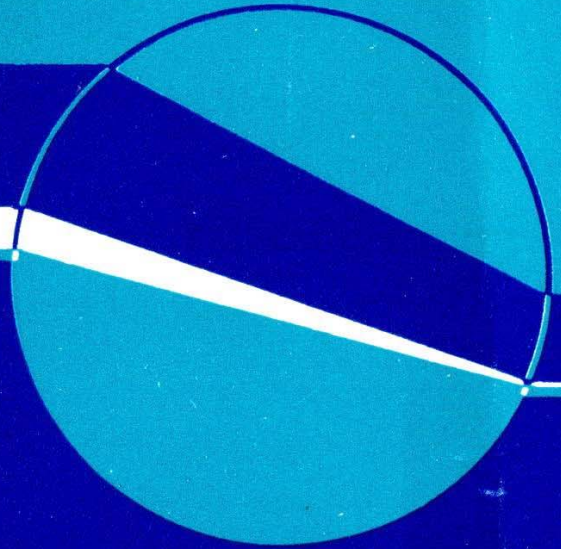
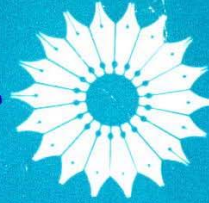




آشنایی با
فیزیک بهداشت
از دیدگاه پرتوشناسی

هرمان سمبر

ترجمه محمد ابراهیم ابوکاظمی، هوشنگ سهری، علیرضا بینش

نشر دانشگاه



فرمان سمیر

آشنایی با فیزیک بهداشت از دیدگاه پرتوشناسی

کتابخانه

پرتوزایی

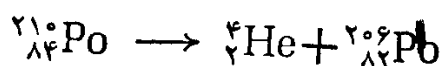
پرتوزایی و ساز و کار تبدیل

پرتوزایی (رادیواکتیویته) را می‌توان به صورت تبدیل هسته‌ای خود به خودی که منجر به تشکیل عناصر جدید می‌شود، تعریف کرد. این تبدیلها از طریق چند ساز و کار گوناگون صورت می‌گیرند که برخی از آنها عبارت‌اند از: گسیل ذره آلفا، گسیل ذرات بتا و پوزیترون، و گیراندازی الکترون مداری. هزیک از این واکنشها ممکن است همراه با گسیل تابش گاما باشد یا نباشد. پرتوزایی و خواص پرتوزایی نوکلیدها تنها از طریق بررسیهای هسته‌ای قابل تعیین است، و به حالت‌های فیزیکی و شیمیایی ایزوتوپ پرتوزا بستگی ندارد. بنا براین، خواص ایزوتوپهای پرتوزا را به هیچ وجه نمی‌توان تغییر داد، و هر نوکلید پرتوزا خواص انحصاری مخصوص به خود دارد. تبدیل هسته‌ای پرتوزا دقیقاً به دو عامل وابسته است: (۱) نوع خاص ناپایداری هسته، یعنی اینکه نسبت نوترون به پروتون در نوکلید مورد بررسی یا خیلی بالاست یا خیلی پایین؛ (۲) ارتباط جرم - انرژی بین مادر - هسته (هسته مادر)، دختر - هسته (هسته دختر)، و ذره گسیل شده.

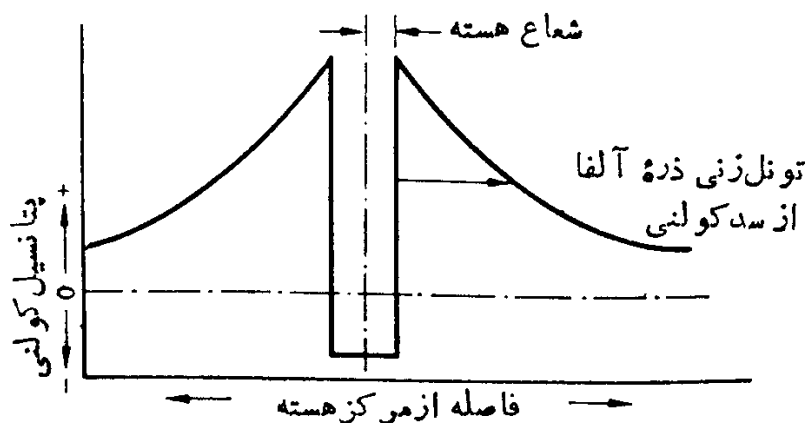
گسیل ذره آلفا

هنگامی که نسبت نوترون به پروتون در یک ایزوتوپ پرتوزا خیلی پایین باشد، از هسته آن ایزوتوپ یک هسته پرا انرژی هلیوم به نام ذره آلفا گسیل می‌شود. این ذره، ذره‌ای سنگین با بار

الکتریکی مثبت است و از دو پروتون و دو نوترون تشکیل شده است. از آنجا که در این تبدیل هسته‌ای اعداد اتمی و اعداد جرمی پایسته می‌مانند، در نتیجه گسیل آلفا، دختر-هسته‌ای تولید خواهد شد که عدد اتمی‌اش به اندازه ۲ واحد و عدد جرمی‌اش به اندازه ۴ واحد کمتر از اعداد مربوط به مادر-هسته است. برای نمونه، واکنش گسیل آلفا در ^{210}Po به صورت زیر است



در این نمونه، نسبت نوترون به پروتون در ^{210}Po به صورت ۱۲۶ به ۸۴ یا ۱٫۵ به ۱ است. پس از واپاشی هسته از طریق گسیل ذره آلفا، دختر-هسته پایدار $^{206}_{82}\text{Pb}$ تشکیل می‌شود که نسبت نوترون به پروتون در آن به صورت ۱۵۱ به ۸۱ است. تمام هسته‌هایی که به طور طبیعی ذره آلفا گسیل می‌کنند، عناصری با عدد اتمی بزرگتر از ۸۲ هستند مگر مورد استثنایی $^{147}_{64}\text{Sm}$. توجیه این امر دو جهت دارد: نخست اینکه در هسته‌های سنگین، نیروی دافعه الکتروستاتیکی خیلی سریعتر از نیروی جاذبه هسته‌ای افزایش می‌یابد، و بدین ترتیب ممکن است بزرگی نیروی الکتروستاتیکی به حد نیروی هسته‌ای برسد و یا حتی از آن هم بیشتر شود. دیگر اینکه ذره گسیل شونده باید انرژی کافی داشته باشد تا بر سد پتانسیل بلندی که به علت حضور نوکلئونهای باردار مثبت در مقابل سطح هسته تشکیل می‌شود، غلبه کنند. این سد پتانسیل را به طور ترسیمی با منحنی شکل ۱۰۴ نشان داده‌ایم. درون هسته‌را، به علت پتانسیل منفی‌اش، می‌توان به صورت چاه پتانسیلی در نظر گرفت که عمق آن برای ذره آلفا در هسته‌ای با عدد اتمی بالا، به حدود ۲۵ MeV می‌رسد. بنا بر نظریه مکانیک کوانتومی، ذره آلفا می‌تواند از طریق تونل زنی درسد پتانسیل از چاه پتانسیل بگریزد. برای اینکه از هسته‌های با عدد اتمی بالا به طور طبیعی ذره آلفا گسیل شود، مطابق محاسبات نظری لازم است که انرژی جنبشی ذره آلفا بیشتر از ۳٫۸ MeV باشد. کمترین انرژی ذره آلفای حاصل از عناصر با عدد اتمی بالا که در آزمایش به دست آمده برابر با ۳٫۹۳ MeV است که شرط بالا را تأیید می‌کند. این ذره آلفا (با انرژی ۳٫۹۳ MeV)



شکل ۱۰۴ پتانسیل درون هسته و تغییرات پتانسیل در نزدیکیهای هسته.

از ^{232}Th گسیل می‌شود. (انرژی ذره آلفایی که از ساماریوم ^{147}Sm گسیل می‌شود، فقط برابر 2.18 MeV است. ولی اگر عدد اتمی کم ساماریوم یعنی ۶۲ را در محاسبات نظری منظور کنیم، این انرژی کم هم قابل قبول خواهد بود.) طبعاً ایسن سؤال مطرح می‌شود که منشأ این انرژی جنبشی کجاست؟ این انرژی در نتیجه کاهش جرم ناشی از تشکیل ذره آلفا حاصل می‌شود. به‌طور کلی برای اینکه گسیل ذره آلفا تحقق یابد، لازم است که معادله پایستگی زیر برقرار شود

$$M_p = M_d + M_\alpha + 2M_e + Q \quad (1.4)$$

که در آن M_p ، M_d ، M_α و M_e به ترتیب عبارت اند از جرم مادر-هسته، جرم دختر-هسته، جرم ذره آلفای گسیل شده، و جرم الکترونیایی که ضمن تبدیل به دخترهسته با عدد اتمی پایینتر ناپدید می‌شوند (دو الکترون). همچنین Q مقدار کل انرژی آزاد شده در این تبدیل پرتوزاست. برای نمونه، در مورد واپاشی ^{210}Po ، بنا بر معادله (۱.۴) داریم

$$\begin{aligned} Q &= M_{\text{Po}} - M_{\text{Pb}} - M_\alpha - 2M_e \\ &= 210.04850 - 206.03883 - 4.00267 - 2 \times 0.00055 \\ &= 0.0058 \text{ amu} \end{aligned}$$

که مقدار آن بر حسب انرژی برابر است با

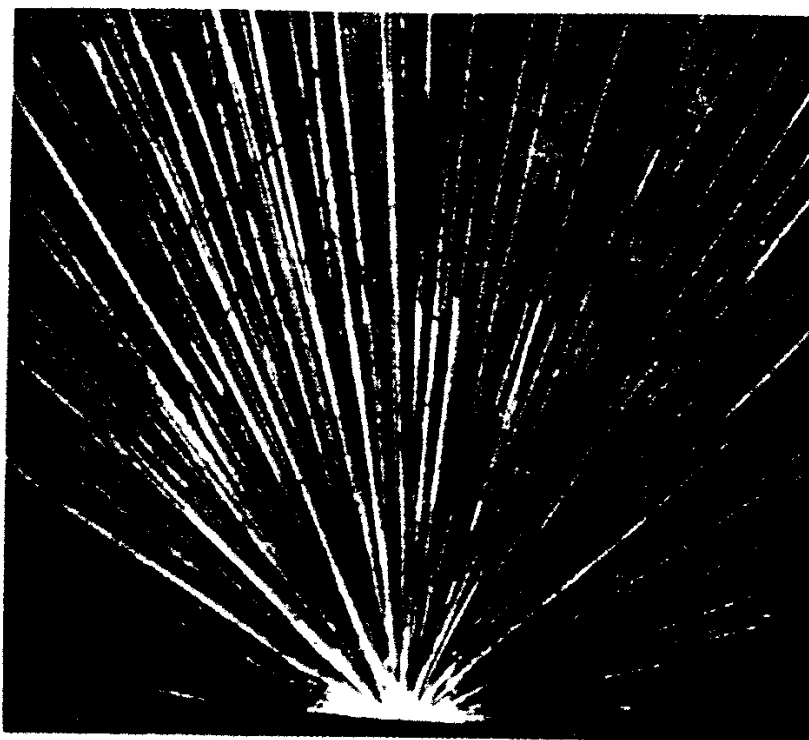
$$\begin{aligned} Q &= 0.0058 \text{ amu} \times 931 \frac{\text{MeV}}{\text{amu}} \\ &= 5.4 \text{ MeV} \end{aligned}$$

این مقدار Q معرف کل انرژی آزاد شده در تبدیل هسته‌ای ^{210}Po است. چون در این تبدیل هیچگونه پرتوگامایی گسیل نمی‌شود، تمام این انرژی آزاد شده به‌صورت انرژی جنبشی درمی‌آید و بین ذره آلفا و دختر-هسته که بعداً از گسیل آلفا پس‌زده می‌شود تقسیم می‌شود. تقسیم دقیق انرژی بین آلفا و هسته پس‌زن، به جرم دختر-هسته بستگی دارد که با استفاده از قوانین پایستگی انرژی و تکانه می‌توان سهم هر یک را تعیین کرد. اگر جرم هسته پس‌زن و ذره آلفا را به ترتیب M و m بگیریم و چنانچه سرعت‌های این دو را هم به ترتیب با V و v نشان دهیم، در این صورت داریم

$$Q = \frac{1}{2} MV^2 + \frac{1}{2} mv^2 \quad (2.4)$$

همچنین، بنا بر قانون پایستگی تکانه، داریم

$$MV = mv \quad (3.4)$$



شکل ۲.۴ ردهای حاصل از ذرات آلفا در اتاقک ابر ویلسون. ذرات گسیل شده انرژیهای ۶.۵ MeV (از ^{212}Bi) و ۸.۷۸ MeV (از ^{212}Po) دارند.

یا

$$V = \frac{mv}{M}$$

هنگامی که مقدار V حاصل از معادله (۳.۴) را در معادله (۲.۴) قرار دهیم، خواهیم داشت

$$Q = \frac{1}{2} M \frac{m^2 v^2}{M^2} + \frac{1}{2} m v^2 \quad (۴.۴)$$

چنانچه انرژی جنبشی ذره آلفا، $\frac{1}{2} m v^2$ ، را با E نمایش دهیم، معادله (۴.۴) را می‌توانیم به صورت زیر بازنویسی کنیم

$$Q = E \left(\frac{m}{M} + 1 \right)$$

یا

$$E = \frac{Q}{1 + m/M} \quad (۵.۴)$$

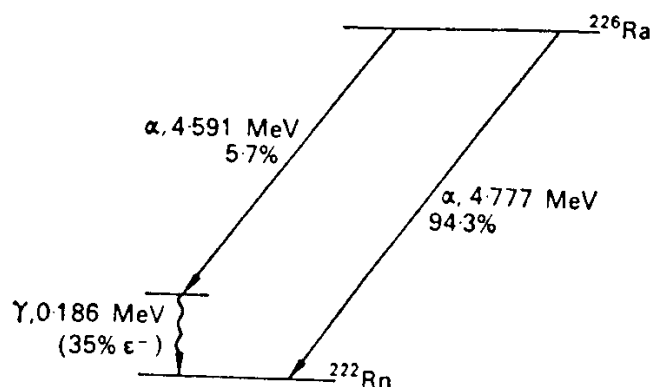
بنابراین معادله، انرژی جنبشی ذره آلفای حاصل از واپاشی ^{210}Po عبارت است از

$$E = \frac{5.4}{(1 + 4/206)} = 5.3 \text{ MeV}$$

بدین ترتیب، انرژی جنبشی هستهٔ پس‌زن برابر می‌شود با ۰.۵۱ MeV.

ذرات آلفا اصولاً تک‌انرژی‌اند. اما، طیف‌نگاشتهای ذرات آلفا گروههایی با انرژیهای گسسته را نشان می‌دهند که انرژی آنها اندکی با هم متفاوت است. این اختلافات کوچک را به اختلاف انرژی ترازهای دختر-هسته نسبت می‌دهند. این بدان معنی است که در گسیل ذرات آلفا از یک نوع ایزوتوپ، هسته‌ای که ذره آلفای با انرژی کم گسیل می‌کند در حالت برانگیخته و هسته‌ای که ذره آلفای پرانرژی گسیل می‌کند معمولاً در حالت «پایه» بر جای می‌ماند. هسته‌ای که در حالت برانگیخته بر جای می‌ماند، انرژی برانگیختگی‌اش را از طریق گسیل پرتو گاما از دست می‌دهد. باید یادآور شد که معمولاً اکثر ذرات آلفا با انرژی بیشینه گسیل می‌شوند. بدین ترتیب، فقط تعداد اندکی از هسته‌ها در حالات برانگیخته بر جای می‌مانند، و از این رو تنها بخش کوچکی از پرتوزایی گسیل ذرات آلفا با تابش گاما همراه است. رادیم را می‌توان به عنوان یک گسیلنده آلفا که طیف مرکبی دارد، نام برد. در اکثریت قابل ملاحظه‌ای از تبدیلهای ^{226}Ra ، یعنی در ۹۴.۳٪ از موارد، انرژی جنبشی ذرات آلفای گسیل شده برابر 4.777 MeV است. انرژی جنبشی فقط ۵.۷٪ بقیه ذرات آلفا برابر 4.591 MeV است. در این موارد که ذره آلفا با انرژی کمتر گسیل می‌شود، دختر-هسته در حالت برانگیخته بر جای می‌ماند و سپس با گسیل یک فوتون گاما که انرژی‌اش برابر با اختلاف انرژی دو ذره آلفا است ($4.777 - 4.591 = 0.186 \text{ MeV}$)، انرژی برانگیختگی خود را از دست می‌دهد. (در حدود ۳۵٪ از این فوتونهای پرتو گاما در تبدیل داخلی شرکت می‌کنند. بخش تبدیل داخلی در همین فصل را ببینید.) در میان طیفهای مرکب آلفا، طیف ^{226}Ra کمترین پیچیدگی را دارد. بیشتر گسیلنده‌های آلفا، چندگروه ذره آلفا و در نتیجه چند دسته پرتو گاما دارند. اما همه طیفهای آلفا، ارتباط سازگار و یکسانی را بین ترازهای انرژی مختلف هسته نشان می‌دهند.

توانایی نفوذ ذرات آلفا در ماده فوق‌العاده محدود است. ضخامت لایه خارجی و مرده پوست بدن انسان، برای جذب تمام ذرات آلفای حاصل از مواد پرتوزا کافی است. از این رو تابشهای آلفایی که منبع‌شان در خارج از بدن قرار داشته باشد، خطر تابشی ندارند. اما وقتی که ایزوتوپهای گسیلنده ذرات آلفا در نواحی داخلی بدن قرار می‌گیرند، دیگر لایه خارجی مرده پوست وجود ندارد که به عنوان حفاظ عمل کنند، و اتلاف انرژی تابش آلفا در همان بافتهای زنده صورت می‌گیرد. به این دلیل، و همچنین به دلایل دیگری که در فصل ۷ مورد بحث قرار خواهند گرفت، تابش آلفایی که از ایزوتوپهای پرتوزای داخل بدن اعضای داخلی را تحت پرتو دهی قرار می‌دهد شدیداً خطرناک به‌شمار می‌رود.



شکل ۳.۴ طرح واپاشی (تبدیل) رادیم ۲۲۶.

