}^+$	25.52 h (β^-)
	232	232.038051	0^+	*100 %*
	233	233.041577	$(\frac{1}{2}^+)$	22.3 m (β^-)
Pa 91	229	229.032073	$(\frac{5}{2}^+)$	1.4 d (ε)
	230	230.034527	(2^-)	17.7 d (ε)
	231	231.035880	$\frac{3}{2}^-$	32,800 y (α)
	232	232.038565	(2^-)	1.31 d (β^-)
	233	233.040243	$\frac{3}{2}^-$	27.0 d (β^-)
U 92	233	233.039628	$\frac{5}{2}^+$	0.1592 My (α)
	234	234.040947	0^+	0.245 My (α)
	235	235.043924	$\frac{7}{2}^-$	*0.720%*
	236	236.045563	0^+	23.42 My (α)
	237	237.048725	$\frac{1}{2}^+$	6.75 d (β^-)
	238	238.050785	0^+	*99.275%*
	239	239.054290	$\frac{5}{2}^+$	23.5 m (β^-)
Np 93	236	236.046550	(6^-)	0.11 My (ε)
	237	237.048168	$\frac{5}{2}^+$	2.14 My (α)
	238	238.050941	2^+	2.117 d (β^-)
	239	239.052933	$\frac{5}{2}^+$	2.36 d (β^-)
Pu 94	237	237.048401	$\frac{7}{2}^-$	45.3 d (ε)
	238	238.049555	0^+	87.74 y (α)
	239	239.052158	$\frac{1}{2}^+$	24,100 y (α)
	240	240.053808	0^+	6570 y (α)
	241	241.056846	$\frac{5}{2}^+$	14.4 y (β^-)
	242	242.058737	0^+	0.376 My (α)
	243	243.061998	$\frac{7}{2}^+$	4.96 h (β^-)
Am 95	240	240.055278	(3^-)	50.9 h (ε)
	241	241.056824	$\frac{5}{2}^-$	433 y (α)
	242	242.059542	1^-	16.0 h (β^-)
	243	243.061375	$\frac{5}{2}^-$	7370 y (α)
	244	244.064279	(6^-)	10.1 h (β^-)
Cm 96	246	246.067218	0^+	4700 y (α)
	247	247.070347	$\frac{9}{2}^-$	16 My (α)
	248	248.072343	0^+	0.34 My (α)
	249	249.075948	$\frac{1}{2}^+$	64 m (β^-)
Bk 97	246	246.068720	2^-	1.8 d (ε)
	247	247.070300	$(\frac{3}{2}^-)$	1380 y (α)
Cf 98	251	251.079580	$\frac{1}{2}^+$	898 y (α)
	252	252.081621	0^+	2.64 y (α)
Es 99	252	252.082944	$(4^+, 5^-)$	472 d (α)
	253	253.084818	$\frac{7}{2}^+$	20.5 d (α)

	Z	A	جرم اتمی (u)	I^{π}	فراوانی یا نیمه‌عمر
Fm	100	256	256.091767	0^+	2.63 h (f)
		257	257.095099	$(\frac{9}{2}^+)$	100 d (α)
Md	101	257	257.095580	$(\frac{7}{2}^-)$	5.2 h (ε)
		258	258.098570	(8^-)	55 d (α)
No	102	258	258.098150	0^+	1.2 ms (f)
		259	259.100931	$(\frac{9}{2}^+)$	60 m (α)

	Z	A	جرم اتمی (u)	I^{π}	فراوانی یا نیمه‌عمر
Lr	103	260	260.105320		180 s (α)
Rf	104	261	261.108690		65 s (α)
Ha	105	261	261.111820		1.8 s (α)
		262	262.113760		34 s (f)
	106	263	263.118220		0.8 s (f)
	107	262	262.122930		115 ms (α)

واژه‌نامه

آسیب تابش	radioactive damage
آشکارساز سوسوزن	scintillation detector
آشکارساز نیمرسانا	semiconductor detector
آهنگ واپاشی جزئی	partial decay rate
اثر موسباؤر	mössbauer effect
اختلاف انرژی ← فاصلهٔ انرژی	
استقلال از بار	charge independence
اعداد جادویی	magic numbers
اکتیویتهٔ ویژه	specific activity
الکترونهای تزویج نشده	unpaired electrons
انتقال ایزوتوپی پرتو ایکس	x-ray isotope shift
انتقال ایزومری	isomer shift
انرژی تزویج	pairing energy
انرژی جداسازی	separation energy
بازدهٔ شکافت	fission yield
برانگیزش ذره‌ای	particle excitation
برهم‌کنش اسپین ـ مدار	spin-orbit interaction
برهم‌کنش ضعیف	weak interaction
برهم‌کنش فوق‌ریز	hyperfine interaction
برهم‌کنش مانده	residual interaction

intermediate vector boson	بوزون برداری میانه
antinucleus	پادهسته
anticoincidence	پاد همفرودی
multiple scattering	پراکندگی چندباره
exposure 1	پرتودهی
	پرتودهی ← تابش‌دهی
cosmic ray	پرتو کیهانی
exposure 2	پرتو گیری
nuclear recoil	پس‌زنی هسته‌ای
natural line width	پهنای خط طبیعی
Doppler broadening	پهن‌شدگی دوپلری
relative biological effectiveness	تأثیر نسبی زیست‌شناختی
prompt radiation	تابش آنی
irradiation	تابش‌دهی
	مت: پرتودهی
one-pion exchange	تبادل تک‌پیونی
two-pion exchange	تبادل دوپیونی
internal conversion	تبدیل داخلی
photodissociation	تجزیهٔ فوتونی
multichannel analyzer	تحلیلگر بس‌کاناله
nuclear transmutation	تراجهش هسته‌ای
nuclear resonance	تشدید هسته‌ای
secular equilibrium	تعادل دیرپا
transient equilibrium	تعادل گذرا
nuclear deformation	تغییر شکل هسته‌ای
stopping power	توان ایستانندگی
partial decay constant	ثابت واپاشی جزئی
transition matrix element	جزء ماتریس گذار
even-parity state	حالت پاریته-زوج
odd-parity state	حالت پاریته-فرد

حالت حفره	hole state
حالت مانسته ← حالت مانستهٔ ایزوباری	
حالت مانستهٔ ایزوباری	isobaric analog state
مت: حالت مانسته	
دختر-هسته	daughter nucleus
مت: هستهٔ دختر	
دز جذب‌شده	absorbed dose
دز معادل	dose equivalent
ذرات نایکسان	non-identical particles
ذرات یکسان	identical particles
ذرهٔ مجازی	virtual particle
روش دوتایهٔ جرمی	mass doublet method
روند واپاشی	decay systematic
رویارویی چندباره	multiple encounter
رویارویی منفرد	single encounter
زمان درنگ	dwell time
زنجیرهٔ جرمی	mass chain
زوج اسپین-مدار	spin-orbit pair
ساختار تک‌ذره‌ای	single-particle structure
مت: مدل ذرهٔ منفرد	
ساختار جمعی	collective structure
سمتگیری هسته‌ای	nuclear orientation
شبه‌بردار	pseudovector
شبه‌شکافت	quasifission
شعاع بار هسته	nuclear charge radius
شعاع میانگین	mean radius
شکافت	fission
شکافت تند	fast fission
شکافت خودبه‌خود	spontanous fission

energy splitting	شکافتگی انرژی
nonspherical equilibrium shape	شکل تعادل غیرکروی
spherical equilibrium shape	شکل تعادل کروی
multiscaling	شمارش چندگانه
counter telescope	شمارگر تلسکوپی
proportional counter	شمارگر تناسبی
Geiger counter	شمارگر گایگر
spin g factor	ضریب اسپینی g
life time	طول عمر
magnetic spectrometer	طیف‌سنج مغناطیسی
occupation number	عدد اشغال
radioactivity dating	عمرسنجی رادیواکتیو
energy separation	فاصلهٔ انرژی مت: اختلاف انرژی
isotopic abundance	فراوانی ایزوتوپی
conserved vector current hypothesis	فرضیهٔ جریان برداری پایسته
Klein-Nishina formula	فرمول کلاین-نیشینا
semiempirical mass formula	فرمول نیمه‌تجربی جرم
beta disintegration	فروپاشی بتازا
chain disintegration	فروپاشی زنجیری
photodisintegration	فروپاشی فوتونی
neutron excess	فزونی نوترون
Geiger-Nuttal rule	قاعدهٔ گایگر-ناتال
law of lepton conservation	قانون پایستگی لپتونها
single-escape peak	قلهٔ تک‌فراری
double-escape peak	قلهٔ دوفراری
mass defect	کاستی جرم
packing fraction	کسر انباشتگی

	مت: کسر فشردگی
branching fraction	کسر انشعاب
conversion fraction	کسر تبدیل
	کسر فشردگی ← کسر انباشتگی
Big Bang cosmology	کیهانشناسی مهبانگ
collective transition	گذار جمعی
dominant transition	گذار غالب
mixed transition	گذار مخلوط
cascade gamma emission	گسیل گامای آبشاری
	مت: گسیل گامای پیاپی
	گسیل گامای پیاپی ← گسیل گامای آبشاری
delayed nucleon emission	گسیل نوکلئون تأخیری
β-delayed nucleon emission	گسیل نوکلئون تأخیری درواپاشی بتازا
radioactive capture	گیراندازی پرتوزا
neutrino capture	گیراندازی نوترینو
	مادر ← مادر-هسته
	مادر-هسته
parent nucleus	مت: مادر
fission product	محصول شکافت
mode	مد
principal decay mode	مد اصلی واپاشی
many-particle shell model	مدل پوسته‌ای چندذره‌ای
independent particle shell model	مدل پوسته‌ای ذرهٔ مستقل
collective model	مدل جمعی
rotational model	مدل دورانی
extreme independent particle model	مدل ذرهٔ خیلی مستقل
	مدل ذرهٔ منفرد ← ساختار تک‌ذره‌ای
liquid-drop model	مدل قطره مایع
unified nuclear model	مدل هسته‌ای وحدت‌یافته
exchange force model	مدل نیروی تبادل
nuclear magneton	مگنتون هسته‌ای
first forbidden	ممنوع اول

second forbidden	ممنوع دوم
branching ratio	نسبت انشعاب
parity violation	نقض پاریته
nuclear level scheme	نمودار تراز هسته‌ای
Fermi-Kurie plot	نمودار فرمی-کوری
rotational band	نوار دورانی
prompt neutron	نوترون آنی
delayed neutron	نوترون تأخیری
valence nucleon	نوکلئون ظرفیت
precursor	نیاهسته
pairing force	نیروی تزویج
comparative half life	نیمه‌عمر تطبیقی
partial half life	نیمه‌عمر جزئی
alpha decay	واپاشی آلفازا
mirror decay	واپاشی آینه‌ای
beta decay	واپاشی بتازا
inverse beta decay	واپاشی بتازای معکوس
negative beta decay	واپاشی بتای منفی
double beta decay	واپاشی دوبتایی
dual radioactive decay	واپاشی رادیواکتیو دوگانه
chain decay	واپاشی زنجیری
Fermi decay	واپاشی فرمی
gamma decay	واپاشی گامازا
Gamow-Teller decay	واپاشی گاموف-تلر
forbidden decay	واپاشی ممنوع
thermonuclear reaction	واکنش گرماهسته‌ای
direct nuclear reaction	واکنش هسته‌ای مستقیم
odd proton nucleus	هستهٔ پروتون-فرد
deformed nucleus	هستهٔ تغییرشکل یافته
	هستهٔ دختر ← دخترهسته
even-even nucleus	هستهٔ زوج-زوج

even-Z nucleus	هستهٔ Z زوج
odd-A nucleus	هستهٔ A فرد
mirror nuclei	هسته‌های آینه‌ای
coincidence	همفرودی
charge conjugation	همیوغی بار

فهرست راهنما

آسیب تابش ۴۱۸
آشکارسازهـای سوسوزن (سنتیلاسیون) ۲۶۹، ۲۷۴
~ آلی ۲۷۱
تفکیك انرژی در ~ ۲۹۰
تفکیك زمانی ~ ۲۹۹
~ غیرآلی ۲۷۱
فعال کردن ~ ۲۷۳
آشکارسازهای نیمرسانا ۲۷۷
ساختار نواری و ~ ۲۷۷
ناحیهٔ تهی ~ ۲۷۸
~ Ge ۲۸۰
تفکیك انرژی در ~ ۲۹۰
تفکیك زمانی ~ ۳۰۰
~ Si ۲۸۰
زمان گردآوری بار در ~ ۲۸۰
سد سطحی ~ ۲۸۰
آمار شمارش ۲۸۱

اتاقك یونش ۲۶۶
~ بهمنی ۲۶۷
اتم موئونی ۷۳
اثر فوتوالکتریك ۲۵۹
اثر موسباؤر ۴۶۱–۴۶۹
انتقال ایزومری در ~ ۴۶۷
پهنای خط در ~ ۴۶۳
~ درآزمون نسبیت عام ۴۶۴
شکافتگی فوق ریز و ~ ۴۶۵–۴۷۱
کسر بدون پس‌زنی در ~ ۴۶۴
اثر هسته‌ای زیمان ۴۲۷، ۴۶۵–۴۶۹
احتمال گذار ۵۹
اختلاف انرژی کولنی ۷۶
~ درهسته‌های آینه‌ای ۷۷
اختلاف فاز ۱۲۰، ۱۲۱
اسپین ۵۳
~ هسته ۹۶
استانداردهای پرتوگیری ۲۴۶
استانداردهای مدرج‌سازی برحسب انرژی ۲۹۲
استقلال بار ۱۳۸
اصل طردپاؤلی ۵۸
اکتیویته (فعالیت) ۲۱۵
~ مخلوط ۲۱۸
واپاشی (فروپاشی) و ~ ۲۱۵–۲۱۶

~ ویژه ۲۴۲، ۲۹۷
یکای ~ ۲۱۵
الکترونهای هسته‌ای ۱۱
انتقال ایزوتوپی
~ اپتیکی ۷۲
اندازهٔ هسته و ~ پرتو ایکس ۷۳
~ پرتو ایکس ۷۲
شعاع هسته و ~ اپتیکی ۷۴
~ موئونی ۷۵
انتقال ایزومری ۴۶۷
انحراف معیار ۲۸۲
اندازه‌گیری طول عمر
~ با روش انتقال دوپلر ۳۰۱–۳۰۳
~ با روش کاهش اکتیویته ۲۹۷
~ باروش همفرودی تأخیری ۲۹۹–۳۰۰
انرژی بستگی
~ الکترونی ۸۹
~ نوکلئون ۹۱
~ هسته‌ای ۸۹
انرژی جداسازی پروتون ۹۰
انرژی جداسازی نوترون ۸۹
انرژی جدایی دونوکلئونی ۱۶۰
ایزوبار ۱۳
ایزوتوپ ۱۲
ایزوتون ۱۲
ایزومر ۲۳۱