گسیل بتا

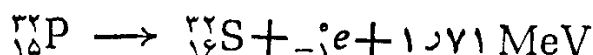
ذره بتا يك الكترون معمولی است كه از هسته يك اتم ناپایدار بتازا گسیل می‌شود. این ذره يك واحد بار الکتریکی منفی ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$) و جرم بسیار کوچکی (0.00055 amu) دارد. چون ملاحظات نظری ناقض وجود مستقل الكترون در هسته است، فرض می‌شود كه ذره بتا در لحظه گسیل شدنش از طریق تبدیل يك نوترون به يك پروتون، مطابق معادله زیر، تولید می‌شود



این تبدیل نشان می‌دهد كه واپاشی بتا در ایزوتوپهایی رخ می‌دهد كه فزونی نوترون دارند. گسیل بتا، از لحاظ انرژی، هنگامی ممكن می‌شود كه جرم هسته مادر بزرگتر از حاصل جمع جرمهای هسته دختر و ذره بتا باشد

$$M_p = M_d + M_e + Q \quad (7.4)$$

البته این شرط همانند شرط متناظر با گسیلنده‌های آلفاست. چون در واپاشی بتا يك بار منفی از دست می‌رود، و از آنجا كه جرم ذره بتا خیلی كوچكتر از 1 amu است، عدد اتمی دختر-هسته به اندازه يك واحد بزرگتر از مادر-هسته خواهد شد و عدد جرمی ثابت خواهد ماند. برای مثال، فسفر پرتوزا مطابق معادله زیر واپاشیده و به گوگرد پایدار تبدیل می‌شود



انرژی تبدیل در این مورد، 1.71 MeV ، همان انرژی معادل اختلاف جرم میان هسته ${}^{32}\text{P}$ و مجموعه هسته ${}^{32}\text{S}$ و ذره بتاست كه به صورت انرژی جنبشی ذره بتا درمی‌آید. اگر برای تکمیل معادله جرم-انرژی از جرم اتمهای خنثی استفاده شود، در این صورت نباید جرم الكترون را در سمت راست معادله (۷.۴) در نظر گرفت. زیرا در این حالت

جرم این الکترون هم به طور ضمنی در ساختار برون هسته ای ^{32}S منظور شده است. اختلاف جرم عبارت است از

$$3198403 = 3198224 + Q$$

$$Q = 0.00179 \text{ amu}$$

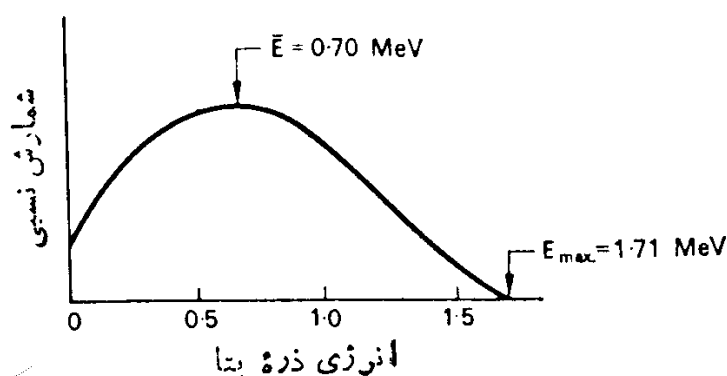
که انرژی معادل آن چنین می شود

$$0.00179 \text{ amu} \times 931 \frac{\text{MeV}}{\text{amu}} = 1.71 \text{ MeV}$$

با توجه به معادله (۵.۴) معلوم می شود که در مورد گسیل بتا، بخش فوق العاده کوچکی از انرژی واکنش صرف پس زنی هسته می شود. زیرا در این حالت، m/M که در آن m جرم ذره بتا و M جرم هسته دختر است، بسیار کوچک می شود. در مورد مثال بالا، داریم

$$\frac{m}{M} = \frac{0.00055}{32} = 0.000017$$

و مقدار Q در حدود 1.7000017 برابر انرژی جنبشی ذره بتا خواهد بود. بر اساس تحلیل بالا می توان انتظار داشت که تابش بتا هم، مانند ذرات آلفا، تک انرژی باشد. اما آزمایش این انتظار را تأیید نمی کند. در مقابل، آزمایش توزیع انرژی پیوسته ای از ذرات بتای گسیل شده را نشان می دهد که گستره آن از صفر تا مقدار انتظاری نظری ادامه دارد. (مقدار انتظاری از بررسی معادله جرم-انرژی در مورد خاص محاسبه می شود.) برای نمونه در مورد ^{32}P ، هر چند که انرژی بیشینه ذره بتا 1.71 MeV است، ولی همان طور که در شکل ۴.۴ دیده می شود، انرژی جنبشی اکثریت ذرات بتا خیلی از این مقدار کمتر است. انرژی متوسط یک ذره بتا در واپاشی ^{32}P برابر با 0.7 MeV یعنی در حدود ۴۱٪ انرژی بیشینه قابل انتظار است. به طور کلی، برای بسیاری از ایزوتوپهای بتازا، انرژی متوسط تابش بتا در حدود ۳۵ تا ۴۵ درصد انرژی بیشینه است.



شکل ۴.۴ طیف پرتو بتای فسفر ^{32}P .

هنگامی که انرژی یک گسیلنده بتا را مشخص می کنند، مقصود انرژی بیشینه است مگر اینکه چیز دیگری گفته شود.

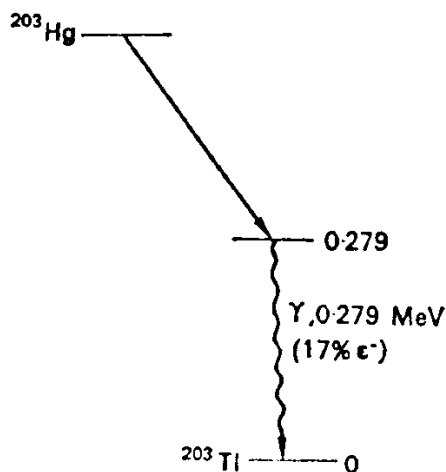
این واقعیت که تابش بتا با توزیع پیوسته ای از انرژی که بیشینه ای مشخص دارد گسیل می شود، ظاهراً ناقض قانون تثبیت شده پایستگی جرم-انرژی است. برای جلوگیری از نقض قانون پایستگی، چنین فرض شد که گسیل ذره بتا با ذره دیگری به نام نوترینو همراه است که انرژی اش برابر است با اختلاف بین انرژی جنبشی ذره بتا و انرژی بیشینه توزیع طیف. بنا بر فرض، نوترینو بار الکتریکی ندارد و جرمش بی نهایت کوچک است. به خاطر همین دو ویژگی است که آشکارسازی نوترینو بسیار دشوار است. اعتبار فرضیه نوترینو اخیراً به کمک آزمایش تأیید شده است. در این صورت، معادله (۶.۴) باید چنین اصلاح شود

$${}^1_0n \rightarrow {}^1_1H + {}^0_{-1}e + \nu \quad (۸.۴)$$

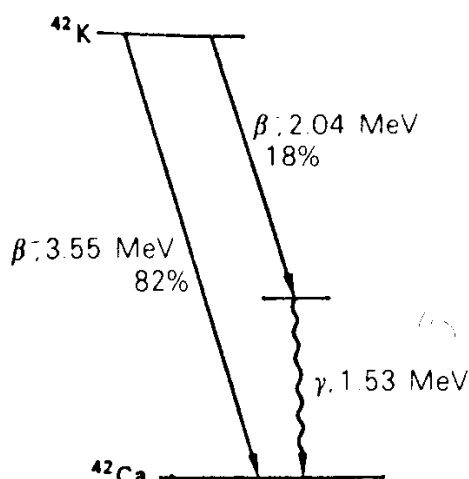
که در آن ν معرف نوترینو است.

فسفر ۳۲ نظیر چند گسیلنده دیگر بتا از جمله 3H ، ${}^{14}C$ ، ${}^{90}Sr$ و ${}^{90}Y$ ، هیچ پرتو گامایی گسیل نمی کند. این ایزوتوپها به گسیلنده های خالص بتا معروف اند. در مقابل این دسته از گسیلنده ها، گسیلنده های بتا-گاما قرار دارند. در این نوع واپاشی، بلافاصله پس از ذره بتا، یک پرتو گاما گسیل می شود. در اینجا، گسیل پرتو گاما را می توان درست همانند واپاشی آلفا توضیح داد. پس از گسیل ذره بتا، دختر-هسته ای که در حالتی برانگیخته بر جای می ماند، با گسیل پرتو گاما انرژی برانگیختگی خود را آزاد می کند. به عنوان یک نمونه می توانیم از جیوه ${}^{203}Hg$ نام ببریم. همان طور که در طرح تبدیل شکل ۵.۴ دیده می شود، این هسته یک ذره بتای ${}^{203}Tl$ و یک فوتون گامای ${}^{203}Hg$ ۲۷۹ MeV از خود گسیل می کند.

در هر دو مثال بالا (${}^{203}Hg$ و ${}^{22}P$)، گسیلنده ها طیفهایی ساده دارند، یعنی در هر طیف تنها یک گروه بتا وجود دارد. ایزوتوپهایی که طیفشان بیش از یک گروه متمایز پرتو بتا



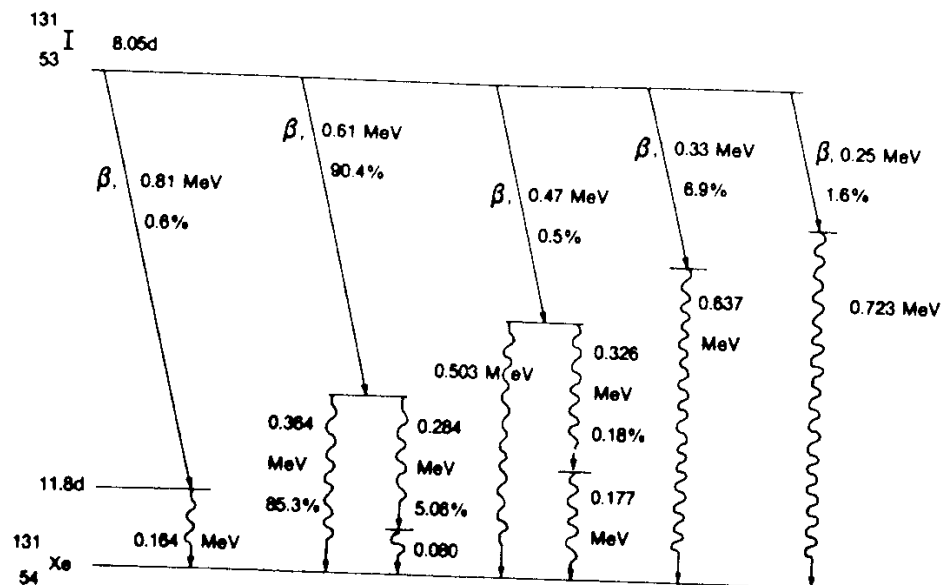
شکل ۵.۴ طرح واپاشی (تبدیل) ${}^{203}Hg$.



شکل ۶.۴ طرح واپاشی (تبدیل) پتاسیم ۴۲.

دارد، گسیلنده‌های مرکب بتا نامیده می‌شوند. برای مثال، پتاسیم ۴۲ در حدود ۸۲٪ از موارد تبدیل، با گسیل یک ذره بتا که متعلق به گروهی با بیشینه انرژی ۳٫۵۵ MeV است، واپاشیده می‌شود. این هسته در ۱۸٪ بقیه موارد، با گسیل یک ذره بتا با انرژی ۲٫۰۴ MeV واپاشیده می‌شود (شکل ۶.۴). اما در این مورد ^{42}Ca که در حالت برانگیخته است، بلافاصله یک فوتون پرتو گاما با انرژی ۱٫۵۳ MeV از خود گسیل می‌کند. ^{131}I یکی از ایزوتوپهای پرمصرف است که طیف بتا-گامای آن از ^{42}K هم پیچیده‌تر است. این ایزوتوپ با گسیل یک ذره بتا واپاشیده می‌شود و به صورت ^{131}Xe پایدار درمی‌آید. اما در ۸۵٪ از موارد تبدیل، ذره بتا متعلق به گروهی است که انرژی بیشینه در آن برابر ۶ MeV است، و باقیمانده ذرات بتا عضو گروهی هستند که بیشینه انرژی‌اش برابر ۳٫۱۵ MeV است. در هر دوی این حالتها، دختر-هسته زنون در حالت برانگیخته تشکیل می‌شود که از طریق گسیل تابش گاما انرژی برانگیختگی خود را از دست می‌دهد. انرژی فوتون گامایی که در پی گسیل ذره بتای گروه کم انرژی از دختر-هسته گسیل می‌شود، برابر ۶٫۳۸ MeV است. دختر-هسته‌ای که پس از گسیل ذره بتای ۶ MeV تشکیل می‌شود (هسته در تراز انرژی پایینتر)، انرژی برانگیختگی‌اش را از طریق دو گذار رقیب پرتو گاما آزاد می‌کند. در حدود ۹۳٪ از این هسته‌ها (متناظر با حدود ۷۹٪ از موارد تبدیل ^{131}I) پرتوهای گامای با انرژی ۳٫۶۴ MeV و بقیه هسته‌های برانگیخته دو فوتون گامای پیاپی با انرژیهای ۲٫۸۴ MeV و ۰٫۸۰ MeV گسیل می‌کنند. طرح واپاشی ^{131}I را در شکل ۷.۴ نشان داده‌ایم.

تابش بتا که بسته به مقدار انرژی‌اش می‌تواند تا اعماق گوناگون در بافتها نفوذ کند، یک نوع خطر تابشی خارجی به‌شمار می‌آید. البته میزان دقیق خطر، به ایزوتوپ گسیلنده بتا بستگی دارد، و در هر مورد باید جداگانه ارزیابی شود. اما به‌طور کلی، پرتوهای بتای با انرژی کمتر از ۲۰۰ keV که قابلیت نفوذ بسیار محدودی دارند، خطر تابشی خارجی محسوب نمی‌شوند (پرتوهای بتای ناشی از تریتم، ^3H و ^{14}C از این نوع‌اند). اما باید خاطر نشان کرد که در پی توقف ذرات بتا در مواد حفاظ، پرتوهای x بسیار نافذی

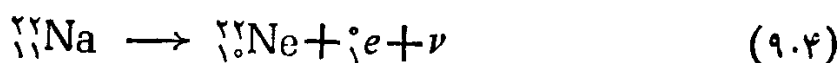


شکل ۷.۴ طرح واپاشی (تبدیل) ید ۱۳۱.

به نام تابش ذره‌ای (برمشترا الونگ) تولید می‌شوند. در فصل ۵، با تفصیل بیشتری از این برهم‌کنش سخن خواهیم گفت. تابش بتا می‌تواند از طریق تولید تابش ذره‌ای به یک خطر تابش خارجی تبدیل شود، مگر آنکه حفاظ‌گذاری با طراحی مناسب اجرا شده باشد و مراقبتهای مقتضی در آن معمول شود. هرایزوتوپ گسیلنده بتا را، هنگامی که بیشتر از مقدار مجاز وارد بدن شود، البته باید بالقوه خطرناک تلقی کرد.

گسیل پوزیترون

در مواردی که نسبت نوترون به پروتون خیلی پایین و گسیل آلفا هم به لحاظ انرژی غیرممکن باشد، احتمال دارد که هسته تحت شرایط خاصی با گسیل پوزیترون به پایداری برسد. پوزیترون یک ذره بتاست که بار الکتریکی مثبت دارد. این ذره از جهات دیگر همانند ذره بتای منفی یا الکترون معمولی است. جرم پوزیترون برابر 1.00054858 amu و بار آن برابر $+1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ است. چون هسته هنگام گسیل پوزیترون یک بار مثبت ازدست می‌دهد، عدد اتمی دختر-هسته به اندازه یک واحد از مادر-هسته کمتر است. اما عدد جرمی در این مورد، مانند تمام واپاشیهای الکترونی هسته‌ها، بدون تغییر می‌ماند. برای نمونه در مورد ^{22}Na داریم



در حالی که الکترون در طبیعت به طور آزاد یافت می‌شود، پوزیترون فقط به طور گذرا می‌تواند به صورت آزاد وجود داشته باشد. پوزیترونهای موجود در طبیعت فقط در اثر برهم‌کنش میان پرتوهای کیهانی و جو تولید می‌شوند، و در فاصله چند میکروثانیه پس از

تشکیل از بین می‌روند. چگونگی نابود شدن پوزیترون برای متخصص فیزیک بهداشت بسیار مهم و جالب توجه است. پوزیترون با یک الکترون ترکیب می‌شود و هر دو ذره با هم نابود می‌شوند. در نتیجه این فرایند، دو فوتون پرتو گاما به وجود می‌آیند که کل انرژی‌شان معادل جرم الکترون و پوزیترون است. در فصل ۵ از این فرایند به طور کاملتر سخن خواهیم گفت. تصور نمی‌رود که پوزیترون به طور مستقل در هسته وجود داشته باشد. به نظر می‌رسد که پوزیترون در اثر تبدیل یک پروتون به یک نوترون، طبق واکنش زیر، در هسته تولید می‌شود



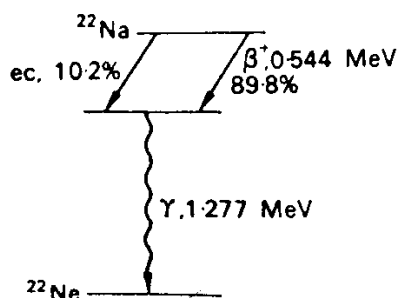
در گسیل پوزیترون، معادله پایستگی زیر باید برقرار باشد

$$M_p = M_d + M_e + Q \quad (11.4)$$

که در آن M_p ، M_d ، و M_e به ترتیب جرمهای مادر-هسته، دختر-هسته و پوزیترون، و Q جرم معادل انرژی واکنش است. چون عدد اتمی عنصر دختر یک واحد کمتر از عنصر مادر است، این عنصر بلافاصله پس از تبدیل هسته‌ای یک الکترون مداری‌اش را نیز از دست می‌دهد. پس، هنگامی که جرمهای اتمی به کار برده می‌شوند، معادله پایستگی به صورت زیر است

$$M'_p = M'_d + 2M_e + Q \quad (12.4)$$

سدیم ۲۲ که ایزوتوپی مفید در پژوهشهای زیست-پزشکی است، مطابق طرح واپاشی شکل ۸.۴، از طریق دوسازوکار رقیب گسیل پوزیترون و گیراندازی K (که در بخش بعدی مورد بحث قرار می‌گیرد) به ${}^{22}\text{Ne}$ تبدیل می‌شود. در ۸۹٫۸٪ موارد این تبدیل، پوزیترون گسیل می‌شود و این در حالی است که ۱۰٫۲٪ باقیمانده موارد را گیراندازی K به عنوان مد واپاشی رقیب به خود اختصاص می‌دهد. هر دو مد واپاشی به تولید ${}^{22}\text{Ne}$ در حالت برانگیخته منجر می‌شوند که انرژی برانگیختگی بلافاصله به صورت یک پرتو گامای 1.277 MeV از آن خارج می‌شود. جرم اتمی دقیق نئون را می‌توان به کمک معادله (۱۲.۴) و اطلاعات تبدیل پوزیترون محاسبه کرد



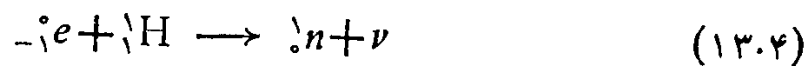
شکل ۸.۴ طرح واپاشی (تبدیل) سدیم ۲۲.

$$\begin{aligned}
 M(^{22}\text{Ne}) &= M(^{22}\text{Na}) - 2M_e - Q_m \\
 &= 22.9901404 - 2 \times 0.000548 - \frac{(0.544 + 1.277) \text{ MeV}}{931 \text{ MeV/amu}} \\
 &= 21.998352 \text{ amu}
 \end{aligned}$$

چون پوزیترون همانند الکترون است، خطر تابشی ناشی از خود پوزیترونها کاملاً مشابه با خطر ناشی از ذرات بتاست. اما پرتوهای گامای حاصل از نابودی پوزیترون باعث می‌شوند که تمام ایزوتوپهای گسیلنده پوزیترون را بالقوه خطر تابش خارجی تلقی کنیم.