باریکهٔ قطبیده ۱۴۰
بارن ۱۰۲
بازدهٔ آشکارسازی در Ge و NaI ۲۹۴
برازش قله ۲۹۱
برد
~ الکترون ۲۵۹، ۲۶۵
~ برون‌یابی‌شده ۲۶۵
~ پروتون ۲۵۵
~ دوترون ۲۵۵
~ ذرات آلفا ۲۵۴، ۲۵۵، ۲۶۵
~ ذرات مختلف درمحیط یکسان ۲۵۶
~ فوتون ۲۶۵
~ مؤثر پراکندگی نوترون-پروتون ۱۲۹
~ میانگین ۲۵۴، ۲۶۵
وابستگی ~ - انرژی ۲۵۵
برگشت زمان ۳۹۴
برمشترالونگ (تابش ترمزی) ۲۵۷
برهم‌کنش اسپین - مدار
~ دربرهم‌کنش نوکلئون-نوکلئون ۱۴۰
~ درمدل پوسته‌ای ۱۶۶
برهم‌کنش ضعیف ۳۶۹
برهم‌کنش فوق ریز چارقطبی الکتریکی ۴۶۹–۴۷۱
برهم‌کنش فوق ریز دوقطبی مغناطیسی ۴۶۵–۴۶۸
برهم‌کنش نوکلئون-نوکلئون
استقلال از بار در ~ ۱۳۸
پتانسیل ~ ۱۴۴
تانسور نیرو در ~ ۱۳۷
تقارن بار در ~ ۱۳۸
جملهٔ اسپین - مدار در ~ ۱۴۰
چاه پتانسیل مربعی ~ ۱۱۱
خواص ~ ۱۱۰، ۱۳۵
مغز دافعه در ~ ۱۳۹–۱۴۰
نیروی تبادل در ~ ۱۴۵
نیروی مرکزی در ~ ۱۳۵
بوزونهای برداری میانه ۳۶۵
بوزونهای ضعیف ۳۶۵
بهنجارش ۲۳

پارامتر تغییرشکل ۱۸۹
پاریته ۵۵
~ تابهای هماهنگ کروی ۵۶
ناپایستگی ~ ۳۹۳–۴۰۱
~ درحالتهای هسته‌ای ۴۰۰،۴۰۱
~ در واپاشی آلفا ۴۰۱
~ هسته ۹۷
پایستگی لپتونها ۳۷۷، ۳۸۴
پتانسیل
~ پله‌ای ۲۶
~ گریز از مرکز ۴۱
~ مرکزی ۴۱
پراش الکترون ۶۶
پراکندگی
~ الکترون ۶۴
~ از هدف ^{208}Ph ۶۶
~ ازهدفهای ^{12}C و ^{16}O ۶۵
افت انرژی در ~ ۲۵۸
افت برخوردی نسبت به‌افت‌تابشی در ~ ۲۵۸
تعیین‌شعاع هسته ازطریق ~ ۷۰
توزیع بار و ~ ۷۰
رابطهٔ برد-انرژی در ~ ۲۵۸
~ پروتون-پروتون
اختلاف‌فاز(انرژی‌پایین)در~ ۱۳۴
برد مؤثر ~ ۱۳۲، ۱۳۷
سطح مقطع دیفرانسیلی ~ ۱۳۲
طول ~ ۱۳۲، ۱۳۷
طول ~ ۱۲۶
~ برای حالتهای تك‌تایه و سه‌تایه ۱۲۸–۱۲۹
~ نوترون بامولکول H_2 ۱۲۶
پراکندگی نوترون-پروتون
برد مؤثرسطح مقطع دیفرانسیلی در~ ۱۲۹
سطح مقطع دیفرانسیلی ~ ۱۴۶
~ برای حالت سه‌تایه وتك‌تایه۱۲۵
سطح مقطع کل دیفرانسیلی ~ ۱۲۵
طول پراکندگی در ~ ۱۲۹
پراکندگی نوترون-نوترون ۱۲۹، ۱۳۲
برد مؤثر ~ ۱۳۳
طول پراکندگی در ~ ۱۳۳
پراکندگی نوکلئون-نوکلئون ۱۱۷
اختلاف فاز ~ ۱۲۰
اختلاف فاز(درانرژیهای میانی) دز~ ۱۳۹
اختلاف فاز موج s در ~ ۱۲۰
تابع موج چاه مربعی و ~ ۱۱۹
تقارن بار در ~ ۱۳۸
سطح مقطع دیفرانسیلی ~ ۱۲۳
سطح مقطع کل ~ ۱۲۳–۱۲۴
~ قطبیده ۱۴۰
پراکندگی کامپتون ۲۶۰، ۲۸۵–۲۸۷
توزیع انرژی در ~ ۲۶۰
سطح مقطع‌دیفرانسیلی ~ ۲۶۱–۲۶۳
سطح مقطع کل ~ ۲۶۲
وابستگی قطبشی در ~ ۳۱۰
پرتو ایکس K ۷۲
پرتوگیری ۲۴۳
پرتوهای ایکس موئونی ۷۵–۷۶
شعاع هسته و ~ ۷۶
پروتون ۱۱
پهنای حالت واپاشی ۵۹، ۲۲۰–۲۲۱
پیوستار کامپتون ۲۸۶
پیون (مزون‌پی) ۱۴۹

تأثیر نسبی زیست‌شناختی (RBE) ۲۴۵
تابش الکترومغناطیسی
احتمال واپاشی و ~ ۴۲۱
براورد وایسکوف برای ~

پاریتهٔ ~ ۴۲۰–۴۲۱
~ تک‌قطبی ۴۲۵
توان تابیده در ~ ۴۲۱
توزیع زاویه‌ای ~ ۴۲۰
جزء ماتریس ~ ۴۲۱
~ دوقطبی ۴۱۸–۴۲۱
توان ~ ۴۱۹
توزیع زاویه‌ای ~ ۴۲۰
گشتاور چندقطبی ~ ۴۲۰
تابع فرمی ۳۵۹
تابع موج ۲۲
~ ذرهٔ آزاد ۲۶
~ شعاعی اتم هیدروژنی ۴۹، ۵۱
تبدیل داخلی ۲۳۱، ۴۳۳–۴۴۱
انرژی الکترون ~ ۴۳۴
براورد ضریب ~ ۴۳۷
پرتو x همراه ~ ۴۳۴
ثابت واپاشی جزئی در ~ ۴۴۱
جزء ماتریس در ~ ۴۳۷
~ گذارهای تک‌قطبی ۴۲۵، ۴۳۸
تحلیلگر بس‌کاناله ۲۸۴
ترازهای انرژی اتم هیدروژنی ۴۸، ۵۰
تعادل دیرپا ۲۲۴، ۲۲۶، ۲۲۷
تعادل گذرا ۲۲۷
تعیین جرم با استفاده از مقدار Q ۸۵
تعیین شعاع هسته از طریق واپاشی آلفا ۷۹، ۳۲۷
تغییر شکل هسته‌ای ۱۸۸
اثر ~ روی ساختار پوسته ۲۰۱–۲۰۲
تفکیک ۲۸۸
~ انرژی ۲۸۸
~ در آشکارساز Ge ۲۹۰
~ سوسوزن ۲۹۰
~ زمانی ۲۹۵
~ آشکارساز Ge ۳۰۰
~ سوسوزن ۳۰۰
تقارن
~ انعکاسی ۵۵
~ بار ۱۳۸
تعویض و ~ ۶۷
~ OP ۴۰۰
تقریب برد مؤثر ۱۲۹
تقویت کننده ۲۸۴
~ اولیه ۲۸۴
تکانهٔ زاویه‌ای کل ۵۳
توابع کروی بسل (جدول) ۴۳
توان ایستانندگی ۲۵۶
توزیع
~ بهنجار (گاؤسی) ۲۸۳
~ پواسون ۲۸۲
~ دوجمله‌ای ۲۸۲
~ گاؤسی (بهنجار) ۲۸۲
تولید زوج ۲۶۳، ۲۸۵
تونل‌زنی ۳۱