گیراندازی الکترون مداری

معادله (۱۲.۴) نشان می‌دهد که در صورتی یک اتم کم-نوترون از طریق گسیل پوزیترون به پایداری می‌رسد که وزنش دستکم به اندازه جرم دو الکترون بیشتر از وزن عنصر دختر باشد. چنانچه این شرط برقرار نباشد، کمبود نوترون از طریق فرایندی به نام گیراندازی الکترون یا گیراندازی K برطرف می‌شود. در این تبدیل پرتوزا، هسته یکی از الکترونهای برون‌هسته‌ای را گیراندازی می‌کند، و از ترکیب آن با یک پروتون درون‌هسته‌ای طبق معادله زیر یک نوترون تشکیل می‌شود



چون الکترونهای پوسته K از هر پوسته دیگری به هسته نزدیکترند، احتمال اینکه الکترون مداری گیراندازی شده از پوسته K باشد خیلی بیشتر از پوسته‌های دیگر است. به همین دلیل نام دیگر این فرایند را گیراندازی K انتخاب کرده‌اند که متداولتر است. در مورد گیراندازی K ، مانند گسیل پوزیترون، عدد اتمی دختر-هسته یک واحد کمتر از مادر-هسته می‌شود، در حالی که عدد جرمی بدون تغییر می‌ماند. برقراری شرط پایداری انرژی در گیراندازی K نسبت به گسیل پوزیترون، با سهولت بیشتری امکان‌پذیر است. لازمه وقوع این فرایند این است که معادله پایداری زیر برقرار شود

$$M_p + M_e = M_d + \phi + Q \quad (14.4)$$

که در آن M_p و M_d جرمهای اتمی مادر و دختر، M_e جرم الکترون گیراندازی شده، ϕ انرژی بستگی الکترون گیراندازی شده، و Q انرژی واکنش است.

معادله (۱۴.۴) را به کمک مدگیراندازی K در تبدیل ${}^{22}\text{Na}$ می‌توان توضیح داد. انرژی بستگی، ϕ ، الکترون K در سدیم برابر با 108 keV است. بنابراین، انرژی واپاشی Q را می‌شود به صورت زیر به دست آورد

$$\begin{aligned}
 Q &= M(^{22}\text{Na}) + M_e - M(^{22}\text{Ne}) - \phi \\
 &= 22.9001204 + 0.000548 - 21.9988352 - \frac{0.000108 \text{ MeV}}{931 \text{ MeV/amu}} \\
 &= 0.003600 \text{ amu}
 \end{aligned}$$

که مقدار آن بر حسب MeV عبارت است از

$$\begin{aligned}
 Q &= 0.0036 \text{ amu} \times 931 \frac{\text{MeV}}{\text{amu}} \\
 &= 3.352 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

چون يك پرتو گامای با انرژی 1.277 MeV هم در این فرایند گسیل می شود، باقیمانده انرژی برابر است با $3.352 - 1.277 = 2.075 \text{ MeV}$. انرژی پس زنی در قبال فوتون پرتو گاما، بسیار اندك و قابل گذشت است. از این رو، باقیمانده انرژی باید نصیب نوترینو شود. هر چند که این مثال برای واکنش خاصی در نظر گرفته شده است، با وجود این توضیح مطلب در مورد تمام واکنشهای گیراندازی K صادق است. همیشه در قبال گیراندازی يك الكترون مداری، يك نوترینو گسیل می شود. بدین گونه دیده می شود که در تمام انواع واپاشیهای پرتو زای که شامل گیراندازی یا گسیل يك الكترون اند، برقراری شرط پایداری انرژی مستلزم گسیل يك نوترینو خواهد بود. اما، در اینجا به يك تمایز بارز باید توجه داشت: در واپاشی پوزیترون یا بتای معمولی، انرژی نوترینو برابر است با اختلاف میان انرژی جنبشی ذره در عمل و بیشینه انرژی جنبشی مشاهده شده، و به همین دلیل طیف انرژی نوترینو توزیعی پیوسته دارد. این در حالی است که نوترینوی حاصل از گیراندازی الكترون مداری، لزوماً يك انرژی خواهد بود.

هروقت که تبدیل اتمی از طریق گیراندازی الكترون مداری صورت می گیرد، از عنصر دختر که الكترونی از مدار بیرونی اش به تراز انرژی الكترون گیراندازی شده سقوط می کند يك پرتو X مشخصه گسیل خواهد شد. اینکه پرتوهای X لزوماً مشخصه عنصر دختر هستند ناشی از این واقعیت است که، فوتون پرتو X بعد از گیراندازی الكترون مداری توسط هسته و در پی تبدیل آن به دختر هسته، گسیل می شود. متخصص فیزیک بهداشت، هنگامی که دز جذبی تابش ناشی از ایزوتوپهایی را که از طریق گیراندازی الكترون واپاشیده می شوند محاسبه می کند، باید این پرتوهای مشخصه X کم-انرژی را نیز در نظر بگیرد.

پرتوهای گاما

پرتوهای گاما عبارتند از تابشهای الكترومغناطیسی يك انرژی که از هسته های برانگیخته

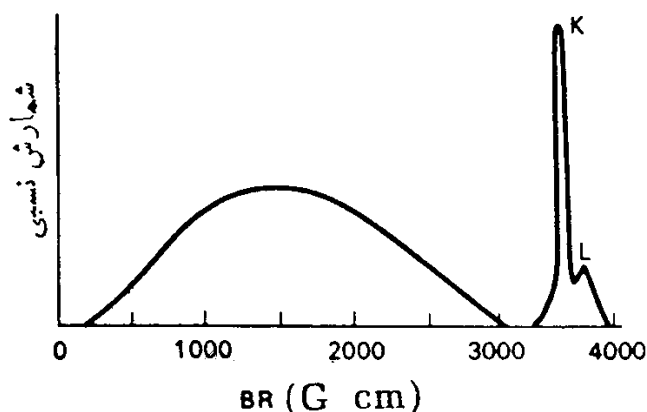
حاصل از تبدیل پرتوزا گسیل می‌شوند. گسیل این پرتوها خود سازوکاری است که توسط آن انرژی برانگیختگی هسته‌ها آزاد می‌شود. از آنجا که متخصص فیزیک بهداشت با تمام تابشهای گسیل شده از مواد پرتوزا سروکار دارد، و چون پرتو x از پرتوگاما تمایزناپذیر است، در ارزیابی خطرات تابش باید پرتوهای مشخصه x حاصل از ساختار برون‌هسته‌ای ایزوتوپها را نیز در نظر بگیرد. اما، به دلیل انرژی اندک پرتوهای مشخصه x ، عمدتاً در مواردی که ایزوتوپهای پرتوزا در داخل محیط قرار می‌گیرند حائز اهمیت می‌شوند. از نظر فیزیک بهداشت، پرتوهای گامای حاصل از پرتوهای متقابل پوزیترون و الکترون را نیز معمولاً همراه تابش گسیلنده‌های پوزیترون باید در نظر گرفت. برای مثال، هنگامی که خطرات تابشی ^{22}Na را بررسی می‌کنیم، لازم است که علاوه بر فوتون گامای 1022 MeV که در طرح واپاشی نموده می‌شود، دوفوتون ناشی از فرایند نابودی را نیز در نظر بگیریم. البته، فوتونهای اخیر در طرح واپاشی نشان داده نمی‌شوند. بنابراین، دستورالعمل کلی در فیزیک بهداشت این است که در تمام مسائل مربوط به حفاظها، دزسنجی، و ارزیابی خطرات تابش، گسیل پوزیترون را باید همراه با تابش گاما در نظر گرفت.

تبدیل داخلی

تبدیل داخلی سازوکار دیگری است که از طریق آن یک هسته برانگیخته گسیلنده گاما انرژی برانگیختگی خود را آزاد می‌کند. در این فرایند یک الکترون قویاً مقید در اتم، با هسته‌اش وارد برهم‌کنش می‌شود، انرژی برانگیختگی را از هسته می‌گیرد و خود از اتم به بیرون پرتاب می‌شود. الکترونهای تبدیل داخلی به صورت گروههای تک انرژی ظاهر می‌شوند. انرژی جنبشی الکترون حاصل از این فرایند، همواره برابر است با اختلاف انرژی فوتون گامای گسیل شونده و انرژی بستگی الکترون مقید در عنصر دختر. از آنجا که در عناصر با عدد اتمی بالا، ترازهای انرژی L هم الکترونهای قویاً مقید دارند، تبدیل داخلی در این گونه عناصر به گسیل دوگروه از الکترونها می‌انجامد که انرژی‌شان به اندازه اختلاف انرژی ترازهای K و L با هم متفاوت است. طبق این نتایج آزمایشی، می‌توان تبدیل داخلی را به مثابه یک اثر فوتوالکتریک داخلی تصور کرد، یعنی برهم‌کنشی که در آن فوتون گاما با یک الکترون قویاً مقید برخورد می‌کند و تمام انرژی‌اش را به الکترون منتقل می‌کند. بخشی از انرژی فوتون به صورت کار لازم برای غلبه بر انرژی بستگی الکترون درمی‌آید، و بخشی دیگر انرژی جنبشی الکترون را تشکیل می‌دهد. این نکته را با معادله ریاضی زیر می‌توان بیان کرد

$$E_{\gamma} = E_e + \phi \quad (15.4)$$

که در آن E_{γ} انرژی پرتوگاما، E_e انرژی جنبشی الکترون تبدیل داخلی، و ϕ انرژی بستگی الکترون است. از آنجا که الکترونهای تبدیل داخلی تک انرژی‌اند، درطیف پیوسته



شکل ۹.۴ طیف بتای سزیم ^{137}Cs که الکترونیهای تبدیل داخلی ترانزهای K و L را نشان می دهد.

ذرات بتای ناشی از ایزوتوپ به صورت طیفهای خطی نمایان می شوند. مثال جالب توجهی از تبدیل داخلی، در واپاشی ^{137}Cs دیده می شود. این ایزوتوپ در اثر گسیل بتا به حالت برانگیخته ای از ^{137}Ba تحول می یابد. سپس ^{137}Ba یک فوتون گامای با انرژی 661 MeV از خود گسیل می کند که در ۱۱٪ از موارد این گذار به تبدیل داخلی منجر می شود. ضریب تبدیل داخلی، α ، که به صورت نسبت تعداد الکترونیهای تبدیل به تعداد فوتونهای پرتو گاما تعریف می شود

$$\alpha = \frac{N_e}{N_\gamma} \quad (۱۶.۴)$$

در این مورد برابر ۱۱٪ است. الکترونیهای تبدیل داخلی که ظاهراً از ^{137}Cs ناشی می شوند، مطابق شکل ۹.۴، به صورت زائده ای روی طیف بتا نمایان می شوند. پس از انجام تبدیل داخلی، چون الکترونیهای مدار بیرونی جای خالی الکترونیهای ترانزهای عمیقتر را پر می کنند، پرتوهای x مشخصه گسیل می شود. این پرتوهای x مشخصه هم، به نوبه خود، ممکن است از طریق یک فرایند فوتوالکتریک داخلی در همان اتمی که خود از آن گسیل شده اند جذب شوند (یعنی فرایند دیگری که ماهیتش همان تبدیل داخلی است). الکترونیهای حاصل از این فرایند را الکترونیهای اوژه می نامند. انرژی جنبشی این الکترونها خیلی کم است.

سینماتیک تبدیل

نیمه عمر

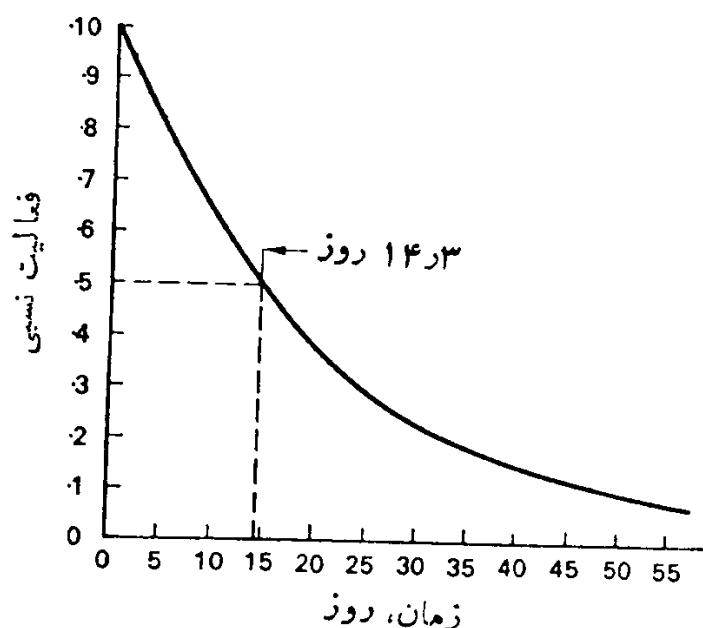
ایزوتوپهای گوناگون با آهنگهای متفاوتی واپاشیده می شوند، و هر ایزوتوپ آهنگ واپاشی

مشخصه‌ای دارد. برای مثال، چنانچه فعالیت (^{32}P اکتیویته) را در طی حدود ۳ ماه به طور روزانه اندازه گیری کنیم، و درصد این اندازه گیریها بر حسب فعالیت اولیه را به صورت تابعی از زمان رسم کنیم، منحنی شکل ۱۰.۴ به دست می آید. این منحنی نشان می دهد که نیمی از هسته های ^{32}P در مدت ۱۴٫۳ روز واپاشیده می شوند، نیمی از هسته های باقیمانده در مدت ۱۴٫۳ روز دیگر، و نیمی از آنچه بر جای می ماند در مدت ۱۴٫۳ روز بعدی تبدیل می شوند و همین طور تا به آخر.

اگر آزمایش مشابهی با استفاده از ایزوتوپ ^{131}I ترتیب دهیم، مشاهده خواهیم کرد که این ید با آهنگ سریعتری واپاشیده می شود. نیمی از ید بعد از ۸ روز ناپدید می شود، و پس از ۱۶ روز سه چهارم از فعالیت اولیه ناپدید می شود، و همین طور هفت هشتم هسته ها بعد از ۲۴ روز واپاشیده می شوند.

زمان لازم برای کاهش هر ایزوتوپ پرتوزا به یک دوم مقدار اولیه اش، معیاری از سرعت تبدیل آن ایزوتوپ پرتوزا به ایزوتوپی دیگر است. این دوره زمانی را نیمه عمر می نامند که از جمله مشخصه های هر ایزوتوپ پرتوزاست. هر ایزوتوپ پرتوزایی آهنگ تبدیل خاص خود را دارد، و هیچ عمل فیزیکی یا شیمیایی وجود ندارد که این آهنگ تبدیل را تغییر دهد. نیمه عمر یک ایزوتوپ پرتوزا، خاصیتی تغییرناپذیر از آن ایزوتوپ است. نیمه عمر ایزوتوپهای پرتوزای گوناگون از چند میکروثانیه تا چند میلیارد سال است. با توجه به تعریف نیمه عمر معلوم می شود که پس از گذشت n نیمه عمر از یک ایزوتوپ پرتوزا، کسر باقیمانده آن عبارت است از

$$\frac{A}{A_0} = \frac{1}{2^n} \quad (17.4)$$



شکل ۱۰.۴ کاهش فعالیت ^{32}P .

که در آن A_0 فعالیت اولیه، و A فعالیت بر جای مانده پس از n نیمه عمر است.

مثال ۱۰۴

کبالت ^{60}Co که یک ایزوتوپ پرتوزای گسیلنده گاما با نیمه عمر ۵٫۳ سال است، به عنوان چشمه تابش در دستگاههای پرتونگاری (رادیوگرافی) به کار می رود. به دلیل کاهش پرتوزایی چشمه با گذشت زمان، مدت زمان پرتودهی را برای هر پرتونگاشت (رادیوگراف) به طور سالانه افزایش می دهند. ضریب تصحیح زمان پرتودهی را برای جبران شدن کاهش قدرت چشمه به دست آورید.

حل: معادله (۱۷۰۴) را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد

$$\frac{A_0}{A} = 2^n$$

اگر از دو طرف این معادله لگاریتم بگیریم، داریم

$$\log \frac{A_0}{A} = n \log 2$$

که در آن n تعداد نیمه عمرهای ^{60}Co در طی یک سال برابر $n = (1/5.3) = 0.189$ می شود

$$\log \frac{A_0}{A} = 0.189 \times 0.301$$

$$\frac{A_0}{A} = \text{antilog } 0.0569$$

$$= 1.14$$

نسبت مقدار اولیه کبالت به مقدار باقیمانده پس از یک سال برابر ۱٫۱۴ است. از این رو، زمان پرتودهی پس از یک سال را باید به اندازه ۱۴٪ افزایش داد. باید توجه داشت که این نسبت مستقل از مقدار واقعی فعالیت در آغاز و پایان سال است. پس از سال دوم هم، نسبت کبالت موجود در آغاز سال دوم به مقدار آن در پایان سال برابر ۱٫۱۴ خواهد بود. بدین ترتیب، همان ضریب تصحیح ۱٫۱۴ را باید برای زمان پرتودهی هر سال نسبت به سال ماقبل به کار برد.

اگر اطلاعات مربوط به واپاشی هر ایزوتوپ را روی کاغذ نیم لگاریتمی رسم کنیم، به طوری که اندازه گیرهای مقدار فعالیت روی محور لگاریتمی و زمان روی محور خطی برده شود، منحنی تغییرات به صورت خطی راست نمایان می شود. چنانچه محور زمان

بر حسب یکای نیمه عمر مدرج شود، منحنی حاصل فواید زیادی در بردارد که نمونه ای از آن در شکل ۱۱۰۴ دیده می شود.

مثال تشریحی بالا را با استفاده از این منحنی هم می توانستیم حل کنیم. این منحنی نشان می دهد که در لحظه زمانی (نیمه عمر) $t = 0.189$ فعالیت باقیمانده در حدود ۸۷.۷٪ فعالیت اولیه است. بدین ترتیب، ضریب تصحیح عکس عدد ۸۷.۷ خواهد شد

$$\text{ضریب تصحیح} = \frac{1}{0.877} = 1.14$$

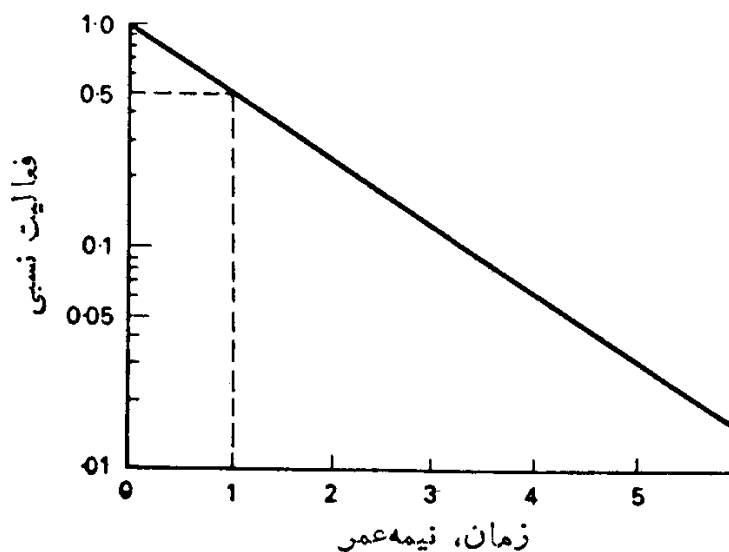
این واقعیت که نمودار فعالیت بر حسب زمان، هنگامی که روی کاغذ نیم لگاریتمی رسم می شود، به صورت خطی راست در می آید حاکی از آن است که مقدار فعالیت باقیمانده پس از هر فاصله زمانی از معادله زیر به دست می آید

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (18.4)$$

که در آن A_0 مقدار فعالیت اولیه، A مقدار فعالیت باقیمانده پس از زمان t ، λ ثابت واپاشی، و e پایه لگاریتم طبیعی است. ثابت واپاشی (ثابت تبدیل)، کاهش نسبی فعالیت در واحد زمان است و به صورت زیر تعریف می شود

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta N / N}{\Delta t} = -\lambda \quad (19.4)$$

که در آن N تعداد اتمهای پرتوزا، و ΔN تعداد اتمهای واپاشیده در فاصله زمانی Δt است. کسر $\Delta N / N$ کاهش نسبی تعداد اتمهای پرتوزا در فاصله زمانی Δt است. علامت منفی مقابل λ نشان می دهد که کمیت N در حال کاهش است. در مورد ایزوتوپهای پرتوزای



شکل ۱۱۰۴ نمودار نیم لگاریتمی کلی که کاهش مقدار فعالیت را در اثر تبدیل نشان می دهد.