ثابت واپاشی (فروپاشی) ۲۱۳
~ جزئی ۲۱۷، ۲۳۲
~ کل ۲۱۷
ثابت ویژهٔ پرتو γ ۲۴۴، ۲۴۵

جداسازی لیزری ایزوتوپها ۸۷
جذب تشدیدی فوتون
پهنای ~ ۴۵۸
پهن‌شدگی دوپلری ~ ۴۵۸–۴۶۲
تصحیح پس‌زنی ~ ۴۵۸، ۴۶۰–۴۶۱
سطح مقطع ~ ۴۵۸–۴۵۹
جذب فوتوالکتریک ۲۸۵
جزء ماتریس ۵۹، ۲۱۹، ۳۵۵

چاه پتانسیل ۳۱
~ دکارتی نامتناهی سه‌بعدی ۳۸
~ کروی نامتناهی سه‌بعدی ۴۰
~ یك‌بعدی ۳۱
~ متناهی ۷۳
~ نامتناهی ۳۱
چگالی احتمال ۲۲
~ شعاعی ۴۴
چگالی جریان ۲۴
~ ذرات ۲۴
چگالی حالتهای نهایی ۵۹، ۲۱۹، ۳۵۵، ۳۷۸

حالت
~ شبه‌پایدار ۲۳۱
~ مانا ۲۴، ۵۸، ۲۱۹
~ مانسته ۳۸۸، ۴۰۷
~ ایزوبار ۳۸۸، ۴۰۷

خطوط اشمیت ۱۶۹

دافعهٔ گریز ازمرکز ۴۵، ۴۷، ۵۱
دز جذب‌شده ۲۴۵
دز معادل ۲۴۶
دوتایهٔ جرمی ۸۵
دوترون ۱۱۰
اختلاط حالت d ~ ۱۱۵-۱۱۶
اسپین ~ ۱۱۳
انرژی بستگی ~ ۱۱۰
پاریتهٔ ~ ۱۱۴
جرم ~ ۱۱۰
گشتاور چارقطبی ~ ۱۱۶
گشتاور دوقطبی مغناطیسی ~ ۱۱۵
دوتریم ۱۱۰

ذرهٔ آزاد ۲۵

رابطهٔ
برد - انرژی الکترونها ۲۵۹
برد - انرژی ذرات سنگین ۲۵۵
عدم‌قطعیت هایزنبرگ ۲۰
راد(یکا) ۲۴۵
رادیواکتیویته
~ القایی ۲۱۲، ۲۲۳
~ طبیعی ۲۳۵
~ مصنوعی ۲۱۳
رم(یکا) ۲۴۶
روش
~ زمان پرواز ۳۰۸-۳۰۹
~ عمرسنجی‌روبیدیم-استرونسیم ۲۴۱
~ عمرسنجی کربن ۱۴ ۲۴۱
رونتگن(یکا) ۲۴۳

ساختار پوسته‌ای و سطح مقطع گیراندازی نوترون ۱۶۱
سد پتانسیل ۲۹
سرعت یونها ۲۶۶
سطح مقطع
تولید عناصر رادیواکتیو و ~ واکنش ۲۲۳
~ دیفرانسیلی ۱۲۳
~ فوتوالکتریك ۲۶۱
~ کل ۱۲۳
سمتگیری هسته‌ها در واپاشی گامازا ۴۲۹
سیورت (یکا) ۲۴۶

شعاع کلاسیك الکترون ۲۶۲
شعاع هسته‌ها ۶۴، ۶۹
انتقال ایزوتوپی اپتیکی و ~ ۷۴

انتقال ایزوتوپی موئونی و ~ ۷۶
تعیین~ازطریق اختلاف انرژی کولنی ۷۸-۷۷
تعیین~ازطریق پراکندگی الکترون ۷۰
تعیین~ازطریق پراکندگی رادرفورد ۷۹
پرتوهای ایکس مزون پی و~ ۷۹
ساختار پوسته‌ای و ~ ۱۶۱
شعاعهای بار و مادهٔ هسته‌ها ۸۱
شکافت ۹۲
~ خودبه‌خود ۲۳۱
شمارگر
~ تلسکوپی ۳۰۵
~ تناسبی ۲۶۷
~ بهمنی ۲۶۸
~ چندسیمی ۳۰۹-۳۱۰
زمان سوق ~ ۲۶۸
میدان الکتریکی ~ ۲۶۷
ناحیهٔ گایگر-مولر ~ ۲۶۸
~ گایگر ۲۶۸
گاز فرونشانی ~ ۲۶۸
شناخت ابتدایی ذرات آلفا ۳۱۶
شناخت ذره ۳۰۷-۳۱۰

ضخامت پوست ۶۹
ضریب تبدیل داخلی ۴۳۵
تعیین ~ ازشدت الکترون ۴۴۷
~ زیرپوستهٔ L ۴۳۷، ۴۵۷
ضریب تضعیف خطی کل ۲۶۳
ضریب جذب
بستگی انرژی ~ ۲۶۵
~ خطی کامپتون ۴۶۴
~ کامپتون ۲۶۴
ضریب گاموف ۳۲۵

ضریب g
~ اوربیتالی ۱۰۰
~ اسپینی ۱۰۰
~ پروتون ۱۰۰
~ نوترون ۱۰۰

طول عمرمتوسط ۲۱۴
طول موج دوبروی ۱۹
طیف
~ تبدیل داخلی ^{203}Hg ۴۳۶
~ سنجهای مغناطیسی ۳۰۱
مقایسه ~ پرتوگامادر Ge و NaI ۲۸۸
~ نمای جرمی ۸۲-۸۳
~ نمایی واپاشی آلفازا ۳۳۴-۳۴۳
~ نمایی واپاشی گامازا ۴۴۴

عامل کیفیت ۲۴۵
عدد
~ اتمی ۱۱
~ جرمی ۱۱
~ کوانتومی تکانهٔ زاویه‌ای ۵۱
~ ذاتی (اسپین) ۵۳
~ مؤلفهٔ تکانهٔ زاویه‌ای ۵۳
عمرسنجی رادیواکتیو ۲۳۸
عمرسنجی رادیوکربن ۲۴۲

فراوانی ایزوتوپ ۸۷
فرض دوبروی ۱۹
فرمول کلاین-نیشینا ۲۶۱
فرمول نیمه‌تجربی جرم ۹۳
فرمی (یکا) ۱۵
فلوئورسانی تشدید هسته‌ای ۴۵۷
فوتوپیک ۲۸۷
فیزیک نوترینو ۳۷۷

قاعدهٔ طلایی فرمی ۵۹، ۲۱۹، ۲۲۲، ۳۵۵، ۳۷۸
قاعدهٔ گایگر-ناتال ۳۲۰
قانون براگ-کلیمان ۲۵۵
قطب‌سنجها ۳۱۰-۳۱۲
قطبش خطی پرتوهای گاما ۴۳۲
قله(های)
~ تک‌فراری ۲۸۷
~ دوفراری ۲۸۷
~ فرار ۲۸۷

کاستی جرم ۸۹
کاهش انرژی الکترونها در پراکندگی کولنی ۲۵۷-۲۵۸
کاهش انرژی ذرات باردار سنگین در پراکندگی کولنی ۲۵۳
کوری(یکا) ۲۱۵

گری(یکا) ۲۵۴
گسیل
~ پروتون ۳۲۸-۳۳۰
~ نوکلئون ۲۳۱
~ ^{14}C از هسته‌های سنگین ۳۲۷-۳۲۸
گسیل نوکلئون تأخیری در واپاشی بتا ۳۸۵
~ برای حالتهای نهایی ۳۸۷
پایستگی انرژی در ~ ۳۸۷
گشتاور
~ تک‌قطبی ۹۸
~ چارقطبی ۹۸، ۱۰۱-۱۰۳
~ چندقطبی ۹۸
~ دوقطبی ۹۸، ۱۰۱-۱۰۳
~ الکتریکی ۴۱۸
~ لختی ۱۹۳
گشتاور چارقطبی الکتریکی ۹۸، ۱۰۱-۱۰۳
~ درمدل پوسته‌ای ۱۷۲، ۱۷۴، ۱۷۵
~ دوترون ۱۱۶
~ و تغییر شکل هسته‌ای ۱۹۰
~ هسته‌های تغییر شکل‌یافته ۱۹۰
گشتاور دوقطبی مغناطیسی ۹۸، ۱۰۱، ۴۱۸
~ درمدل پوسته‌ای ۱۶۸
~ چندذره‌ای ۲۰۰-۲۰۱
~ درمدل جمعی ۱۹۵
~ دوترون ۱۱۵
گیراندازی
~ الکترون ۲۳۰، ۳۴۸-۴۱۰
~ نوترینو ۳۷۷
سطح مقطع ~ ۳۷۸

لبهٔ کامپتون ۲۸۶، ۲۸۷، ۲۸۸
لولهٔ تکثیرکنندهٔ فوتونی ۲۷۰، ۲۷۶، ۲۸۸

مبدل زمان به‌دامنه (TAC) ۲۹۵
مدرج‌سازی برحسب انرژی ۲۹۳
مدل
~ ارتعاشی ۱۸۵
~ پوسته‌ای ۹۴، ۱۵۷-۱۷۹
اثر ~ در واپاشی آلفا ۳۲۱
اثر ~ در واپاشی بتا ۴۰۹
برهم‌کنش اسپین-مدار در ~ ۱۶۶
پتانسیل ~ ۱۶۲
تراز انرژی ~ ۱۶۵
~ چندذره‌ای ۱۹۸
حالت برانگیخته در ~ ۱۷۵
شواهد ~ ۱۵۹، ۱۶۰، ۱۶۱
فرضیه ~ ذرهٔ مستقل ۱۷۵
گشتاور چارقطبی الکتریکی در ~ ۱۷۲، ۱۷۴، ۱۷۵
گشتاور دوقطبی مغناطیسی در ~ ۱۶۸

~ هسته‌های تغییرشکل‌یافته ۲۰۱
~ جمعی ۱۷۹–۱۹۸
ارتعاش ~ ۱۸۵
حالتهای برانگیختهٔ ارتعاشی ~ ۱۸۶
حالتهای برانگیختهٔ دورانی در ~ ۱۹۳، ۱۹۵
~ دورانی ۱۸۸
گشتاور دوقطبی مغناطیسی در ~ ۱۹۵
~ دورانی ۱۸۸
~ قطره مایع ۹۴
مزون پی (π) ۱۴۹
پتانسیل تبادل ~ ۱۵۰
تبادل ~ ۱۴۹
ثابت جفت‌شدگی قوی ~ ۱۵۰
معادلات باتمان ۲۲۸
معادلهٔ شرودینگر ۲۱
~ درمختصات کروی ۲۵
~ سه‌بعدی مستقل از زمان ۲۴
~ شعاعی ۴۱
~ یك‌بعدی مستقل از زمان ۲۱
معادلهٔ شعاعی ۴۱
معمای $\theta - \tau$ ۳۹۷
مقدار انتظاری ۲۳
مگنتون ۱۰۰
~ بور ۱۰۰
~ هسته‌ای ۱۰۰
مهبانگ ۲۳۵

نظریهٔ کوانتومی تکانهٔ زاویه‌ای ۵۱
نفوذ از سد ۳۱
نقض پاریته ۵۶
نمادهای طیف‌نمایی ۵۲، ۵۴
نوار دورانی ۱۹۱
نوترون ۱۲
نوترینو(های) ۲۳۰
آشکارسازی ~ ۳۷۹
حدود جرم ~ ۳۵۱، ۳۶۵–۳۶۸
~ خورشیدی ۳۸۰
هلیسیتهٔ ~ ۳۸۰
نوسانگر هماهنگ
تابع موج ~ سه‌بعدی ۴۶
تابع موج یك‌بعدی ~ (جدول) ۳۷
ترازهای انرژی ~ ۴۶–۴۸
چگالی احتمال ~ (منحنی) ۴۷
نوکلئون ۱۲
نوکلید ۱۲
نیروی تبادل ۱۴۵
نیروی تزویج ۹۳، ۱۰۱
نیمه‌عمر ۲۱۳
~ جزئی ۲۳۲

واپاشی آلفازا ۲۲۹، ۳۱۶–۳۴۳
انرژی آزادشده در ~ ۳۱۸
انرژی پس‌زنی در ~ ۳۱۹
~ی ترجیحی ۳۴۰
تغییر پاریته در ~ ۳۳۰
تکانهٔ زاویه‌ای در ~ ۳۳۰
توزیع زاویه‌ای در ~ ۳۳۲
رده‌بندی ~ ۳۱۹
ساختار پوسته‌ای در ~ ۳۲۱
ساختار ریز ~ ۳۳۱
سد کولنی برای ~ ۳۲۲–۳۲۴
ضریب گاموف در ~ ۳۲۵
فرایند اساسی ~ ۳۱۸
قاعدهٔ گایگر-ناتال در ~ ۳۲۰
مقدار Q ~ برحسب A ۳۲۱
مقدار Q ~ ازفرمول نیمه‌تجربی جرم ۳۲۱

مقدار Q در ~ ۳۱۹
نظریهٔ کوانتومی ~ ۳۲۴–۳۲۶
نفوذ درسد برای ~ ۳۲۲–۳۲۴
نقض P در ~ ۴۰۱
نمودار نیمه‌عمر برحسب انرژی در ~ ۳۲۰
نیمه‌عمر محاسبه‌شدهٔ ~ ۳۲۶
هسته‌های تغییرشکل‌یافته در ~ ۳۳۵
همفرودی ~ با پرتوگاما ۳۳۹–۳۴۳
~ ^{۲۴۲}Cm ۳۳۱
~ ^{۲۵۳}Es ۳۳۳
~ ^{۲۵۱}Fm ۳۳۶–۳۴۲
~ ^{۲۲۹}Pa ۳۴۱–۳۴۳
واپاشی بتازا ۲۲۹، ۳۴۸–۴۱۰
آزادشدن انرژی در ~ ۳۴۹
آهنگ واپاشی کل در ~ ۳۶۱
~ی ابرمجاز ۳۶۳
اثرات کولنی بر ~ ۳۵۹
اثرات مدل پوسته‌ای بر ~ ۴۰۹
انتگرال فرمی در ~ ۳۶۳
تابع فرمی در ~ ۳۶۰
تعیین حدود جرم نوترینو از ~ ۳۵۱
تغییر پاریته در ~ ۳۶۹
تقارن CP در ~ ۴۰۰
تقریب مجاز در ~ ۳۰۷
ثابت شدت در ~ ۳۶۳
جزء ماتریس در ~ ۳۵۷
چگالی حالتها در ~ ۳۵۶
حالت مانستهٔ ایزوباری در ~ ۳۸۸، ۳۹۱، ۴۰۷
طیف انرژی در ~ ۳۵۸
طیف پیوستهٔ الکترون در ~ ۳۵۰
طیف تکانه در ~ ۳۵۷–۳۶۰
طیف‌نمایی همفرودی در ~ ۴۰۴
فرضیهٔ جریان برداری پایسته (CVC) در ~ ۳۷۰
قواعد گزینش برای ~ مجاز ۳۶۹
قواعد گزینش تکانهٔ زاویه‌ای در ~ ۳۶۹
مقدار ft در ~ ۳۶۳، ۳۷۵، ۳۷۶
مقدار Q گیراندازی الکترون در ~ ۳۵۲
مقدار Q مثبت در ~ ۳۵۳
مقدار Q منفی در ~ ۳۵۲
~ی ممنوع ۳۶۰
عامل شکل در ~ ۳۶۱–۳۶۲
قواعد گزینش ~ ۳۷۳
ناپایستگی پاریته در ~ ۳۹۷–۴۰۱
ناوردایی همیوغی بار در ~ ۳۹۷
نظریهٔ فرمی دربارهٔ ~ ۳۵۴
نمودار فرمی-کوری در ~ ۳۶۰، ۴۰۱–۴۰۲، ۴۰۴–۴۰۶
~ مجاز
~ ممنوع اول ۳۶۱
~ نوترون ۳۵۰، ۳۶۹
واپاشی فرمی در ~ ۳۶۹
واپاشی گاموف-تلر در ~ ۳۶۹–۳۷۰
هسته‌های آینه‌ای در ~ ۳۷۱
هلیسیتهٔ الکترون ونوترینو در ~ ۳۸۰
~ در ^{۱۲}B ۴۰۷–۴۰۸
~ در ^{۱۰}Be ۴۰۲
~ در ^{۲۱۰}Bi ۳۴۹
~ در ^{۶۴}Cu ۳۵۹
~ در ^{۶۶}Ga ۳۶۱
~ در ^{۳}H ۳۶۶–۳۶۸
~ در ^{۱۲۶}I ۴۰۶–۴۰۸
~ در ^{۴۰}K ۴۰۲
~ در ^{۱۷۶}Lu ۴۰۳
~ در ^{۱۷۷}Lu ۴۰۴–۴۰۶