کوتاه-عمر، λ را می‌توان با استفاده از شیب منحنی واپاشی تجربی تعیین کرد. در مورد ایزوتوپهای دراز-عمر، می‌توان ثابت واپاشی λ را با اندازه‌گیری N و سپس شمارش تعداد واپاشی در ثانیه، $\Delta N/\Delta t$ ، و سرانجام قرار دادن این مقادیر در معادله (۱۹.۴) به دست آورد.

مثال ۲.۴

آزمایش نشان می‌دهد که از یک میکروگرم رادیم در هر ثانیه تعداد 3.7×10^4 ذره آلفا گسیل می‌شود. اگر هر ذره آلفا نمایشگر واپاشی (یا تبدیل پرتوزای) یک هسته رادیم باشد، ثابت واپاشی رادیم چقدر است؟

حل: در این حالت، ΔN برابر 3.7×10^4 ، Δt برابر یک ثانیه، و N تعداد اتمهای رادیم در هر میکروگرم است که می‌شود آن را چنین محاسبه کرد

$$N = \frac{6.03 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{A \text{ g/mol}} \times W \text{ g} \quad (20.4)$$

که در آن A وزن اتمی و W وزن نمونه رادیم است

$$N = \frac{6.03 \times 10^{23} \times 10^{-6}}{226 \times 10^2} = 2.66 \times 10^{15} \text{ atom}$$

بنابراین، ثابت واپاشی به صورت زیر به دست می‌آید

$$\lambda = \frac{\Delta N/N}{\Delta t} = \frac{3.7 \times 10^4 \text{ atom} / 2.66 \times 10^{15} \text{ atom}}{1 \text{ s}} = 1.39 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

اگر یکای زمان را سال بگیریم، آهنگ تبدیل سالیانه چنین می‌شود

$$\begin{aligned} \lambda &= 1.39 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1} \times 8.76 \times 10^4 \frac{\text{s}}{\text{d}} \times 365 \times 10^2 \frac{\text{d}}{\text{y}} \\ &= 4.38 \times 10^{-4} \text{ y}^{-1} \end{aligned}$$

با استفاده از این مقدار λ ، و قرار دادن آن در معادله (۱۸.۴)، می‌توان مقدار رادیم برجای مانده را پس از هر دوره زمانی محاسبه کرد.

مثال ۳.۴

در طی یک دوره ۱۰۰۰ ساله، چند درصد از مقدار معینی رادیم واپاشیده خواهد شد؟
حل: کسر باقیمانده، پس از ۱۰۰۰ سال، عبارت است از

$$\frac{A}{A_0} = e^{-\lambda t} = e^{-4.38 \times 10^{-4} y - 1 \times 10^3 y} = e^{-0.438} = 0.645 = 64.5\%$$

بدین ترتیب، درصد واپاشیده در این دوره ۱۰۰۰ ساله چنین می‌شود

$$100 - 64.5 = 35.5\%$$

ارتباط کمی میان نیمه‌عمر T و ثابت واپاشی λ را می‌توان با استفاده از معادله (۱۸.۴) و قراردادن $A/A_0 = 1/2$ به دست آورد. البته، در این مورد $t = T$ می‌شود

$$\frac{A}{A_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$$

$$T = \frac{0.693}{\lambda} \quad (21.4)$$

مثال ۴.۴

با معلوم بودن ثابت واپاشی ^{226}Ra به صورت $\lambda = 4.38 \times 10^{-4} y^{-1}$ ، نیمه‌عمر رادیم را محاسبه کنید.

حل:

$$T = \frac{0.693}{\lambda}$$

$$= \frac{0.693}{4.38 \times 10^{-4} y^{-1}} = 1.58 \times 10^3 y$$

عمر میانگین

نیمه‌عمر ایزوتوپ، اگرچه یک مشخصه منحصر به فرد و تکرارپذیر آن ایزوتوپ است، ولی در عین حال یک خاصیت آماری است که تنها برای تعداد بسیار زیادی از اتمها مصداق دارد. (هر یک میکروگرم رادیم تعداد $10^{15} \times 2.79$ اتم دارد.) هر اتمی از یک ایزوتوپ پرتوزای خاص، در هر زمانی از لحظه صفر تا بی‌نهایت ممکن است واپاشیده و به ایزوتوپ دیگری تبدیل شود. در برخی از کاربردها، مانند دزسنجی ایزوتوپهای پرتوزای داخلی (که در فصل ۱، از آن سخن خواهیم گفت)، استفاده از عمر میانگین ایزوتوپ پرتوزا کار بررسی را آسان می‌کند. عمر میانگین به‌طور ساده به صورت حاصل تقسیم مجموع طول عمرهای فرد فرد اتمها بر تعداد کل اتمها تعریف می‌شود.

آهنگ واپاشی لحظه‌ای مقداری ایزوتوپ پرتوزا که شامل N اتم باشد، عبارت

است از λN . در فاصله زمانی میان t و $t + dt$ ، تعداد واپاشیها برابر $\lambda N dt$ می شود. اما هر اتمی که در این فاصله زمانی واپاشیده شود، دستکم طول عمری برابر با t داشته است. بنابراین، مجموع طول عمرهای همه اتمهایی که از لحظه $t = 0$ تا لحظات میان t و $t + dt$ دوام آورده اند، عبارت است از $t \lambda N dt$. عمر میانگین نمونه پرتوزا، τ ، چنین خواهد بود

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N dt \quad (22.4)$$

که در آن N_0 تعداد اتمهای پرتوزایی موجود در لحظه $t = 0$ است. چون می دانیم

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

خواهیم داشت

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt \quad (23.4)$$

هنگامی که از این عبارت به طریق جزء به جزء انتگرال بگیریم، عمر میانگین ایزوتوپ پرتوزا چنین به دست می آید

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (24.4)$$

اگر در معادله (22.4) به جای ثابت واپاشی، مقدار آن را بر حسب نیمه عمر ایزوتوپ پرتوزا قرار دهیم

$$\lambda = \frac{0.693}{T}$$

رابطه میان نیمه عمر و عمر میانگین، به صورت زیر به دست می آید

$$\tau = \frac{T}{0.693} = 1.44 T \quad (25.4)$$

فعالیت

بکرل

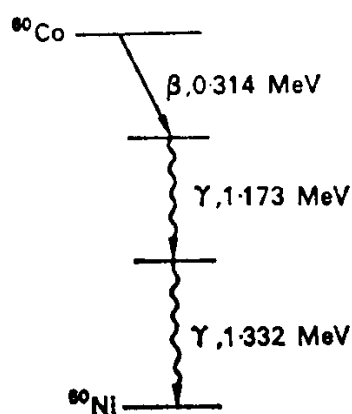
تعداد اتمهای موجود در هر گرم از اورانیم ^{238}U و عنصر دخترش، ^{234}Th ، تقریباً یکسان و برابر $10^{21} \times 2.5$ است. اما نیمه عمرهای این دو عنصر خیلی باهم متفاوت است. نیمه عمر

^{238}U برابر $10^9 \times 4.5$ سال است، درحالی که نیمه عمر ^{234}Th برابر ۲۴۱ روز (یا $10^{-2} \times 3.6 \times 10^6$ سال) است. بنابراین، سرعت واپاشی توریم ^{234}Th در حدود $10^{10} \times 6.8$ برابر سرعت تبدیل ^{238}U است. به عنوان نمونه دیگری از اختلاف زیاد در سرعت تبدیل، می توان به واپاشیهای ^{35}S و ^{32}P توجه کرد. نیمه عمرهای این دو نوع ایزوتوپ پرتوزا، که تعداد اتمهایشان در هر گرم تقریباً باهم مساوی است، به ترتیب برابر ۸۷ روز و ۱۴۳ روز است. بدین گونه، واپاشی فسفر پرتوزا ۶ بار سریعتر از واپاشی ^{35}S انجام می شود. هنگام کاربرد ایزوتوپهای پرتوزا، توجه اصلی معطوف به تابشهاست. از این رو، در نمونه های اخیر پرتوزایی ۱/۶ گرم از ^{32}P تقریباً معادل ۱ گرم ^{35}S خواهد بود، و همین طور فعالیت ۱۵ میکروگرم ^{234}Th تقریباً معادل ۱ گرم ^{238}U می شود. بنابراین، بدیهی است که یکای گرم در کارهای مربوط به پرتوزایی، یکای مناسب و مفیدی نیست. یکای مقدار پرتوزایی را برای اینکه مفید و با معنی باشد، باید بر پایه فعالیت تعریف کرد. این یکا را که بکرل نامیده می شود (و آن را با نماد Bq نمایش می دهند) چنین تعریف می کنیم:

بکرل، مقداری ماده پرتوزاست که در هر ثانیه یک اتم از آن واپاشیده می شود

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ tps} \quad (26.4)$$

در اینجا tps به معنی واپاشی (یا تبدیل) در ثانیه به کار رفته است. باید خاطر نشان کرد که اگرچه بکرل به صورت تعداد اتمهای واپاشیده در هر ثانیه تعریف می شود، ولی این یکا معیاری برای تعیین آهنگ واپاشی نیست. بکرل معیاری است که تنها برای تعیین مقدار ماده پرتوزا به کار می رود. عبارت «در هر ثانیه یک اتم واپاشیده می شود» که در تعریف بکرل به کار رفت، مترادف با تعداد ذرات گسیل شده از ایزوتوپ پرتوزا در هر ثانیه نیست. برای مثال، در مورد ایزوتوبی که فقط ذره بتا گسیل می کند (بتا - گسیل محض)، 1 Bq به گسیل یک ذره بتا در هر ثانیه منجر می شود. اما در مورد ایزوتوپ پرتوزای پیچیده تر، مانند ^{60}Co (شکل ۱۲.۴)، در هر واپاشی یک ذره بتا و دو فوتون گاما آزاد می شود؛ و از این رو، به ازای هر بکرل تعداد ۳ ذره تابشی در هر ثانیه خواهیم داشت. از سوی دیگر، در مورد ^{42}K (شکل ۶.۴)، ۲۰٪ از بتاهای گسیل شده بایک کوانتوم منفرد گاما همراه اند. بنابراین، تعداد



شکل ۱۲.۴ طرح واپاشی کبالت ۶۰.

کل گسیلها از ۱ بکرل ${}^{42}\text{K}$ برابر است با ۱۲ ذره در هر ثانیه. مقدار فعالیت متناظر با بکرل، در بسیاری از موارد، خیلی کوچک است و معمولاً از مضارب آن به صورت زیر استفاده می‌شود

$$1 \text{ kBq (کیلو بکرل)} = 10^3 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ MBq (مگا بکرل)} = 10^6 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ GBq (گیگا بکرل)} = 10^9 \text{ Bq}$$

$$1 \text{ TBq (ترا بکرل)} = 10^{12} \text{ Bq}$$

کوری

پیش از آنکه بکرل به عنوان یکای پرتوزایی در دستگاه SI پذیرفته شود، یکای دیگری برای این کمیت به کار می‌رفت که کودی نام دارد و نماد آن Ci است. کوری را که در ابتدا به صورت مقدار فعالیت ۱ گرم ${}^{226}\text{Ra}$ تعریف شده بود، به طور مستقیم می‌توان چنین تعریف کرد:

کوری، فعالیت مقداری از ماده پرتوزاست که در هر ثانیه تعداد 3.7×10^{10} اتم در آن واپاشیده می‌شوند.

رابطه میان کوری و بکرل چنین است

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (27.2)$$

هم در فیزیک بهداشت و هم در بسیاری از کاربردهای دیگر، مقدار فعالیت متناظر با کوری خیلی بزرگ است. بدین ترتیب از اجزای این یکا، به صورت زیر استفاده می‌شود

$$1 \text{ mCi (میلی کوری)} = 10^{-3} \text{ Ci}$$

$$1 \mu\text{Ci (میکرو کوری)} = 10^{-6} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ nCi (نانو کوری)} = 10^{-9} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ pCi (پیکو کوری)} = 10^{-12} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ fCi (فمتو کوری)} = 10^{-15} \text{ Ci}$$

فعالیت ویژه

توجه دارید که اگر چه بکرل (یا کوری) به عنوان یکای کمیت به کار می‌رود، ولی این

ی‌کا در بارهٔ جرم یا حجم مادهٔ پرتوزای با تعداد واپاشی معین چیزی نمی‌گوید. تراکم پرتوزایی یا ارتباط بین مقدار فعالیت و جرم مادهٔ پرتوزا را با فعالیت ویژه مشخص می‌کنند. فعالیت ویژه عبارت است از تعداد بکرل (یا کوری) در واحد جرم یا واحد حجم مادهٔ پرتوزا. فعالیت ویژه یک ایزوتوپ پرتوزای بدون حامل، یعنی ایزوتوپی که با انواع دیگر ایزوتوپها مخلوط نشده است، به ترتیب زیر محاسبه می‌شود:

اگر در یک مجموعهٔ N اتمی، ثابت واپاشی را بر حسب معکوس ثانیه با λ نشان دهیم، فعالیت بر حسب بکرل یا تعداد واپاشی در ثانیه به صورت λN خواهد بود. اگر وزن نمونهٔ مورد بررسی ۱ گرم باشد، تعداد اتمهای موجود در نمونهٔ پرتوزا طبق معادلهٔ (۲۰.۴) برابر است با

$$N = \frac{6.03 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{A \text{ g/mol}}$$

که در آن A وزن اتمی ایزوتوپ مورد بررسی است. بدین ترتیب، فعالیت ویژه یا فعالیت واحد وزن نمونه به صورت زیر به دست می‌آید

$$SA = \lambda N = \frac{\lambda \times 6.03 \times 10^{23}}{A} \text{ Bq/g} \quad (28.4)$$

این معادله، ارتباط بین فعالیت ویژه و وزن ایزوتوپ را به دست می‌دهد. اگر به جای λ مقدارش را با استفاده از معادلهٔ (۲۸.۴) بر حسب نیمه عمر قرار دهیم، خواهیم داشت

$$\lambda N = \frac{0.693}{T} \times \frac{6.03 \times 10^{23}}{A} \quad (29.4)$$

$$SA = \frac{4.18 \times 10^{23}}{A \times T} \text{ Bq/g}$$

توجه داشته باشید که معادلات (۲۸.۴) و (۲۹.۴) فقط هنگامی برقرار می‌شوند که λ و T بر حسب یکای ثانیه بیان شوند. با استفاده از این موضوع که در ۱ گرم ^{226}Ra در هر ثانیه 3.7×10^{10} واپاشی صورت می‌گیرد، می‌توان فرمولی آسانتر برای محاسبهٔ فعالیت ویژه به دست آورد. با توجه به این نکته، فعالیت ویژه ^{226}Ra برابر با 3.7×10^{10} بکرل در گرم است. نسبت فعالیت ویژه هر ایزوتوپ، SA_i ، به فعالیت ویژه ^{226}Ra عبارت است از

$$\frac{SA_i \text{ Bq/g}}{3.7 \times 10^{10} \text{ Bq/g}} = \frac{4.18 \times 10^{23} / A_i \times T_i}{4.18 \times 10^{23} / A_{\text{Ra}} \times T_{\text{Ra}}} \quad (30.4)$$

$$SA_i = 3.7 \times 10^{10} \frac{A_{\text{Ra}} \times T_{\text{Ra}}}{A_i \times T_i} \text{ Bq/g}$$

که در آن A_{Ra} وزن اتمی ^{226}Ra و برابر ۲۲۶ است، A_i وزن اتمی ایزوتوپ پرتوزای مورد بررسی است و T_{Ra} و T_i به ترتیب نیمه‌عمرهای رادیم و ایزوتوپ i هستند. تنها شرط برقراری معادله (۳۰.۴) این است که برای نیمه‌عمرها از یکایی یکسان استفاده شود. به همین ترتیب، فعالیت ویژه بر حسب Ci/g چنین به دست می‌آید

$$SA_i = \frac{A_{Ra} \times T_{Ra}}{A_i \times T_i} \quad (31.4)$$

مثال ۵.۴

فعالیت‌های ویژه ^{14}C و ^{35}S را با معلوم بودن نیمه‌عمرهایشان (۵۷۳۰ سال و ۸۷ روز) تعیین کنید.

حل: فعالیت ویژه کربن ۱۴ به صورت زیر به دست می‌آید

$$SA = 3.7 \times 10^{10} \times \frac{226 \times 1600 y}{14 \times 5730 y}$$

$$= 1.7 \times 10^{11} \text{ Bq/g} = 4.76 \text{ Ci/g}$$

و برای ^{35}S خواهیم داشت

$$SA = 3.7 \times 10^{10} \times \frac{226 \times 1600 y \times 365 \text{ d/y}}{35 \times 87 \text{ d}}$$

$$= 1.6 \times 10^{15} \text{ Bq/g} = 4.3 \times 10^4 \text{ Ci/g}$$

در اینجا، فعالیت‌های ویژه را برای ایزوتوپ‌های بدون حامل ^{14}C و ^{35}S محاسبه کردیم. در بسیاری از موارد، بویژه وقتی که از ایزوتوپ پرتوزا برای نشاندار کردن ترکیبات استفاده می‌شود، ایزوتوپ را نمی‌توان بدون حامل دانست. در این گونه موارد، ایزوتوپ پرتوزا فقط بخشی فوق‌العاده کوچک، چه از نظر وزنی و چه از نظر تعداد اتمها، از جسم نشاندار را تشکیل می‌دهد. در این صورت، معمولاً به طور مشخص از فعالیت ویژه یک عنصر یا ترکیب نشاندار سخن می‌گویند. به طور کلی، با توجه به مضمون مورد بحث می‌توان منظور از فعالیت ویژه را بدرستی دریافت.