~ در ^{12}N ۴۰۷–۴۰۸
~ در ^{91}Y ۳۶۲
~ در ^{72}Zn ۴۰۴
واپاشی پوزیترون ۲۳۰
واپاشی دوبتایی ۹۶، ۳۸۱–۳۸۵
آهنگ ~ ۳۸۲
~ بدون نوترینو ۳۸۵
مشاهدهٔ زمین‌شناختی ~ ۳۸۳
مشاهدهٔ مستقیم ~ ۳۸۳
~ وپایستگی لپتون ۳۸۳
واپاشی ذرات آلفای بلندبرد ۳۸۶
واپاشی(های) رادیواکتیو
رشد ~ دختر-هسته ۲۲۵
زنجیرهٔ ~ ۲۲۵
قانون نمایی ~ ۲۱۳
نظریهٔ آماری ~ ۲۱۳
واپاشی گامازا ۲۳۰، ۴۱۶–۴۷۱
پس‌زنی هسته‌ای ~ ۴۱۷
توزیع زاویه‌ای ~ ۴۲۹
ثابت واپاشی جزئی در ~ ۴۴۱
سمتگیری هسته‌ها در ~ ۴۲۹
طیف‌نمایی همفرودی در ~ ۴۴۸
قطبش ~ ۴۳۲–۴۳۳
قواعد گزینش پاریته در ~ ۴۲۴–۴۲۵
قواعد گزینش تکانهٔ زاویه‌ای در ~ ۴۲۴–۴۲۵
نمایش آماری E_1 در ~ ۴۴۳
نمایش آماری E_2 در ~ ۴۴۳
نمایش آماری M_4 در ~ ۴۴۴
~ واختلاط چندقطبیها ۴۲۶، ۴۳۱، ۴۵۷
همبستگی زاویه‌ای در ~ ۴۳۰–۴۳۱
~ در ^{72}Ge ۴۴۰
~ در ^{108m}Hf ۴۴۹–۴۵۵
~ در ^{72}Se ۴۴۱
~ در ^{108}Cd (از ^{108m}Ag) ۴۴۵–۴۴۹
~ در ^{177}Hf (از ^{177}Lu) ۴۵۳–۴۵۶
~ در ^{108}Pd (از ^{108m}Ag) ۴۴۵–۴۴۹
واپاشی نگاترون ۲۳۰
واریانس ۲۸۲
واگنی ۳۹
ویژه مقدار ۲۲

هسته‌های همسوشده ۳۳۳
واپاشی آلفازا در ~ ۳۳۳
واپاشی بتازا در ~ ۳۹۷
هلیسیته ۳۸۰
هماهنگهای کروی (جدول) ۴۲
هماهنگهای کروی (منحنی) ۴۵
همبستگی زاویه‌ای ۴۳۰–۴۳۱
همجوشی ۹۰
همفرودی ۲۹۳
اندازه‌گیری طول عمر با روش ~ تأخیری ۳۰۰
~ حقیقی ۲۹۵
~ شانسی ۲۹۴
وابستگی ~ به‌فعالیت چشمه ۲۹۶
همیوغی بار ۳۹۴

یکاهای اندازه‌گیری تابش ۲۴۲، ۲۴۶

گروه فیزیک مرکز نشر دانشگاهی منتشر کرده است

نظریهٔ نسبیت عام، تألیف پل. آ. م. دیراک، ترجمهٔ جعفر گودرزی

مقدمه‌ای بر فیزیک لیزر، تألیف بلا. آ. لنجیل، ترجمهٔ پروین بیات مختاری، حبیب مجیدی ذوالبنین

واژه‌نامهٔ فیزیک (انگلیسی ـ فارسی) نسر مقدماتی، گروه فیزیک، ساحهٔ واژه‌گزینی

فیزیک عمومی (جلد اول مکانیک)، تألیف آلونسو. فین، ترجمهٔ لطیف کاسیگر.

واژگان فیزیک (انگلیسی ـ فارسی)، گروه فیزیک ـ ساحهٔ واژه‌گزینی

مبانی نور و فیزیک نوین، تألیف هالیدی، رزنیک، ترجمهٔ احمد کیاست‌پور، جمشید احسیان

توابع خاص فیزیک ریاضی، تألیف هاری هوخستات، ترجمهٔ غلامرضا برادران خسروشاهی، فرخ حضرتی آشتیانی

آشنایی با حساب تانسوری و نسبیت، تألیف درک لاژدن، ترجمهٔ محمدرضا بهفروز

واژه‌نامهٔ فیزیک (انگلیسی ـ فارسی) ـ دورهٔ دوم، جزوهٔ یک، گروه فیزیک ـ ساحهٔ واژه‌گزینی

فیزیک کوانتومی (جلد اول)، تألیف آیزبرگ، رزنیک، ترجمهٔ ناصر نفری

روشهای ریاضی در فیزیک (جلد اول)، تألیف جورج آرفکن، ترجمهٔ محی‌الدین شیخ‌الاسلامی، حسین فلسفی

کمیتها، یکاها، نمادها و ثابتهای بنیادی فیزیک، تألیف سازمان آفتور، ترجمهٔ صمد فرخی

مکانیک کلاسیک، تألیف ت. و. کیبل، ترجمهٔ اعظم پورفاضی، محمدعلی ساهرمانیان

فیزیک (جلد اول)، تألیف هالیدی، رزنیک، ترجمهٔ مهدی گلشنی، ناصر مقبلی

تندآموز شیوه‌های ریاضی در فیزیک، تألیف فازه، مازاسی، ترجمهٔ لطیف کاسیگر

آشنایی با نسبیت خاص، تألیف رابرت رزنیک، ترجمهٔ جعفر گودرزی

منشأ سیارات، تألیف ای. بی. ویلیامز، ترجمهٔ تاج‌الدین بنی‌هاشم، ایرج ملک‌پور

دورهٔ عمومی برق (برق مستقیم ۱)، تألیف مؤسسهٔ فدرال برای تحقیقات آموزش حرفه‌ای، آلمان غربی، ترجمهٔ هوشنگ نحوی

خطاهای مشاهده و محاسبهٔ آن، تألیف ج. تایلر، ترجمهٔ محسن تدین

مبانی فیزیک (جلد اول)، تألیف پاورسکی، پینسکی، ترجمهٔ محمدتقی توسلی، مهرانگیز طالب‌زاده، ناصر مقبلی

فیزیک (جلد دوم)، تألیف هالیدی، رزنیک، ترجمهٔ نعمت‌الله گلستانیان، محمود بهار

فیزیک آماری (دورهٔ برکلی)، تألیف ف. رایف، ترجمهٔ جعفر سبروس ضیاء، ابوالحسن فرج‌زاده