مثال ۶.۴

فعالیت ویژه محلولی از $Hg(NO_3)_2$ که با ^{203}Hg نشاندار شده است، برابر $4 \mu\text{Ci/ml}$ ($1.5 \times 10^5 \text{ Bq/ml}$) است. اگر غلظت Hg در محلول برابر 5 mg/ml باشد،

(الف) فعالیت ویژه Hg چقدر است؟

(ب) چه کسری از Hg موجود در $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ از ایزوتوپ ^{203}Hg است؟
 (ج) فعالیت ویژه $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ چقدر است؟
 حل: (الف) فعالیت ویژه Hg عبارت است از

$$SA(\text{Hg}) = \frac{1.5 \times 10^5 \text{ Bq/ml}}{5 \text{ mg Hg/ml}} = 0.3 \times 10^5 \text{ Bq/mg Hg}$$

(ب) نسبت وزنی جیوه نشاندارشونده به صورت زیر است

$$\frac{SA(\text{Hg})}{SA(^{203}\text{Hg})}$$

فعالیت ویژه ^{203}Hg را می توان با استفاده از معادله (۳۰.۴) محاسبه کرد

$$SA(^{203}\text{Hg}) = 3.7 \times 10^{10} \times \frac{226 \times 1.6 \times 10^3 \text{ y} \times 3.65 \times 10^2 \text{ d/y}}{203 \times 46.5 \text{ d}}$$

$$= 5.2 \times 10^{14} \text{ Bq/g} = 1.4 \text{ Ci/g}$$

بنابراین، نسبت وزنی ^{203}Hg برابر است با

$$\frac{0.3 \times 10^5 \text{ Bq/g Hg}}{5.2 \times 10^{14} \text{ Bq/g } ^{203}\text{Hg}} = 5.8 \times 10^{-8} \frac{\text{g } ^{203}\text{Hg}}{\text{g Hg}}$$

(ج) چون کسر فوق العاده کوچکی از جیوه با ^{203}Hg نشاندار شده است، وزن مولکولی جسم نشاندار $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ را می توان برابر ۳۲۴٫۶۳ فرض کرد، همچنین غلظت $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ را می توان به صورت زیر به دست آورد

$$\frac{324.63 \text{ mg Hg}(\text{NO}_3)_2}{20061 \text{ mg Hg}} \times \frac{5 \text{ mg Hg}}{\text{ml}} = 8.1 \frac{\text{mg Hg}(\text{NO}_3)_2}{\text{ml}}$$

بنابراین، فعالیت ویژه $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ عبارت است از

$$\frac{1.5 \times 10^5 \text{ Bq/ml}}{8.1 \text{ mg Hg}(\text{NO}_3)_2/\text{ml}} = 1.9 \times 10^4 \text{ Bq/mg Hg}(\text{NO}_3)_2$$

$$= 0.5 \mu\text{Ci/mg Hg}(\text{NO}_3)_2$$

مثال ۷.۴

در آزمایشی که دستکم نیازمند فعالیت ویژه ای معادل 10^7 واپاشی در دقیقه در میلی لیتر است، آیا می توان از اتانول مطلق تجارتي که به کمک ^{14}C نشاندار شده است

($\text{CH}_3-\text{C}^*\text{H}_2-\text{OH}$) و فعالیت ویژه‌ای معادل 1 mCi/mol دارد، استفاده کرد؟ چگالی الکل برابر 0.789 g/cm^3 است.

حل: فعالیت ویژه ^{14}C ، با استفاده از معادله (۳۱.۴)، برابر 461 Ci/g به دست می‌آید. بنابراین، وزن نمونه‌ای از ^{14}C با فعالیت یک میلی کوری عبارت است از

$$\frac{10^{-3} \text{ Ci}}{461 \text{ Ci/g}} = 2.2 \times 10^{-4} \text{ g}$$

و تعداد اتمهای پرتوزای ^{14}C که در 22 mg نمونه وجود دارد، چنین می‌شود

$$\frac{6.03 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{14 \text{ g/mol}} \times 2.2 \times 10^{-4} \text{ g} = 9.3 \times 10^{18} \text{ اتم}$$

چون تعداد مولکولهای موجود در یک مول برابر عدد آووگادرو است، و هر مولکول نشاندار فقط یک اتم کربن ۱۴ در خود دارد، تعداد نسبی مولکولهای اتانول نشاندار عبارت است از

$$\frac{9.3 \times 10^{18}}{6.03 \times 10^{23}} = 1.5 \times 10^{-6} \quad (1.5 \text{ در میلیون})$$

بدین ترتیب، در تمام موارد عملی، هنگام محاسبه وزن مولکولی اتانول نشاندار می‌توان از افزایش وزن ناشی از کربن ۱۴ صرف‌نظر کرد؛ و در محاسبه فعالیت حاصل از هر سانتری متر مکعب الکل می‌شود از وزن مولکولی پذیرفته شده اتانول، 46.078 ، استفاده کرد

$$\begin{aligned} 1 \frac{\text{mCi}}{\text{mol}} \times \frac{1 \text{ mol}}{46.078 \text{ g}} \times 2.2 \times 10^9 \frac{\text{dis/min}}{\text{mCi}} \times 0.789 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \\ = 3.78 \times 10^7 \frac{\text{t/min}}{\text{cm}^3} \end{aligned}$$

بنابراین، در اینجا باید گفت که اتانول تجارتي قابل استفاده است.

پرتوزایی طبیعی

ماده پرتوزای طبیعی که بکرل در سال ۱۸۹۶ کشف کرد، آمیزه‌ای از چند نوع ایزوتوپ بود که ارتباط آنها با یکدیگر بعدها معلوم شد. این آمیزه را اعضای یک سری طولانی از ایزوتوپهای عناصر گوناگون تشکیل می‌داد که همه آنها پرتوزا بودند مگر آخرینشان.

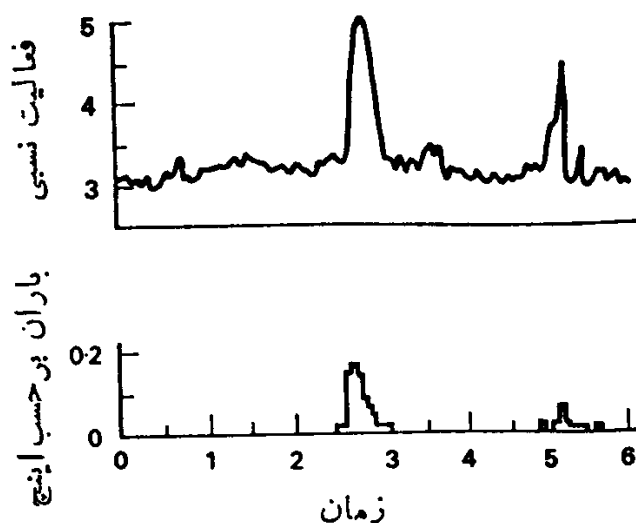
اورانیم که فراوانترین عنصر پرتوزا در این سری است، از سه ایزوتوپ مختلف تشکیل شده است، در حدود ۹۹٫۳٪ از اورانیم طبیعی را ^{238}U تشکیل می‌دهد، در حدود ۰٫۷٪ آن ^{235}U است، و بخش ناچیزی از آن هم (حدود $3 \times 10^{-5}\%$) ^{234}U است. ^{238}U و ^{234}U هر دو به یک خانواده که همان سری اورانیم است تعلق دارند، در حالی که ایزوتوپ ^{235}U اولین عضو از خانواده دیگر به نام خانواده اکتینیم است. فراوانترین ایزوتوپ پرتوزای طبیعی، ^{232}Th ، اولین عضو از زنجیره طویل دیگری از ایزوتوپهای پرتوزای متوالی است. تمام ایزوتوپهایی که عضو سری پرتوزا هستند، در بخش عناصر سنگین جدول تناوبی عناصر قرار دارند. پایینترین عدد اتمی در این گروه ۸۱، و پایینترین عدد جرمی ۲۰۷ است. سریهای پرتوزا همگی چند ویژگی مشترک دارند. نخستین ویژگی آنها این است که اولین عضو در هر سری خیلی دراز-عمر است، و نیمه عمرهایشان را می‌توان بر حسب یکاهای زمین‌شناختی بیان کرد. این نکته که اولین عضو هر خانواده می‌باید خیلی دراز-عمر باشد، قابل درک است. زیرا اگر گذشت زمان را از آغاز پیدایش جهان در نظر بگیریم، ایزوتوپهای نسبتاً کوتاه-عمر در خلال این چند میلیارد سالی که تصور می‌رود از پیدایش زمین می‌گذرد، واپاشیده و ناپدید شده‌اند. این موضوع به کمک یک سری مصنوعی ایزوتوپها که سری نپتونیم نامیده می‌شود، قابل توجیه است. در این مورد، اولین عضو خانواده عنصر فرااورانیم ^{241}Pu است که در آزمایشگاه از طریق بیماران نوترونی ^{239}Pu که در رآکتور تولید می‌شود، به دست می‌آید. اما، نیمه عمر ^{241}Pu فقط در حدود ۱۳ سال است. به علت همین نیمه عمر کوتاه است که حتی گذشت یک سده هم کافی است که بخش بزرگی از هسته‌های ^{241}Pu واپاشیده و ناپدید شوند. حتی دراز-عمرترین عضو این خانواده، ^{237}Np با نیمه عمر 2×10^6 سال، نیز آنقدر کوتاه-عمر است که اگر پیدایش آن را همزمان با دیگر عناصر زمین در نظر بگیریم، باز هم تاکنون نمی‌بایست دوام آورده باشد.

ویژگی مشترک دوم در این سه خانواده طبیعی این است که هر کدام یک عضو گازی شکل دارد، و اینکه گاز پرتوزا در هر مورد ایزوتوپ خاصی از عنصر رادون است. در مورد سری اورانیم، گاز تولید شده از نوع ^{222}Rn است که رادون نامیده می‌شود، و در حالی که در سری توریم این گاز از ^{220}Rn تشکیل می‌شود که آن را تورون می‌نامند، در سری اکتینیم گاز حاصل از نوع ^{218}Rn و به اکتینون موسوم است. باید توجه داشت که سری مصنوعی نپتونیم هیچ عضو گازی شکلی ندارد. وجود گازهای پرتوزا در این سه زنجیره، یکی از دلایل عمده وجود پرتوزایی طبیعی در محیط پیرامون ماست. گاز رادون از زمین متصاعد و در هوا پخش می‌شود؛ و دختره‌های پرتوزای رادون که در شرایط عادی جامدند، به غبارهای موجود در جو ملحق می‌شوند. پرتوزایی ناشی از این چشمه‌های جوی در نقاط مختلف زمین مختلف است، و به تراکمهای محلی اورانیم و توریم موجود در زمین بستگی دارد. اگر چه تراکم محتمل رادون موجود در جو از مرتبه $2 \times 10^{-6} \text{ Bq/ml}$ است، ولی تراکمهای $5 \times 10^{-11} \mu\text{Ci/ml}$ برابر بزرگتر هم غیر عادی نیست.

چون دخترهسته‌های پرتوزای رادون در سطح ذرات معلق در جو یافت می‌شوند، و از آنجا که ذرات معلق در هوا هم توسط باران به سطح زمین آورده می‌شوند، افزایش میزان تابش زمینه به‌هنگام بارندگیها امری منطقی است. این پدیده را در عمل هم مشاهده می‌کنیم، و لازم است که متخصصان فیزیک بهداشت و کسان دیگری که در پی تفسیر اطلاعات حاصل از دید بانیهای برنامه‌ریزی شده‌اند به آن توجه کنند. شکل ۱۳.۴ نتیجه فروریزی در اثر باران و منحنی فعالیت بتا و گاما را در طی بارندگی و هوای خشک (در ناحیه آپتون، نیویورک) نشان می‌دهد. اما هنگامی که سطح زمین پوشیده از برف است، به علت نقش پالایه‌ای پوشش برف در مقابل برون‌پخشی رادون و دخترهسته‌هایش، از پرتوزایی ناشی از ذرات معلق کاسته می‌شود. در مقابل، در مواقع وارونی دما، یعنی هنگامی که درهم آمیختن قوائم هوا و در نتیجه رقیق شدن رادون و دخترهسته‌هایش به‌طور موقت متوقف می‌شود، پرتوزایی محیطی افزایش می‌یابد. با توجه به این فعالیت طبیعی ذرات معلق در هوا، هنگام محاسبه تراکم مواد پرتوزای معلق در جو که از نمونه‌گیری گرد و غبار حاصل می‌شود، لازم است که ضرایب تصحیحی نیز در نظر گرفته شوند. از این گونه تصحیحات در فصل ۱۳ با تفصیل بیشتر سخن خواهیم گفت.

ویژگی مشترک سوم در این سه خانواده پرتوزای طبیعی این است که محصول پایانی همه آنها سرب است. عضو پایانی خانواده درمورد سری اورانیم عنصر پایدار ^{206}Pb است، در حالی که در سری اکتینیم عنصر پایانی ^{207}Pb ، و در سری توریم عنصر ^{208}Pb است. سری مصنوعی نپتونیم، در این ویژگی هم با سریهای طبیعی تفاوت دارد، و عضو پایانی آن عنصر پایدار ^{209}Bi است.

این چهار زنجیره پرتوزا را که سه خانواده آن طبیعی و خانواده نپتونیم در آن مصنوعی است، عموماً به صورت سریهای $4n$ ، $4n+1$ ، $4n+2$ و $4n+3$ نمایش می‌دهند. این شماره‌های هویت از تقسیم‌پذیری اعداد جرمی هر سری بر عدد ۴ حاصل می‌شوند.



شکل ۱۳.۴ باران، مواد پرتوزای جو را می‌شوید و با خود به زمین می‌آورد.

عدد جرمی نخستین عضو خانواده توریم، ^{232}Th ، دقیقاً بر ۴ تقسیم پذیر است. از آنجا که تمام فروپاشیهای این سری یا از طریق گسیل ذره آلفا یا جرم اتمی ۴ واحد و یا از طریق گسیل ذره بتا با جرم اتمی صفر انجام می‌شوند، جرمهای اتمی تمام اعضای خانواده توریم بر عدد ۴ قابل تقسیم خواهند بود. سری اورانیم که اولین عضو ^{238}U است، از ایزوتوپیهای تشکیل شده است که اعداد جرمی شان پس از تقسیم بر ۴، باقیمانده ۲ خواهند داشت $(\frac{238}{4} = 59 + \frac{2}{4})$. از این رو، این سری را سری $2n+2$ می‌نامند. سری اکتینیم که اولین عضو ^{235}U (آکتینو اورانیم) است، سری $2n+3$ نام دارد. سری «مفقود» که به‌طور مصنوعی تولید می‌شود، خانواده نپتونیم با اولین عضو ^{241}Pu است که سری $2n+1$ نامیده می‌شود.

ایزوتوپیهای پرتوزای موجود در طبیعت، منحصر به سریهای توریم، اورانیم، و اکتینیم نیست. در میان عناصر جدول تناوبی، چند عنصر با اعداد اتمی پایینتر هم دیده می‌شوند که ایزوتوپیهای پرتوزا دارند. مهمترین گسیلنده‌های طبیعی با اعداد اتمی پایین را در جدول ۵.۴ نشان داده‌ایم.

در میان این گونه ایزوتوپیهای پرتوزای طبیعی، به‌خاطر توزیع گسترده پتاسیم در محیط‌زندگیمان، ^{40}K مهمترین ایزوتوپ از نقطه نظر فیزیک بهداشت است (تراکم میانگین پتاسیم در سنگهای پوسته زمین در حدود 27 g/kg و در آب اقیانوسها در حدود 380 mg/l است. تراکم پتاسیم در گیاهان و جانوران نیز قابل ملاحظه است، از جمله تراکم میانگین آن در بدن انسان در حدود 17 g/kg است). در بسیاری از موارد، به‌منظور تشخیص میزان پرتوگیری انسان از محیط آلوده، باربدنی یا مقدار ایزوتوپیهای پرتوزای موجود در بدن را از طریق تجزیه پرتو-شیمیایی ادرار شخص مظنون برآورد می‌کنند. در این حال، پتاسیم که تراکم آن در ادرار در حدود 15 g/l است، ممکن است در کار تشخیص آلاینده مورد نظر دخالت کند مگر آنکه با روشهای ویژه‌ای پتاسیم را خارج کنند و یا اینکه فعالیت ^{40}K را هم به حساب آورند. لزوم در نظر گرفتن این فعالیت تداخل‌کننده را از طریق مقایسه فعالیت ^{40}K در ادرار با فعالیت ایزوتوپی که احتمالاً نشانگر بار بدنی قابل توجه است، به آسانی می‌توان نشان داد.

مثال ۸.۴

فعالیت ویژه ادرار نسبت به ^{40}K ، عبارت است از

$$\begin{aligned} \frac{\text{t/min}}{1} &= \frac{377 \times 10^1 \times 1600 \times 226}{173 \times 10^9 \times 40} \frac{\text{Bq}}{\text{g}^{40}\text{K}} \times 1719 \times 10^{-4} \frac{\text{g}^{40}\text{K}}{\text{gK}} \\ &\times \frac{15\text{ gK}}{1} \times 60 \frac{\text{t/min}}{\text{Bq}} = 278 \times 10^3 \frac{\text{dis/min}}{1} \end{aligned}$$

جدول ۱۰۴ سری توریم (۴n).

انرژی (MeV)			نیمه عمر	نوکلید
گاما (فوتون در هروا پاشی) ^۲	بتا	آلفا		
		۳۹۸	$1.39 \times 10^{10} y$	$^{232}_{90}Th$
	۰.۰۱		۶۷y	$^{228}_{88}Ra (MsTh)$
۱۵۹(n.v.)	طرح واپاشی پیچیده.		۶۱۳h	$^{228}_{89}Ac (MsTh)$
۰۹۶۶(۰.۲)	شدیدترین گروه بتا			
۰۹۰۸(۰.۲۵)	انرژی ۱۱۱ MeV دارد.			
۰۰۸۴(۰.۰۱۶)		۵۴۲۱	۱۹۱y	$^{228}_{90}Th (RdTh)$
۰۲۴۱(۰.۰۳۸)		۵۶۸۱	۳۶۴d	$^{224}_{88}Ra (ThX)$
۰۵۲۲(۰.۰۰۰۰۲)		۶۲۷۸	۵۲s	$^{216}_{86}Po (Tn)$
		۶۷۷۴	۰.۱۵۸s	$^{216}_{84}Po (ThA)$
۰۲۳۹(۰.۴۰)	۰.۵۹، ۰.۳۵		۱۰۶۴h	$^{212}_{82}Pb (ThB)$
۰.۰۴	$2.25 (\% 66.3)^3$	۶۰۸۶	۶۰.۵m	$^{212}_{83}Bi (ThC)$
(انشعاب ۰.۰۳۴)		$(\% 33.7)^3$		
		۸۷۷۶	$3.04 \times 10^{-7} s$	$^{212}_{84}Po (ThC')$
۲۶۱۵(۰.۹۹۷)	۱۵۲، ۱۲۹، ۱۸۰		۳۱m	$^{208}_{81}Tl (ThC'')$
			پایدار	$^{208}_{82}Pb (ThD)$

۱. فقط ذرات با بیشترین انرژی مشخص شده اند.

۲. فقط شدیدترین فوتونهای گاما در فهرست آمده اند.

۳. نسبت انشعاب را نشان می دهد. عدد داخل پرانتز، نشاندهنده درصد واپاشی به طریق مدم مشخص شده است.

جدول ۲.۴ سری نپتونیم $(2n+1)$.

انرژی (MeV)			نیمه عمر	نوکلید
گاما (فوتون در هر واپاشی) ^۲	بتا	آلفا		
۰.۰۶۰ (۰.۰۴) ۰.۳۱۴ (خیلی قوی) ۰.۰۰۹ (۰.۰۲) ۰.۰۵۶ (۰.۰۲) ۰.۰۴۲ (۰.۱۵)	۰.۰۲	۵.۴۹۶ ۴.۷۷	۱۳.۲y ۴۶۲y $۲.۲ \times 10^6 y$ ۲۷۲d $۱.۶۲ \times 10^5 y$	$^{241}_{94}\text{Pu}$ $^{241}_{95}\text{Am}$ $^{237}_{93}\text{Np}$ $^{233}_{91}\text{Pa}$ $^{233}_{92}\text{U}$
	۰.۳۲	۵.۰۲	$۷.۳۴ \times 10^3 y$ ۱۴۸d ۱۰۰d ۴۸m ۰.۰۱۸s	$^{229}_{90}\text{Th}$ $^{225}_{88}\text{Ra}$ $^{225}_{89}\text{Ac}$ $^{221}_{87}\text{Fr}$ $^{217}_{85}\text{At}$
		۵.۸۰ ۶.۳۰ ۷.۰۲	۴۷m ۴۷m $۴.۷ \times 10^{-6} s$	$^{213}_{83}\text{Bi}$ $^{213}_{84}\text{Po}$ $^{209}_{81}\text{Tl}$
		$۱.۳۹ (\% ۹۸)^۳$ ۸.۳۳۶	۲۲۳ ۳۳۲h پایدار	$^{209}_{82}\text{Pb}$ $^{209}_{83}\text{Bi}$
۰.۲۱۶ (۱) ۰.۱۲ (ضعیف) ^۴	۰.۳۲ ۰.۳۳ ۰.۶۳۵			

۱، ۲، ۳. پانوشت جدول ۱.۴.