دورهٔ فشردهٔ فیزیک نظری (جلد اول) (مکانیک و الکترودینامیک)، تألیف لانداؤ، لیف سیتز، ترجمهٔ رضا منصوری

حرارت و ترمودینامیک، تألیف زیمانسکی، دیتمن، ترجمهٔ حسین بوتونجی، حسن سریفیان عطار، محمدهادی هادی‌زاده

مهندسی هسته‌ای پایه، تألیف فوستر، رایت، ترجمهٔ منیره رهبر، علی افشار بکسلو

فیزیک عمومی (جلد دوم میدانها و امواج)، تألیف آلونسو. فین، ترجمهٔ لطیف کاسیگر

مکانیک کوانتومی، تألیف کوهن، تانوجی، دیو، لالوئه، ترجمهٔ محمدفرهاد رحیمی، محسن سربینه‌ای

مبانی فیزیک نوین، تألیف وایدنر، سلز، ترجمهٔ علی‌اکبر بابایی، مهدی صفا اصفهانی

هواشناسی فیزیکی، تألیف پی. جی. رتالاک، ترجمهٔ علیرضا صادقی حسینی

فیزیک (جلد سوم)، تألیف هالیدی، رزنیک، ترجمهٔ نعمت‌الله گلستانیان، محمود بهار

واژه‌نامهٔ فیزیک (انگلیسی ـ فارسی، فارسی ـ انگلیسی)، گروه فیزیک، ساحهٔ واژه‌گزینی

یکاها و کمیتهای فیزیکی، تألیف اِل. ای. سنا، ترجمهٔ مسعود میرشکار

فیزیک (جلد اول)، تألیف هالیدی، رزنیک، ترجمهٔ نعمت‌الله گلستانیان، محمود بهار

آشنایی با فیزیک اتمی، تألیف انگ، وهر، ریچاردز، ترجمهٔ علی پذیرنده، محمدرضا حمیدیان

فیزیک نوین و مکانیک کوانتومی، تألیف المر ای. آندرسون، ترجمهٔ احمد کیاست‌پور، احمد پرورش، جمشید عمیقیان

آشنایی با فیزیک در پرستاری، تألیف هسل هـ فلیتر، ترجمهٔ پروین عزالدین، جهانشاه میرزابیگی

آشنایی با فیزیک حالت جامد، تألیف چارلز کیتل، ترجمهٔ اعظم پورفاضی، مهدی صفا، جمشید عمیقیان

فیزیک ذرات بنیادی، تألیف اِل. جی تاسی، ترجمهٔ مهدی بارزی، حسین بقایی

آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای (جلد اول)، تألیف سمت، آلبرایت، ترجمهٔ خسرو بخشایی

نورشناخت، تألیف هشت، زاپاک، ترجمهٔ پروین بیات مختاری، حبیب مجیدی ذوالبنین

آشنایی با فیزیک اتمی و هسته‌ای (جلد دوم)، تألیف سمت، آلبرایت، ترجمهٔ خسرو بخشایی

جزءوکل، تألیف ورنر هایزنبرگ، ترجمهٔ حسین معصومی همدانی

الکترونیک، تألیف کالورت، مک‌کازلند، ترجمهٔ ابراهیم برزآبادی، حسین حسن‌زهرایی، سیدمحسن موسوی

مبانی نظریهٔ الکترومغناطیس، ریتس، میلفورد، کریستی، ترجمهٔ جلال صمیمی

مکانیک کوانتومی، تألیف پاول، کریسمن، ترجمهٔ جلال‌الدین پاشایی‌راد، عبدالرضا سعادت

اصول الکترونیک (جلد اول)، تألیف آلبرت پل مالوینو، ترجمهٔ مهدی حسن کاظمینی

آشنایی با ژئوفیزیک، تألیف جورج د. گارلند، ترجمهٔ میرعباس رحمتی، جعفر شجاع طاهری

گروه ریاضی مرکز نشر دانشگاهی منتشر کرده است

حساب دیفرانسیل و انتگرال و هندسهٔ تحلیلی. جورج ب. توماس، ترجمهٔ علی‌اکبر جعفریان و ابوالقاسم میامئی، چاپ ۵،۴،۳،۲

جبر، تألیف روزه گودمان، ترجمهٔ محمدرضا سلطانپور و وهاب داورپناه، جلد ۱ (با همکاری دانشگاه صنعتی شریف)

حساب دیفرانسیل و انتگرال، تألیف تام م. اپوستل، ترجمهٔ علیرضا ذکایی و دیگران، جلد اول

هندسه‌های اقلیدسی و نااقلیدسی، تألیف مارویِن جی. گرینبرگ، ترجمهٔ م. هـ. شفیعیها، چاپ دوم.

متغیرهای مختلط و کاربرد آنها، تألیف رونل و. جرچیل و دیگران، ترجمهٔ امیر خسروی

سری فوریه، تألیف ی.ن. اسنِدون، ترجمهٔ بتول جذبی

نظریهٔ طبیعی مجموعه‌ها، تألیف ب.ر. هالموس، ترجمهٔ عبدالحمید دادالله

نخستین درس در جبر مجرد، تألیف ف.ج. هیگینز، ترجمهٔ محمدرضا رجب‌زاده مقدم

آشنایی با نظریهٔ اعداد، تألیف ویلیام و. آدامز، لری جونل گلدشتین، ترجمهٔ آدینه محمد نارنجانی، جلد اول

جبر خطی، تألیف مایکل اونان، ترجمهٔ علی‌اکبر محمدی حسن‌آبادی

ریاضیات مهندسی پیشرفته، (جلد اول)، تألیف اروین کرویت سیگ، ترجمهٔ عبدالله شیدفر و حسین فرمان

آشنایی با تاریخ ریاضیات، تألیف هاورد و. ایوز، ترجمهٔ محمدقاسم وحیدی اصل، جلد اول

معادلات دیفرانسیل و کاربرد آن، تألیف جرج ف. سیمونز، ترجمهٔ علی‌اکبر بابایی و ابوالقاسم میامئی

آمار مقدماتی، (جلد اول)، تألیف ت. هـ. ووناکت و ر.ج. ووناکت، ترجمهٔ محمدرضا مسکانی

طراحی منطقی دستگاههای رقمی، تألیف آرتور د. فریدمن، ترجمهٔ شهلا طباطبائی و فرهاد صاحبان

حساب دیفرانسیل و انتگرال برای رشته‌های بازرگانی، زیست‌شناسی و علوم اجتماعی، تألیف د. ج. کرودیس و دیگران، ترجمهٔ ابوالقاسم لاله

اعداد مختلط، تألیف والتر لدرمن، ترجمهٔ علی‌اکبر مهرورز

مفاهیم و روشهای آماری (جلد اول)، تألیف گوری باتاچاریا و ریچارد جانسون، ترجمهٔ مرتضی‌ابن شهرآشوب و فتاح میکائیلی

مبانی معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی، تألیف ایان اسنِدون، ترجمهٔ مرتضی سفیعی موسوی و علی کدخدائی

نظریه و کاربردهای آنالیز عددی، تألیف ج.م. فیلیپس و ب. ج. تیلور، ترجمهٔ غلامحسین بهفروز و میرکمال میرنیا

نظریهٔ نمونه‌گیری، تألیف پرویز شیرانی

نظریه مقدماتی احتمال و فرآیندهای تصادفی، تألیف کای. لای. چانگ، ترجمهٔ محمدقاسم وحیدی اصل

اشنایی با توپولوژی و آنالیز نوین، تألیف ج اف. سیمونز، ترجمهٔ اسدالله نیکنام

جبر خطی، تألیف کنت هافمن و ری. کنر، ترجمهٔ جمشید فرسیدی

تحلیل واریانس و طرح آزمایشها، تألیف م. زیرو و د. دوگه، ترجمهٔ رمضانعلی مسکانی

مبانی ریاضیات، تألیف ایان استیوارت و دیوید تال، ترجمهٔ محمدمهدی ابراهیمی

حساب دیفرانسیل و انتگرال و هندسهٔ تحلیلی، تألیف لوئیس لینهلد، ترجمهٔ مهدی بهزاد و محسن رزاقی و دیگران