۴. شدت به درستی مشخص نیست.

جدول ۳.۴ سری اورانیم ($2n+2$).

نوکلید	نیمه عمر	انرژی (MeV)		
		آلفا	بتا	گاما (فوتون در هر واپاشی)
^{238}U	$4.51 \times 10^9 \text{y}$	4.18		
$^{234}\text{Th}(\text{UX}_1)$	24.10d		0.103, 0.193	0.092 (0.04)
$^{234\text{m}}\text{Pa}(\text{UX}_2)$	1.175m		2.31	0.063 (0.03)
$^{234}\text{Pa}(\text{UZ})$	6.66h		0.5	1.0 (0.15)
$^{234}\text{U}(\text{UII})$	$2.48 \times 10^5 \text{y}$	4.763		0.076 (0.0063), I.T. زیاد اما ضعیف
$^{230}\text{Th}(\text{I}_0)$	$8.0 \times 10^4 \text{y}$	4.685		
^{226}Ra	1622y	4.777		
$^{226}\text{Em}(\text{Rn})$	3.825d	5.486		
$^{218}\text{Po}(\text{RaA})$	3.05m	5.998	انرژی معلوم نیست	
$^{218}\text{At}(\text{RaA}')$	2s	6.63	(0.0022) ³	0.068 (0.0059)
$^{218}\text{Em}(\text{RaA}'')$	0.019s	(0.999) ³	انرژی معلوم نیست	
$^{214}\text{Pb}(\text{RaB})$	26.8m	7.127	(0.01) ³	0.186 (0.030)
$^{214}\text{Bi}(\text{RaC})$	19.7m	5.505	0.65	
$^{214}\text{Po}(\text{RaC}')$	$1.64 \times 10^{-4} \text{s}$	(0.004) ³		0.352 (0.036)
$^{214}\text{Tl}(\text{RaC}'')$	1.32m	7.680		0.295 (0.020)
$^{214}\text{Pb}(\text{RaD})$	19.4y		3.7, 1.65	0.242 (0.007)
$^{214}\text{Bi}(\text{RaE})$	5.00d		(0.9996) ³	0.609 (0.295)
$^{214}\text{Po}(\text{RaF})$	138.40d	5.298		0.467 (0.045)
$^{214}\text{Pb}(\text{RaG})$	پایدار		1.96	0.802 (0.0000012)

جدول ۴.۴ سری اکتینیم ($4n+3$).

نوکلید	نیمه عمر	انرژی (MeV)		
		آلفا	بتا	گاما (فوتون در هر واپاشی) ^۲
$^{238}_{92}\text{U}$	$4.47 \times 10^9 \text{ y}$	4.27		0.07(0.18)
$^{234}_{90}\text{Th}(\text{UY})$	24.1 d		0.094, 0.302	0.07(0.22)
			0.216	0.04(0.085)
				0.061(0.16)
$^{234}_{91}\text{Pa}$	$1.17 \times 10^4 \text{ y}$	5.049		0.05(0.33)
				0.05(0.27)
				0.012(0.01)
$^{234}_{89}\text{Ac}$	2.8 y	$4.94(\pm 0.12)^3$	$0.455(\pm 0.018)^3$	
$^{234}_{90}\text{Th}(\text{RdA c})$	1.8 d	6.03		0.02(0.2)
				0.05(0.15)
$^{234}_{87}\text{Fr}(\text{AcK})$	21 m		1.15	0.05(0.40)
				0.08(0.24)
$^{234}_{88}\text{Ra}(\text{AcX})$	1.16 d	5.750		0.07(0.10)
				0.155(0.055)
$^{234}_{86}\text{Em}(\text{An})$	3.9 s	6.824		0.267(0.086)
$^{234}_{84}\text{Po}(\text{AcA})$	$1.83 \times 10^{-4} \text{ s}$	7.635		0.392(0.048)
$^{234}_{82}\text{Pb}(\text{AcB})$	36.1 m		0.5, 1.14	طیف پیچیده، 0.065 تا 0.829 MeV
$^{234}_{83}\text{Bi}(\text{AcC})$	2.16 m	6.619	انرژی معلوم نیست	
		$(\pm 0.032)^3$		0.35(0.14)
$^{234}_{84}\text{Po}(\text{AcC}')$	0.52 s	$(\pm 0.09968)^3$		0.88(0.005)
		7.434		0.56(0.005)
$^{234}_{81}\text{Tl}(\text{AcC}')$	4.78 m		1.27	0.87(0.005)
$^{234}_{82}\text{Pb}$	پایدار			

جدول ۵.۴ بعضی ایزوتوپهای پرتوزای طبیعی با اعداد اتمی پایین.

نوکلید	فراوانی ایزوتوپی (%)	نیمه عمر (سال)	تابشهای اصلی	
			ذرات	گاما
^{40}K	۰.۰۱۱۹	1.3×10^9	۱.۳۵ MeV	۱.۴۶ MeV
^{87}Rb	۲۷.۸۵	5×10^{10}	۰.۲۷۵ MeV	بدون گاما
^{138}La	۰.۰۸۹	1.1×10^{11}	۱.۰ MeV	۱.۴۳، ۰.۸۰ MeV
^{147}Sm	۱۵.۰۷	1.3×10^{11}	۲.۱۸ MeV	بدون گاما
^{176}Lu	۲.۶	3×10^{10}	۰.۴۳ MeV	۰.۳۱، ۰.۲۰ MeV
^{187}Re	۶۲.۹۳	5×10^{10}	۰.۰۴۳ MeV	بدون گاما

این نوع فعالیت شدید بنا که بیشتر از ۲۰۰ واپاشی در دقیقه در هر لیتر از ادرار است و به دنبال کار کردن با مخلوطی از محصولات شکافت پیش می آید، به عنوان نشانه ای از ورود محصولات شکافت به بدن تلقی می شود. این فعالیت کمتر از ۱۰٪ فعالیت مربوط به پتاسیم طبیعی است.

یکی دیگر از ایزوتوپهای پرتوزای طبیعی شایان توجه ^{14}C است. وجود این ایزوتوپ پرتوزا در محیط زندگی فعلی ممکن است شگفت آور به نظر رسد، زیرا نیمه عمر آن فقط ۵۶۰۰ سال است. این ایزوتوپ، در قیاس با ایزوتوپهای بسیار دراز-عمر جدول ۵.۴، «طبیعی» به شمار نمی رود. برخلاف آنچه در مورد ایزوتوپهای این جدول تصور می شود، پیدایش ^{14}C فقط به آغاز پیدایی منظومه شمسی محدود نمی شود، بلکه تولید آن هنوز هم ادامه دارد. این ایزوتوپ کربن در یک واکنش هسته ای و در اثر بمباران ^{14}N توسط پرتوهای کیهانی حاصل می شود. مقدار ^{14}C محیطی، پیش از ظهور بمبهای هسته ای در حدود $4.8 \times 10^{11} \text{ MBq}$ (13 MCi) در جو زمین، در حدود $1.5 \times 10^{11} \text{ MBq}$ (4 MCi) در گیاهان، و در حدود $9 \times 10^{12} \text{ MBq}$ (240 MCi) در آب اقیانوسها بود. باید خاطر نشان کرد که آزمایش سلاحهای هسته ای، مقدار کربن پرتوزای موجود در جو را به میزان قابل ملاحظه ای افزایش داده است. چنین برآورد شده است که از ۱۹۶۰ تا کنون (۱۹۸۳)، با آزمایش این سلاحها، در حدود $1.1 \times 10^{11} \text{ MBq}$ (3 MCi) کربن ^{14}C به تدریج وارد هوا شده است. کربن پرتوزای موجود در جو به صورت $^{14}\text{CO}_2$ دیده می شود. بدین ترتیب، جانوران از راه تنفس آن را وارد بدن می کنند، و گیاهان از طریق فرایند فوتوسنتز آن را به مصرف می رسانند. چون فقط گیاهان زنده ^{14}C را به همراه کربن ناپرتوزا در ساختمان

خود وارد می‌کنند، از طریق اندازه‌گیری فعالیت ویژه مربوط به کربن در مواد آلی می‌توان سن آنها را تعیین کرد. چنانچه فرض شود که آهنگ تولید ^{14}C و همچنین میزان تراکم آن در هوا، در طی دهها هزار سال گذشته ثابت مانده است، در این صورت با تصحیح ساده که با استفاده از نیمه‌عمر روی اطلاعات فعالیت ویژه انجام می‌شود، می‌توان برآوردی از سن نمونه‌های باستانی ماده آلی به دست داد.

مثال ۹.۴

هر گاه 2g کربن که از قطعه چوبی در معبدی باستانی به دست آمده است، فعالیتی معادل 10 واپاشی در دقیقه به ازای هر گرم نشان دهد، سن این قطعه چوب چقدر است؟ فرض می‌شود که فعالیت ویژه ^{14}C در کربن ثابت و برابر با مقدار فعلی آن (15 واپاشی در دقیقه در هر گرم) بوده است.

حل: کسری از ^{14}C اولیه که تا به امروز باقی مانده است، بنا بر معادله (18.4) ، عبارت است از

$$\frac{A}{A_0} = \frac{10}{15} = e^{-\lambda t}$$

چون نیمه‌عمر ^{14}C برابر 5730 سال است، داریم

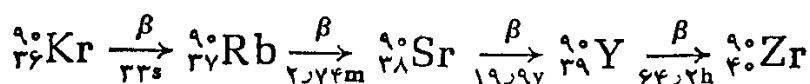
$$\lambda = \frac{0.693}{5730\text{y}} = 1.21 \times 10^{-4}\text{y}^{-1}$$

$$\frac{10}{15} = e^{-1.21 \times 10^{-4} t}$$

$$t = 335 \times 10^2\text{y}$$

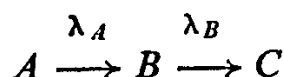
واپاشی زنجیری

علاوه بر چهار زنجیره ایزوتوپیهای پرتوزایی که در بالا شرح دادیم، گروههای دیگری از ایزوتوپیهای متوالیاً واپاشنده هم وجود دارند که از نظر متخصص فیزیک بهداشت و پرتو-زیست شناس حائز اهمیت اند. بیشتر این سریها به شکافت هسته‌ای مربوط می‌شوند، و اولین عضو هر سری يك شکافت-پاره است. برای نمونه، یکی از محصولات شناخته شده شکافت، ^{90}Sr ، عضو میانی يك سری پنج‌عضوی است که با ^{90}Kr شروع و، طبق زنجیره زیر، سرانجام به ^{90}Zr ختم می‌شود



ارتباط کمی میان‌اعضای مختلف این سری خیلی درخور توجه است، و هنگام بررسی

هر يك از اعضای گروه باید در نظر گرفته شود. به آسانی می توان فهمید که هر مقداری از ^{90}Kr ، در يك فاصله زمانی ۱۵-۱۰ min، تاحدی واپاشیده می شود که عملاً دیگر چیزی از این نوع هسته بر جای نمی ماند. دختر هسته ^{90}Kr یعنی رو بیدیم ۹۰ هم، به خاطر نیمه عمر کوتاه ۲۷۴ min، بعد از حدود يك ساعت به همان سر نوشت دچار می شود. بدین گونه می توان گفت که عملاً تمام هسته های ^{90}Kr ، در فاصله حدود يك ساعت پس از تشکیل، به ^{90}Sr تبدیل می شوند. بنا بر این، تولید و انباشت ^{90}Sr خیلی سریع انجام می شود. نیمه عمر ^{90}Sr در حدود ۲۵ سال است، و از این رو به کندی واپاشیده می شود. دختر هسته ^{90}Sr یعنی ^{90}Y ، با نیمه عمر ۶۴۲ ساعت، سریعاً به ^{90}Zr پایدار تبدیل می شود. اگر در ابتدای کار ^{90}Sr خالص تهیه شود، در اثر تبدیل پرتوزا انباشتی از ^{90}Y هم حاصل می شود. اما چون واپاشی ^{90}Y خیلی سریعتر از ^{90}Sr است، در طی این فرایندها به نقطه ای می رسیم که در آن مقدار لحظه ای تبدیل ^{90}Sr با مقدار واپاشی ^{90}Y مساوی می شود. در این شرایط گفته می شود که ^{90}Y به تعادل پایا رسیده است. در حالت کلی، ارتباط کمی بین ایزوتوپها را در تعادل پایا به ترتیب زیر به دست می آورند



که در آن نیمه عمر ایزوتوپ A خیلی بیشتر از ایزوتوپ B است. یعنی ثابت واپاشی عنصر A ، λ_A ، خیلی کوچکتر از ثابت واپاشی عنصر B ، λ_B ، است. ایزوتوپ C پایدار است و واپاشیده نمی شود. به علت نیمه عمر بسیار طولانی A در مقابل B ، آهنگ تشکیل B را می توان ثابت پنداشت و مساوی K گرفت. در این صورت، اگر تعداد اتمهای موجود ایزوتوپ B را پس از سپری شدن زمان t از تشکیل تعداد اولیه N_{B_0} با N_B نشان دهیم، آهنگ تغییر ایزوتوپ B چنین خواهد بود

آهنگ تبدیل - آهنگ تشکیل = آهنگ تغییر

$$\frac{dN_B}{dt} = K - \lambda_B N_B \quad (32.4)$$

یا

$$\int_{N_{B_0}}^{N_B} \frac{dN_B}{K - \lambda_B N_B} = \int_0^t dt \quad (33.4)$$

اگر دو طرف را در $-\lambda_B$ ضرب کنیم، انتگرال دست چپ به صورت زیر قابل محاسبه می شود

$$\int_a^b \frac{dv}{v} = \ln v \Big|_a^b \quad (34.4)$$

بنابراین، معادله (۳۳.۴) پس از انتگرال گیری چنین می شود

$$\ln \left(\frac{K - \lambda_B N_B}{K - \lambda_B N_{B_0}} \right) = -\lambda_B t \quad (35.4)$$

که آن را می شود به صورت نمایی باز نویسی کرد

$$\frac{K - \lambda_B N_B}{K - \lambda_B N_{B_0}} = e^{-\lambda_B t} \quad (36.4)$$

و تعداد ایزوتوپهای B را در لحظه t چنین به دست آورد

$$N_B = \frac{K}{\lambda_B} (1 - e^{-\lambda_B t}) + N_{B_0} e^{-\lambda_B t} \quad (37.4)$$

اگر در آغاز فقط عنصر A موجود باشد (یعنی اگر $N_{B_0} = 0$ باشد)، معادله (۳۷.۴) به صورت زیر درمی آید

$$N_B = \frac{K}{\lambda_B} (1 - e^{-\lambda_B t}) \quad (38.4)$$

آهنگ تشکیل B در اثر واپاشی A برابر است با آهنگ تبدیل A . بنا براین، داریم $K = \lambda_A N_A$. پس شکل دیگر معادله (۳۸.۴) به صورت زیر است

$$N_B = \frac{\lambda_A N_A}{\lambda_B} (1 - e^{-\lambda_B t}) \quad (39.4)$$

توجه کنید که مقدار هر دو ایزوتوپ مادر (A) و دختر (B) بر حسب یکای λN ، یعنی تعداد اتمهای واپاشنده در واحد زمان، به دست می آید. این نکته هم امری منطقی است، زیرا از تبدیل هر اتم مادر یک اتم دختر حاصل می شود. هر یکای دیگری که متضمن این واقعیت باشد، به همین ترتیب در معادله (۳۹.۴) به کار می رود. اگر λN نمایشگر تعداد اتمهای واپاشنده در هر ثانیه باشد، در این صورت از تقسیم دو طرف معادله بر عامل مناسب می توان فعالیت را بر حسب کوری، یا هر مضربی از آن به دست آورد، و بدین سان معادله (۳۹.۴) به شکلی قابل استفاده تر درمی آید. برای مثال، اگر فعالیت مادر به صورت بکرل یا میلی کوری در دست باشد، فعالیت دخترهسته را نیز باید به صورت بکرل یا میلی کوری بیان کرد، و معادله (۳۹.۴) را می توان چنین نوشت

$$Q_B = Q_A (1 - e^{-\lambda_B t}) \quad (40.4)$$

که در آن Q_B و Q_A به ترتیب فعالیتهای مادر و دختر بر حسب بکرل یا میلی کوری اند.

مثال ۱۰.۴

چنانچه ۵۰۰ mg رادیم در اختیار داشته باشیم، پس از گذشت ۱ روز، ۳۸۸ روز، ۱۰ روز، ۱۰۰ روز، چه مقدار رادون ۲۲۲ جمع آوری خواهیم کرد؟
 حل: چون فعالیت ویژه رادیم معادل ۱ کوری بر گرم یا $3.7 \times 10^{10} \text{ Bq/g}$ است، فعالیت ۵۰۰ mg معادل ۵۰۰ میلی کوری یا $1.85 \times 10^{10} \text{ Bq}$ خواهد بود. نیمه عمر رادون ۳۸۸ روز است، پس ثابت واپاشی آن چنین می شود

$$\lambda_{\text{Rn}} = \frac{0.693}{(T_{1/2})_{\text{Rn}}} = \frac{0.693}{388 \text{ d}}$$

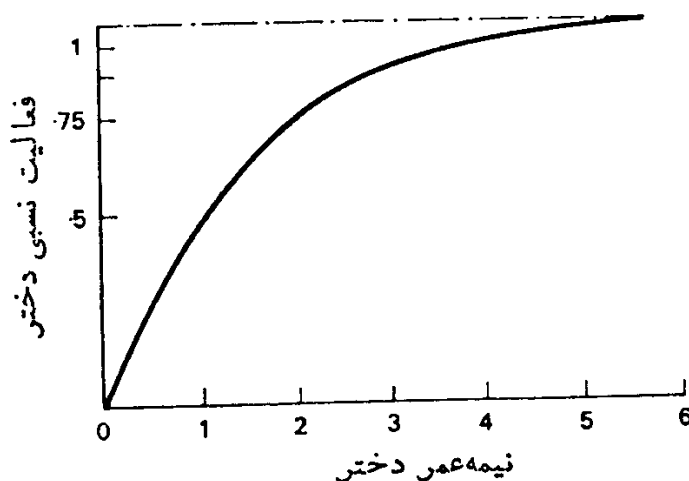
$$\lambda_{\text{Rn}} = 0.1825 \text{ d}^{-1}$$

با استفاده از معادله (۴۰.۴) می توان نوشت

$$Q_{\text{Rn}} = Q_{\text{Ra}}(1 - e^{-\lambda_{\text{Rn}} t})$$

$$Q_{\text{Rn}} = 1.85 \times 10^{10} \text{ Bq} (1 - e^{-0.1825 \text{ d}^{-1} \times t})$$

حال اگر زمانهای مورد نظر را بر حسب روز به جای t در این معادله بگذاریم، مقدار Rn پس از ۱ روز برابر 8385 mCi ($3.1 \times 10^9 \text{ Bq}$)، پس از ۳۸۸ روز برابر 250 mCi ($9.25 \times 10^9 \text{ Bq}$)، پس از ۱۰ روز برابر 4195 mCi ($1.55 \times 10^{10} \text{ Bq}$) و پس از ۱۰۰ روز برابر 500 mCi ($1.85 \times 10^{10} \text{ Bq}$) خواهد شد. معادله (۴۰.۴) و مثالی که در اینجا مطرح کردیم، به روشنی تولید و انباشت رادون را از مقدار صفر تا یک فعالیت بیشینه که همان فعالیت عنصر مادر است، نشان می دهد. این تولید و انباشت فعالیت دخترهسته را می توان با رسم معادله (۴۰.۴) نیز نشان داد. در شکل ۱۴.۴ یک منحنی کلی



شکل ۱۴.۴ تعادل پایا در تولید و انباشت دخترهسته بسیار کوتاه - عمر از مادر هسته دراز - عمر. فعالیت مادر ثابت می ماند.

تغییرات تولید و انباشت فعالیت دخترهسته برحسب نیمه‌عمر آن، در شرایط تعادل پایا، رسم شده است. با گذشت زمان، $e^{-\lambda t}$ کاهش می‌یابد و در نتیجه مقدار Q_B به Q_A نزدیک می‌شود. در موارد عملی، پس از گذشت γ نیمه‌عمر می‌توان فرض کرد که تعادل برقرار شده است. باید توجه داشت که در حالت تعادل، داریم

$$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B \quad (۲۱.۴)$$

این معادله نشان می‌دهد که در حالت تعادل، فعالیت مادر و دختر باهم برابر است، و نسبت ثابتهای واپاشی مادر به دختر برابر است با نسبت تراکمهای تعادلی دختر به مادر.

مثال ۱۱.۴

گاز رادون ناشی از ۱ گرم رادیم ۲۲۶، در شرایط تعادل پایا، فشاری جزئی معادل $4.8 \times 10^{-4} \text{ mm Hg}$ برمحفظه‌یک لیتری وارد می‌آورد. در صورتی که نیمه‌عمر رادون ۳.۸ روز باشد، ثابت واپاشی و نیمه‌عمر ^{226}Ra را به دست آورید. حل: مقدار رادون در حال تعادل با رادیم، چنین محاسبه می‌شود

$$\frac{\text{mol/l}}{4.8 \times 10^{-4} \text{ mm}} = \frac{1 \text{ mol/226}}{760 \text{ mm}}$$

$$= 2.88 \times 10^{-8} \text{ mol}$$

و تعداد اتمهای رادون عبارت است از

$$6.03 \times 10^{23} \frac{\text{atom}}{\text{mol}} \times 2.88 \times 10^{-8} \text{ mol} = 1.736 \times 10^{16} \text{ اتم}$$

این تعداد اتم رادون با ۱ g رادیم در حال تعادل است. تعداد مولهای رادیم عبارت است از

$$\frac{1 \text{ g}}{226 \text{ g/mol}} = 4.42 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

اکنون مقادیر معلوم را در معادله زیر قرار می‌دهیم

$$\lambda_{\text{Ra}} \times N_{\text{Ra}} = \lambda_{\text{Rn}} \times N_{\text{Rn}}$$

$$\lambda_{\text{Ra}} \times 4.42 \times 10^{-3} \text{ mol} = \frac{0.693}{3.8 \text{ d}} \times 2.88 \times 10^{-8} \text{ mol}$$

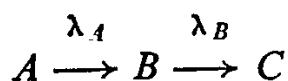
$$\lambda_{\text{Ra}} = 1.19 \times 10^{-6} \text{ d}^{-1}$$

$$= 4.35 \times 10^{-4} \text{ y}^{-1}$$

سرانجام، نیمه عمر را داریم را چنین به دست می آوریم

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{4.35 \times 10^{-4} \text{y}^{-1}} = 1600 \text{y}$$

در تعادل پایا که در بالا از آن سخن گفته شد، مقدار عنصر مادر در خلال آزمایش عملاً ثابت می ماند. از آنجا که شرط لازم برای تعادل پایا این است که نیمه عمر مادر خیلی طولانیتر از نیمه عمر دختر باشد، آشکارا معلوم است که تعادل پایا حالت خاصی از یک حالت کلیتر به شمار می رود که در آن برای نیمه عمر مادر هر مقداری قابل قبول است و هیچگونه محدودیتی بر مقادیر نسبی ثابتهای واپاشی مادر و دختر حاکم نیست. در حالت کلی، فعالیت عنصر مادر نسبتاً ثابت نخواهد بود و در تبدیل



آهنگ تغییر تعداد اتمهای B از معادله دیفرانسیل زیر به دست می آید

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_A - \lambda_B N_B \quad (42.4)$$

در این معادله، $\lambda_A N_A$ آهنگ تبدیل (واپاشی) نوع A است که دقیقاً با آهنگ تشکیل نوع B برابر می شود. آهنگ تبدیل ایزوتوپ B برابر است با $\lambda_B N_B$ ، و اختلاف بین این دو آهنگ در هر لحظه مساوی آهنگ رشد نوع B در آن لحظه خواهد شد. بنا بر معادله (۱۸.۴)، داریم

$$N_A = N_{A_0} e^{-\lambda_A t} \quad (43.4)$$

معادله (۴۲.۴)، پس از قرار دادن عبارت بالا به جای N_A و جابه جا کردن $\lambda_B N_B$ به صورت زیر در می آید

$$\frac{dN_B}{dt} + \lambda_B N_B = \lambda_A N_{A_0} e^{-\lambda_A t} \quad (44.4)$$

معادله (۴۴.۴)، یک معادله دیفرانسیل خطی مرتبه اول از نوع زیر است

$$\frac{dy}{dx} + P(x)y = Q(x) \quad (45.4)$$

که با ضرب کردن دو طرف معادله در عامل زیر، انتگرال پذیر می شود

$$e^{\int P dx} = e^{\int \lambda_B dt} = e^{\lambda_B t}$$

و جواب معادله (۴۵.۴) چنین است

$$ye^{\int P dx} = \int e^{\int P dx} \cdot Q dx \quad (۴۶.۴)$$

در اینجا چون y ، P ، و Q به ترتیب به جای λ_B ، N_B ، و $\lambda_A N_{A_0} e^{-\lambda_A t}$ در معادله (۴۴.۴) قرار گرفته اند، جواب این معادله به صورت زیر به دست می آید

$$N_B e^{\lambda_B t} = \int e^{\lambda_B t} \lambda_A N_{A_0} e^{-\lambda_A t} dt + C \quad (۴۷.۴)$$

یا اگر دو تابع نمایی را درهم ادغام کنیم، داریم

$$N_B e^{\lambda_B t} = \int \lambda_A N_{A_0} e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} dt + C \quad (۴۸.۴)$$

چنانچه تابع زیر انتگرال را در عامل $(\lambda_B - \lambda_A)$ ضرب کنیم، آنگاه معادله (۴۸.۴) به شکل زیر درمی آید

$$\int e^v dv = e^v + C \quad (۴۹.۴)$$

که جواب آن چنین است

$$N_B e^{\lambda_B t} = \frac{1}{\lambda_B - \lambda_A} \lambda_A N_{A_0} e^{(\lambda_B - \lambda_A)t} + C \quad (۵۰.۴)$$

ثابت C را می توان با استفاده از شرایط مرزی تعیین کرد: هنگامی که $t = 0$ باشد، $N_B = 0$ است و در نتیجه داریم

$$0 = \frac{1}{\lambda_B - \lambda_A} \cdot \lambda_A N_{A_0} + C$$

$$C = -\frac{\lambda_A N_{A_0}}{\lambda_B - \lambda_A} \quad (۵۱.۴)$$

حال اگر مقدار C حاصل از این معادله را در معادله (۵۰.۴) قرار دهیم، سرانجام جواب N_B را به صورت زیر به دست می آوریم

$$N_B = \frac{\lambda_A N_{A_0}}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (۵۲.۴)$$

در حالتی که نیمه عمر مادر به مراتب طولانیتر از دختر باشد، یعنی هنگامی که $\lambda_A \ll \lambda_B$ است، معادله (۵۲.۴) به طرف حالت حدی تعادل پایا که با معادله (۴۱.۴) توصیف می شود، میل خواهد کرد. در اینجا، دو مورد کلی دیگر را نیز باید در نظر گرفت: موردی که در آن

نیمه عمر مادر اندکی از دختر بیشتر است ($\lambda_A < \lambda_B$)، و مورد دیگری که در آن نیمه عمر مادر کمتر از دختر است ($\lambda_B < \lambda_A$)، در مورد اول که نیمه عمر دختر اندکی کوتاهتر از مادر است، چنانچه عنصر مادر در آغاز کاملاً خالص باشد، فعالیت دختر از صفر به یک مقدار بیشینه افزایش و سپس ظاهراً با همان نیمه عمر عنصر مادر کاهش خواهد یافت. هنگامی که چنین وضعی رخ می دهد، عنصر دختر با همان آهنگ تولیدش واپاشیده می شود که در این حالت می گویند این دو ایزوتوپ در حال تعادل گذرا هستند. ارتباط حاکم بر مقادیر مربوط به تعادل گذرا را می توان با استفاده از معادله (۵۲.۴) به دست آورد. اگر دوطرف این معادله را در λ_B ضرب کنیم، فعالیت دختر هسته ها چنین به دست می آید

$$\lambda_B N_B = \frac{\lambda_B \lambda_A N_{A_0}}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (53.4)$$

چون λ_B بزرگتر از λ_A است، پس از مدت زمانی که به قدر کافی طولانی باشد، مقدار $e^{-\lambda_A t}$ خیلی کوچکتر از $e^{-\lambda_B t}$ خواهد شد. در این صورت، معادله (۵۳.۴) را می توان چنین باز نویسی کرد

$$\lambda_B N_B = \frac{\lambda_B \lambda_A N_{A_0}}{\lambda_B - \lambda_A} e^{-\lambda_A t} \quad (54.4)$$

با استفاده از معادله (۴۳.۴)، بیان ریاضی تعادل گذرا را می توان از معادله (۵۴.۴) به صورت زیر در آورد

$$\lambda_B N_B = \frac{\lambda_B \lambda_A N_A}{\lambda_B - \lambda_A} \quad (55.4)$$

که اگر آن را بر حسب فعالیت (با یکاهای بکرل، کوری، وغیره) بنویسیم، حاصل می شود

$$Q_B = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} Q_A \quad (56.4)$$

یکی از نمونه های این نوع تعادل که از نظر فیزیک بهداشت حائز اهمیت است، زنجیره تبدیل ThB به ThC به ThC' و به ThC'' است که در مراحل پایانی سری توریم پدیدار می شود. در این سلسله تبدیلهای، ThB (^{212}Pb) با نیمه عمر 10.6 h از طریق گسیل بتا به ThC (^{212}Bi) با نیمه عمر 60.5 min واپاشیده می شود. واپاشی ^{212}Bi دو انشعاب دارد: در 35.4% از موارد پس از گسیل آلفا (^{208}Te) ThC'' تولید می شود، و در 64.6% باقیمانده تبدیل از طریق گسیل بتا انجام می شود که نتیجه آن تشکیل ThC' (^{212}Po) است. نیمه عمرهای ThC' و ThC'' بسیار کوتاه و به ترتیب برابر $3 \times 10^{-7}\text{ s}$ و 3.1 min است، و هر دو به عنصر پایدار ^{208}Pb واپاشیده می شوند. چون ThB یک نوع ایزوتوپ طبیعی موجود در جو است، قبل از اینکه اطلاعات مربوط به نمونه گیری هوا دقیقاً

تفسیر شود، لازم است که فعالیت این عنصر و دخترهسته‌اش در نمونه مورد تصحیح قرار گیرد. افزایش و کاهش ThC در شکل ۱۵.۴ نموده شده‌اند. این منحنی به‌طور ترسیمی برای واقعیت تأکید می‌کند که در تعادل گذرا، ظاهراً کاهش فعالیت دخترهسته و مادرهسته مشابه یکدیگر است.

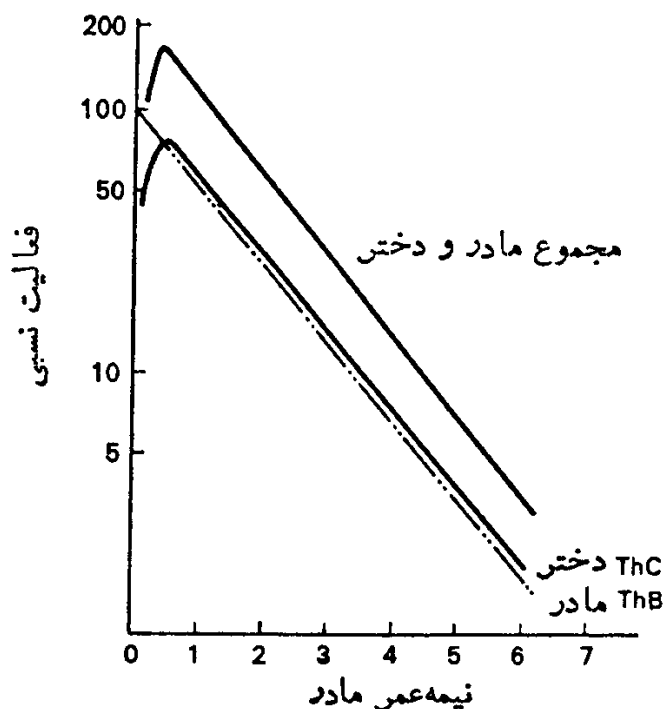
شکل ۱۵.۴ همچنین نشان می‌دهد که فعالیت دخترهسته کسه از صفر آغاز می‌شود، ابتدا به یک مقدار بیشینه می‌رسد و آنگاه شروع به کاهش می‌کند. علاوه بر این، به نظر می‌رسد که مجموع فعالیت‌های مادر و دختر هم به یک مقدار بیشینه می‌رسد که لحظه وقوع آن هم‌زمان با دخترهسته نیست. در مورد دخترهسته، زمان لازم برای رسیدن به فعالیت بیشینه رامی‌شود با مشتق‌گیری از معادله (۵۳.۴) و مساوی صفر گرفتن آن به دست آورد

$$\lambda_B N_B = \frac{\lambda_B \lambda_A N_{A_0}}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad [53.4]$$

$$\frac{d(\lambda_B N_B)}{dt} = \frac{\lambda_B \lambda_A N_{A_0}}{\lambda_B - \lambda_A} (-\lambda_A e^{-\lambda_A t} + \lambda_B e^{-\lambda_B t}) = 0$$

$$\lambda_A e^{-\lambda_A t} = \lambda_B e^{-\lambda_B t}$$

$$\frac{\lambda_B}{\lambda_A} = \frac{e^{-\lambda_A t}}{e^{-\lambda_B t}} = e^{(\lambda_B - \lambda_A)t}$$



شکل ۱۵.۴ تعادل گذرا: افزایش و کاهش ThC (۶۰۵min) که از واپاشی ThB (۱۰۶h) حاصل می‌شود.

$$\ln \frac{\lambda_B}{\lambda_A} = (\lambda_B - \lambda_A)t$$

$$t = t_{md} = \frac{\ln(\lambda_B/\lambda_A)}{\lambda_B - \lambda_A} = \frac{2.3 \log(\lambda_B/\lambda_A)}{\lambda_B - \lambda_A} \quad (57.4)$$

در مورد مثال شکل ۱۵.۴، داریم

$$\lambda_A = \frac{0.693}{10.6} = 0.065 \text{ h}^{-1}$$

و

$$\lambda_B = \frac{0.693}{10.1} = 0.0686 \text{ h}^{-1}$$

بدین ترتیب، زمانی که در آن فعالیت دخترهسته ThC به مقدار بیشینه می‌رسد، چنین به‌دست می‌آید

$$t_{md} = \frac{2.3 \log(0.0686/0.065)}{0.0686 - 0.065} = 378 \text{ h}$$

زمانی که در آن فعالیت کل به‌حداکثر می‌رسد، به‌همین طریق قابل تعیین است. در این مورد، مقدار فعالیت کل $A(t)$ باید بیشینه شود. فعالیت کل در هر لحظه از معادله زیر به‌دست می‌آید

$$A(t) = \lambda_A N_A + \lambda_B N_B \quad (58.4)$$

اگر در این معادله به‌جای N_A و N_B مقادیرشان را با استفاده از (۴۳.۴) و (۵۲.۴) قرار دهیم، داریم

$$A(t) = \lambda_A N_{A_0} e^{-\lambda_A t} + \frac{\lambda_B \lambda_A N_{A_0}}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (59.4)$$

و از مشتق‌گیری آن خواهیم داشت

$$\frac{dA(t)}{dt} = -\lambda_A N_{A_0} e^{-\lambda_A t} + \frac{\lambda_B \lambda_A N_{A_0}}{\lambda_B - \lambda_A} (-\lambda_A e^{-\lambda_A t} + \lambda_B e^{-\lambda_B t}) = 0 \quad (60.4)$$

این معادله را می‌توان به‌شکل زیر مرتب کرد

$$-\lambda_A N_{A_0} e^{-\lambda_A t} \left(1 + \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A}\right) + \frac{\lambda_A \lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} N_{A_0} e^{-\lambda_B t} = 0$$

و سرانجام، لحظه رسیدن به فعالیت کل بیشینه چنین به دست می آید

$$t = t_{mt} = \frac{1}{\lambda_B - \lambda_A} \ln \left(\frac{\lambda_B^2}{2\lambda_A\lambda_B - \lambda_A^2} \right) = \frac{2.3}{\lambda_B - \lambda_A} \log \left(\frac{\lambda_B^2}{2\lambda_A\lambda_B - \lambda_A^2} \right) \quad (61.4)$$

چنانچه به مثال شکل ۱۵.۴ بازگردیم، بیشینه فعالیت کل در زمان زیر به وقوع خواهد پیوست

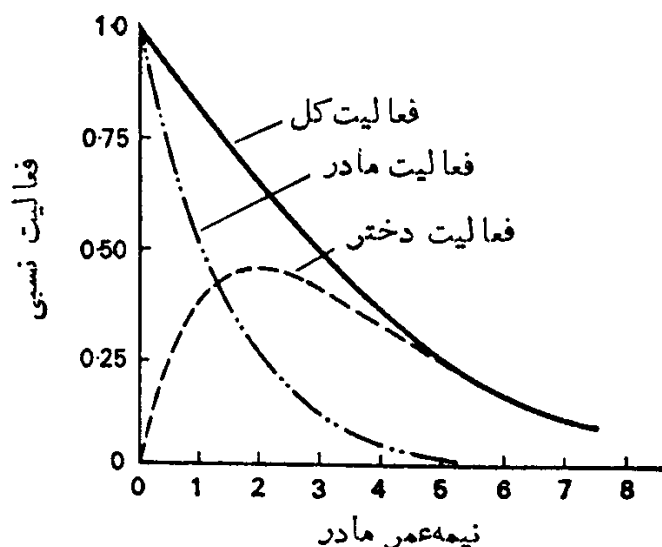
$$t_{mt} = \frac{2.3}{0.0686 - 0.065} \log \left(\frac{(0.0686)^2}{2 \times 0.065 \times 0.0686 - 0.065^2} \right) = 2.78 \text{ h}$$

یعنی ۲.۷۸ ساعت پس از تخلیص اولیه عنصر مادر، فعالیت کل به مقدار بیشینه اش می رسد. باید توجه داشت که بیشینه فعالیت کل زودتر از بیشینه فعالیت دختر هسته، فرا می رسد.