زندگینامهٔ ریاضیدانان دورهٔ اسلامی، تألیف ابوالقاسم قربانی

توپولوژی، نخستین درس، تألیف جیمز. ر. مانکرز، ترجمهٔ یحیی تابش، ابراهیم صالحی و جواد لآلی

مفاهیم و روشهای آماری (جلد ۲)، تألیف گوری باتاچاریا و ریچارد جانسون، ترجمهٔ مرتضی‌ابن شهرآشوب و فتاح میکائیلی

آشنایی با منطق ریاضی، تألیف هربرت. ب. اندرتون، ترجمهٔ غلامرضا برادران خسروشاهی و محمد رجبی طرخورانی

آنالیز مختلط و کاربردهای آن، تألیف ریچارد. ا. سیلورمن، ترجمهٔ علی عمیدی و خلیل باریاب

اصول آنالیز حقیقی، تألیف ربرت. جی. بارتل، ترجمهٔ جعفر زعفرانی

توابع متغیر مختلط، تألیف د.ا. تال، ترجمهٔ مجید محمدزاده

نخستین گامها در آنالیز عددی، تألیف هوسکینگ، جویس، ترنر، ترجمهٔ اسماعیل بابلیان و میرکمال میرنیا

نظریهٔ گالوا، تألیف مورتی، راماناتان، شوکلا، ترجمهٔ محمدتقی دیبائی

ریاضیات مهندسی پیشرفته (جلد دوم)، تألیف اروین

گروه ریاضی مرکز نشر دانشگاهی منتشر کرده است

کرویت سیگ، ترجمهٔ عبدالله شیدفر و حسین فرمان
آشنایی با تحقیق در عملیات (جلد اول)، تألیف حمدی طه، ترجمهٔ محمدباقر بازرگان
حساب دیفرانسیل و انتگرال و هندسهٔ تحلیلی (جلد اول)، تألیف لوئیس لیتهلد، ترجمهٔ بهزاد، رزاقی، ناظمی، کاظمی
مقدمات معادلات دیفرانسیل با مسائل مقدار مرزی، تألیف بویس، دیپریما، ترجمهٔ محمدرضا سلطانپور و بیژن شمس
نظریهٔ آمار (جلد اول)، تألیف برنارد و لیندگرن، ترجمهٔ ابوالقاسم بزرگ‌نیا
آمار مقدماتی (جلد دوم)، تألیف تامس. اچ. وواناکت، راندل. جی. وواناکت، ترجمهٔ محمدرضا مشکانی
نخستین درس در جبر مجرد (جلد اول)، تألیف جان. ب. فرالی، ترجمهٔ مسعود فرزان
استنباط آماری نایارامتری، تألیف جین دیکنسن گیبنز، ترجمهٔ عبدالرحیم سهلایی، علی عمیدی
اعداد: گویا و گنگ، تألیف ایوان نیون، ترجمهٔ غلامحسین اخلاقی‌نیا
آشنایی با نظریهٔ گروهها، تألیف والتر لدرمن، ترجمهٔ محمدحسن بیژن‌زاده
آشنایی با فرایندهای تصادفی، تألیف هونل، پورت، استون، ترجمهٔ محمدحسین افقهی
مسائل مسابقه‌های ریاضی مجارستان(۱)، تألیف یوزف کورشاك، ترجمهٔ سعید فاریابی.
آموزش تدریس ریاضیات دبیرستانی، تألیف بسلر، کولب، ترجمهٔ جواد همدانی‌زاده
مسائل مسابقه‌های ریاضی مجارستان (جلد دوم)، تألیف یوزف کورشاك، ترجمهٔ محمدمهدی ابراهیمی
هندسهٔ دیفرانسیل مقدماتی، تألیف بارت اونیل، ترجمهٔ بیژن شمس، محمدرضا سلطانپور
ریاضیات انتخاب، تألیف ایوان نیون، ترجمهٔ علی عمیدی، بتول جذبی
آشنایی با تاریخ ریاضیات (جلد دوم)، تألیف هاورد. و. ایوز، ترجمهٔ محمدقاسم وحیدی اصل
نظریهٔ مجموعه‌ها و کاربردهای آن، تألیف تی‌لین، یو-فنگ. لین، ترجمهٔ عمید رسولیان
نظریهٔ آمار (جلد دوم)، تألیف برنارد و لیندگرن، ترجمهٔ ابوالقاسم بزرگ‌نیا

المپیادهای ریاضی بین‌المللی (جلد اول) تألیف سموئل گرایتزر، ترجمهٔ محمدقاسم وحیدی اصل
حساب دیفرانسیل و انتگرال چیست؟ تألیف و. و. سویر، ترجمهٔ محمدحسن مهدوی اردبیلی
آشنایی با نابرابریها، تألیف بکن‌باخ، بلمن، ترجمهٔ محمدحسین افقهی
مسائل مسابقه‌های ریاضی دبیرستانی امریکا (جلد اول)، تألیف جارلز. ت. سالکیند، ترجمهٔ حسین جوادپور و محمد قزل‌ایاق
مسائل مسابقه‌های ریاضی دبیرستانی امریکا (جلد دوم)، تألیف جارلز. ت. سالکیند، ترجمهٔ علی کافی
دانستنیهای اعداد بزرگ، تألیف دیویس، ترجمهٔ علی عمیدی
اصول آماری در طرح آزمایشها (جلد اول)، تألیف وابنر، ترجمهٔ زهره سرمد، مهناس اسفندیاری
گزیده‌هایی از نظریهٔ اعداد، تألیف اویستن‌اور، ترجمهٔ منوچهر وصال
تبدیلهای هندسی (جلد سوم)، تألیف ای. م. یاگلم، ترجمهٔ محمدهادی سفیعیها
مسائل مسابقه‌های ریاضی دبیرستانی امریکا (جلد سوم)، تألیف سالکیند، ارل، ترجمهٔ غلامحسین اخلاقی‌نیا
مسائل مسابقه‌های ریاضی دبیرستانی امریکا (جلد۳)، تألیف آرتینو، گاگلیون، شل، ترجمهٔ عبدالحسین مصحفی
المپیادهای ریاضی بین‌المللی (جلد دوم)، تألیف مری کلمکین، ترجمهٔ محمدقاسم وحیدی اصل
تبدیلهای هندسی (جلد اول)، تألیف ای.م. یاگلم، ترجمهٔ اسدالله کارشناس، عمید رسولیان
تبدیلهای هندسی (جلد دوم)، تألیف ای. م. یاگلم، ترجمهٔ محمدباقری
تابع گاما، تألیف امیل آرتین، ترجمهٔ سعید ذاکری
جبر ماتریسها برای علوم زیستی و برخی کاربردهای آماری آن، تألیف سیرل، ترجمهٔ جلال داودزاده
آمار ریاضی، تألیف فروند، والپول، ترجمهٔ علی عمیدی، محمدقاسم وحیدی اصل
آنالیز عددی مقدماتی به شیوهٔ الگوریتمی، تألیف کانت، دوبور، ترجمهٔ سراج‌الدین کاتبی
آشنایی با اقتصادسنجی، تألیف اسکار لانگه، ترجمهٔ محمدحسین طوفانی‌نژاد
نظریهٔ اعداد، تألیف جکسن، ترجمهٔ محمدهادی سفیعیها

مرکز نشر دانشگاهی

www.iup.ir

آشنایی با فیزیک هسته ای
ی مرکز نشر ج ۱
410125
فروشگاه آینده سازان

شابک: ۰-۶۲۴-۰۱-۹۶۴

۴۷۰۰ تومان