زمان به تعادل رسیدن ایزوتوپهای مادر و دختر، به نیمه عمرهای آن دو وابسته است. هرچه نیمه عمر دختر نسبت به مادر کوتاهتر باشد، رسیدن به تعادل زودتر صورت خواهد گرفت. در حالتی که نیمه عمر دختر بیشتر از مادر باشد، هیچگونه تعادلی نخواهیم داشت.

فعالیت دختر ابتدا به یک مقدار بیشینه می رسد که لحظه وقوع آن از معادله (۵۷.۴) قابل محاسبه است. سپس این فعالیت با آهنگ خاصی رو به کاهش می گذارد. در این فاصله، به علت نیمه عمر کوتاهتر مادر، واپاشی هسته های سریعتر صورت می گیرد. در این صورت، فعالیت کسل مقدار بیشینه نخواهد داشت، بلکه پیوسته در حال کاهش خواهد بود. معادله (۵۸.۴) که زمان بیشینه شدن فعالیت کل را پس از تخلیص عنصر مادر به دست می دهد،

در حالتی که نیمه عمر دختر بیشتر از مادر ($\lambda_B < \lambda_A$) باشد قابل استفاده نیست. همه این نکات در شکل ۱۶.۴ نموده شده اند. این شکل، تغییرات زمانی افزایش و کاهش ^{146}Pr با نیمه عمر 24.4 min را که در نتیجه واپاشی شکافت پاره ^{146}Ce با نیمه عمر 13.9 min



شکل ۱۶.۴ حالت بی تعادل: افزایش و کاهش ^{146}Pr (۲۴ min) حاصل از واپاشی ^{146}Ce (۱۳ min).

حاصل می شود، نشان می دهد. حل معادله (۵۷.۴) نشان می دهد که فعالیت ^{146}Pr در حدود 2602 min پس از تخلیص ^{146}Ce ، به مقدار بیشینه اش خواهد رسید.

مسائل

۰۱. کربن ۱۴ يك بتا گسیلنده خالص است که به ^{14}N واپاشیده می شود. در صورتی که جرم اتمی مادر و دختر، به ترتیب برابر 140007687 و 140007520 واحد جرم اتمی باشد، انرژی جنبشی پرتو یکتا را محاسبه کنید.

۰۲. اگر در يك آزمایش تشخیص پزشکی به مقدار $(27 \mu\text{Ci}) (27 \text{ MBq})$ از ایزوتوپ ^{131}I نیاز باشد و اگر بین زمان تولید و ارسال يد پرتوزا و زمان مصرف آن ۳ روز فاصله باشد، چند بکریل يد پرتوزا را باید از محل تولید به مقصد فرستاد؟ فعالیت يد ارسالی چند میکروکوری است؟

۰۳. تابش گامای حاصل از 1 ml محلول محتوی $(0.001 \mu\text{Ci}) (0.001 \text{ Bq})$ ایزوتوپ ^{198}Au و $(0.0005 \mu\text{Ci}) (0.0005 \text{ Bq})$ ایزوتوپ ^{131}I ، در طی مدت ۱۶ روز، به طور روزانه شمارش می شود. فرض کنید که بازده آشکارسازی شمارگر سوسوزن، برای تمام انرژیها، برابر ۱۰٪ باشد. آهنگ نسبی شمارش ^{131}I به ^{198}Au در زمانهای زیر چقدر خواهد شد: $t=0$ ، $t=3 \text{ d}$ ، $t=8 \text{ d}$ ، و $t=16 \text{ d}$. نمودار شمارش کل روزانه را روی کاغذ نیم لگاریتمی رسم کنید، و معادله منحنی آهنگ شمارش کل را بر حسب زمان بنویسید.

۰۴. ثابت واپاشی ^{235}U برابر $1.0 \times 10^{-10} \text{ y}^{-1}$ است. برای نمونه ای از ^{235}U به جرم 500 mg تعداد واپاشی را در هر ثانیه محاسبه کنید.

۰۵. برای يك چشمه یونشی مشخص، فعالیت ^{210}Po باید معادل دویست مگا بکریل (200 mCi) باشد. چند گرم ^{210}Po برای این منظور لازم است؟

۰۶. اگر نیمه عمر ^{137}Cs برابر ۳۰ سال باشد، چقدر طول می کشد که ۹۹٪ از نمونه ای از آن واپاشیده شود؟

۰۷. در مطالعات سرطان زایی، بنزوپیرین را با استفاده از ^3H با فعالیت ویژه $4 \times 10^{11} \text{ Bq/mmol}$ نشاندار می کنند. اگر در هر مولکول نشاندار فقط يك اتم تریتم وجود داشته باشد، درصد مولکولهای بنزوپیرین نشاندار چقدر است؟

۰۸. از 1 cm^3 گاز ^{222}Rn در دمای 27°C و فشار 100000 Pa ، چند ذره آلفا در هر دقیقه گسیل می شود؟

۰۹. اگر 4°K در هر واپاشی يك ذره بتا گسیل کند، تعداد ذرات بتای گسیل شده از ۱ کیلو گرم KCl در هر دقیقه چقدر است؟

۰۱۰. نیمه عمر يد ۱۲۵ که ایزوتوپی بسیار مورد استفاده در پزشکی هسته ای است، ۶۰ روز است. (الف) چقدر طول می کشد که فعالیت $(1 \mu\text{Ci}) (\sim 4 \text{ MBq})$ از آن به ۰.۱٪ فعالیت اولیه اش کاهش یابد؟ (ب) عمر میانگین ^{125}I چقدر است؟

۰۱۱. اگر سنگ معدن اورانیم حاوی ۱۰ درصد U_3O_8 باشد، چنانچه بازده فرایند

استخراج را ۹۰٪ بگیریم، برای تولید ۱ g رادیم به چند تن سنگ معدن نیاز است؟
۱۲. در ۱ تن سنگ معدن اورانیم که ۱۰ درصد U_3O_8 دارد، چقدر ^{234}U موجود است؟

۱۳. در سنگ معدن مذکور در مسائل ۱۱ و ۱۲، فعالیت ^{234}U را با فعالیتهای ^{235}U و ^{238}U مقایسه کنید.

۱۴. اگر فعالیت ویژه گوگرد برابر (100 Ci/g) 10^{12} Bq/g $37 \times$ باشد، افزایش دمای ۱۰۰ ml محلول کاملاً عایق پوش شده محتوی ۱ گرم $Na_2^{35}SO_4$ در طی مدت ۲۴ ساعت چقدر است؟

۱۵. تراکم میانگین پتاسیم در سنگهای پوسته زمین برابر 27 g/kg است. اگر ۱۲۰۵٪ از پتاسیم را ایزوتوپ ^{40}K تشکیل دهد، فعالیت ^{40}K در هر تن سنگ چقدر است؟
۱۶. محلولی از ^{203}Hg با مشخصات ساخت 1 MBq/ml ، در ساعت ۳ با مقدار اول بهمن ۱۳۶۹، به دستمان رسیده است. می خواهیم محلولی تهیه کنیم که فعالیت آن در اول اسفند ۱۳۶۹ برابر 1 MBq/ml باشد. ضریب رقیق سازی را پیدا کنید. نیمه عمر ^{203}Hg برابر ۴۶ d است.

۱۷. در آمیزه‌ای از دو ایزوتوپ پرتوزا، ۹۹٪ فعالیت مربوط به ^{24}Na و ۱٪ مربوط به ^{32}P است. در چه زمانی در آینده، این دو فعالیت با هم برابر خواهند شد؟
۱۸. ThB با آهنگ ۴٫۵٪ در هر ساعت واپاشیده و به ThC تبدیل می شود، و ThC با آهنگ ۱۵٫۱٪ در هر دقیقه واپاشیده می شود. چقدر طول می کشد که این دو ایزوتوپ به حالت تعادل برسند؟

۱۹. هنگامی که مقداری ^{90}Y با ۱۰ میلی گرم ^{90}Sr در تعادل باشد، وزن ^{90}Y چقدر است؟

۲۰. ۹۸٫۵٪ از سرب موجود در سنگ معدن را سرب پرتوزا تشکیل می دهد. اجزای ایزوتوپی سرب طبیعی عبارتند از: ۱٫۵ درصد ^{204}Pb ، ۲۳٫۶ درصد ^{206}Pb ، ۲۲٫۶ درصد ^{207}Pb ، و ۵۲٫۳ درصد ^{208}Pb . برای تولید ۹۸۵ mg سرب پرتوزا، چقدر اورانیم و توریم به طور کامل واپاشیده می شوند؟

۲۱. چه مدت پس از تخلیص ۱ kg ایزوتوپ ^{241}Pu ، فعالیت ^{241}Am در آن به مقدار بیشینه اش خواهد رسید؟

۲۲. چه مدت پس از تخلیص ^{146}Ce با نیمه عمر ۱۴ min، فعالیت ۲۴ دقیقه‌ای ^{146}Pr دختر در آن مساوی فعالیت مادر خواهد شد؟

۲۳. فعالیت ویژه ^{85}Kr ($T_{1/2} = 10.7 \text{ y}$) را در دمای $25^\circ C$ و فشار ۷۶۰ mmHg بر حسب Bq/m^3 و $\mu\text{Ci/Cm}^3$ حساب کنید.

۲۴. توان ویژه ^{35}S و ^{14}C را بر حسب یکاهای زیر حساب کنید:
(الف) وات بر مگا بکرل (W/MBq)،
(ب) وات بر کیلو گرم (W/kg).

۲۵. توان ویژه ${}^{90}\text{Sr}$ را بر حسب یکاهای زیر حساب کنید:

(الف) وات بر مگابکرل (W/MBq),

(ب) وات بر کیلوگرم (W/kg).

۲۶. از حجم اولیه ۱ لیتری گاز ${}^{41}\text{A}$ در دمای 0°C و فشار 760 mmHg ، در

مدت ۳h، چه مقدار انرژی بر حسب ژول آزاد می‌شود؟

۲۷. (الف) توان ویژه ${}^{41}\text{A}$ را بر حسب وات بر کیلوگرم حساب کنید.

(ب) توان ویژه ${}^{41}\text{A}$ ، ۴h پس از تخلیص آن در بطری، چقدر است؟

۲۸. چه حجمی از رادون ۲۲۲ (در 0°C و ۷۶۰ تور) با ۱g رادیم ۲۲۶ در

تعادل خواهد بود؟

۲۹. ۱۰۰ mg رادیم را به صورت RaBr_2 ($579 =$ گرانی ویژه) در کپسولی از

پلاتین که ابعاد داخلی اش به قطر ۲ mm و طول ۴ cm است، جای داده‌ایم. اگر کپسول

از ابتدا محتوی هوای 25°C در فشار جو باشد، فشار گاز درون کپسول پس از ۱۰۰ سال،

در دمای بدن انسان، چقدر خواهد شد؟

۳۰. مقداری گاز تریتیم به حجم 10 cm^3 ، در فشار و دمای متعارف، در هر ساعت

3.11×10^5 انرژی از دست می‌دهد.

(الف) فعالیت تریتیم چقدر است؟

(ب) اگر از هر واپاشی یک ذره بتا گسیل شود، انرژی متوسط پرتو بتا چقدر است؟

۳۱. باریم ${}^{140}\text{Ba}$ با نیمه عمر ۱۲۸ d به ${}^{140}\text{La}$ تبدیل می‌شود، و ${}^{140}\text{La}$ با نیمه عمر

۴۰۵ h به ${}^{140}\text{Ce}$ پایدار تبدیل می‌شود. پرتو-شیمیدانی، پس از رسوب دادن ${}^{140}\text{Ba}$ و

قبل از جداسازی ${}^{140}\text{La}$ از ${}^{140}\text{Ba}$ ، می‌خواهد آنقدر صبر کند که ${}^{140}\text{La}$ به حداکثر

مقدارش برسد. (الف) او چه مدت باید صبر کند؟ (ب) اگر او 27 mCi (1000 MBq) ${}^{140}\text{Ba}$

در اختیار داشته باشد، چند میکروگرم ${}^{140}\text{La}$ جمع آوری خواهد کرد؟

۳۲. قرار است در یک ماهواره از استرونیسم ۹۰ به عنوان چشمه گرمایی تولید

انرژی الکتریکی استفاده شود. (الف) اگر بازده تبدیل گرما به الکتریسیته ۳۰٪ باشد،

فعالیت استرونیسم لازم برای تولید توان الکتریکی ۵۰ وات چقدر خواهد بود؟

(ب) در طراحی این گونه منابع تغذیه الکتریکی، وزن ایزوتوپی چشمه تولید گرما عاملی

با اهمیت است. اگر بخواهیم که وزن در حداقل ممکن بماند، و اگر قرار باشد که چشمه

پس از ۱ سال کار بتواند ۵۰ وات انرژی تولید کند، آیا مزیتی خواهد داشت که از ${}^{210}\text{Po}$

استفاده شود؟

۳۳. کربن ۱۴ به طور طبیعی در اثر برهم کنش پرتوکیهانی بانیتروژن جو، از طریق

واکنش ${}^{14}\text{N}(n, p){}^{14}\text{C}$ ، با سرعتی حدود $1.4 \times 10^{15}\text{ Bq/y}$ تولید می‌شود. اگر

نیمه عمر ${}^{14}\text{C}$ برابر 5700 y باشد، موجودی جهانی ${}^{14}\text{C}$ در حالت پایا چقدر است؟

۳۴. کمیته علمی سازمان ملل متحد درباره اثرات تابش اتمی، میزان جهانی تولید

طبیعی تریتیم را که از طریق برهم کنش پرتوکیهانی با جو صورت می‌گیرد، در حدود

$34 \times 10^6\text{ Ci}$ ($1.26 \times 10^{18}\text{ Bq}$) برآورد کرده است. اگر نیمه عمر تریتیم برابر

برهم کنش پرتوها با ماده

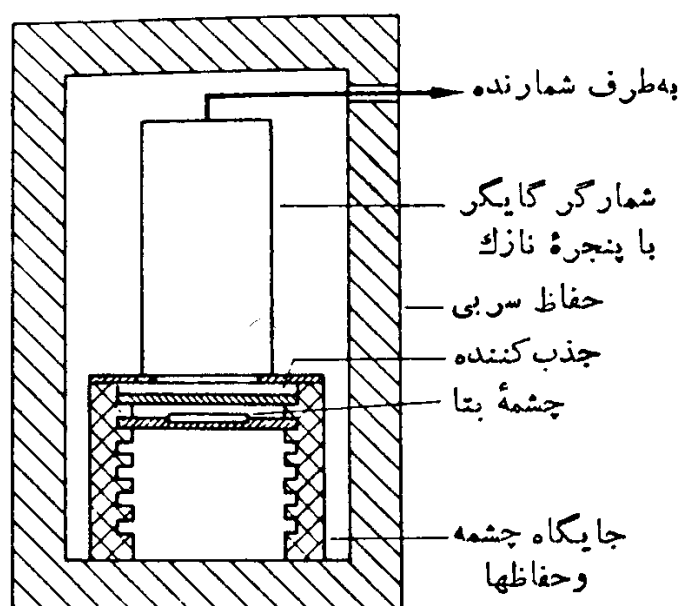
مقدمه

برای آنکه متخصص فیزیک بهداشت بتواند اساس فیزیکی و دزسنجی پرتوها و نظریه حفاظت در برابر تابشها را خوب درک کند، لازم است که به سازوکار برهم کنش پرتوهای گوناگون با ماده پی ببرد. در بسیاری موارد، این برهم کنشها متضمن انتقال انرژی از پرتوها به ماده تحت برهم کنش است. هر ماده ای از هسته ها و الکترونها تشکیل شده است. پرتو تابشی ممکن است با یکی از اجزاء یا با هر دو جزء سازنده ماده وارد برهم کنش شود. احتمال وقوع هر نوع برهم کنش، و در نتیجه قدرت نفوذ هر دسته از پرتوها، هم به نوع و انرژی پرتو و هم به ماهیت محیط جذب کننده بستگی دارد. در تمام موارد، برهم کنش پرتوها با اتمهای محیط منجر به برانگیختگی و یونش اتمها می شود. انرژی انتقال یافته به بافتها و یا به حفاظهای تابشی، سرانجام به صورت گرما تلف می شود.

پرتوهای بتا

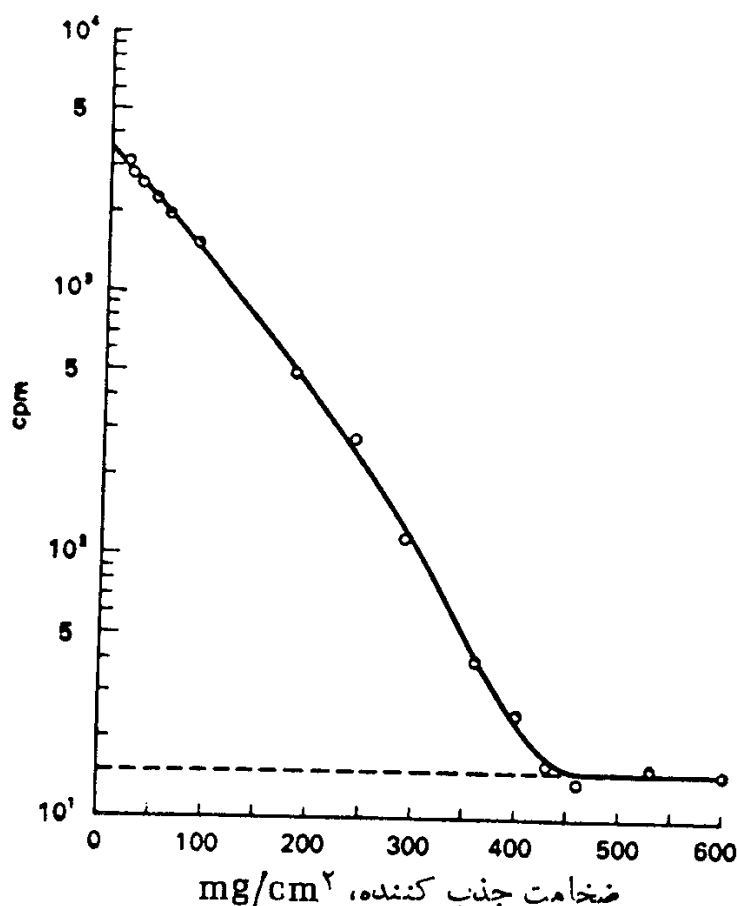
رابطه برد-انرژی

تضعیف پرتو بتا توسط هر ماده جاذب را می توان با قرارداد ضخامتهای مختلفی از ماده



شکل ۱۰۵ ترتیب آزمایش برای اندازه گیری جذب ذرات بتا.

در فاصله میان چشمه بتا و آشکارساز پرتو بتا (نظیر شمارگر گایگر) و شمارش تعداد ذرات بتای عبوری اندازه گیری کرد (شکل ۱۰۵). هنگامی که چنین آزمایشی را با استفاده از گسیلنده خالص بتا انجام می دهیم، معلوم می شود که در آغاز با افزایش ضخامت جذب کننده، آهنگ شمارش بتا سریعاً کاهش می یابد و سپس میزان کاهش کندتر می شود. سرانجام به ضخامتی از جذب کننده می رسیم که تمام ذرات بتا را متوقف می کند، و از آن پس شمارگر گایگر فقط شمارش زمینه ناشی از تابش محیط را ثبت می کند. اگر اطلاعات حاصل را روی کاغذ نیم لگاریتمی رسم کنیم، به طوری که آهنگ شمارش روی محور لگاریتمی و ضخامت جذب کننده روی محور خطی برده شود، منحنی تغییرات شمارش مطابق شکل ۲۰۵ تقریباً به صورت خطی راست درمی آید. نقطه انتهایی منحنی جذب، جایی که از آن پس دیگر هیچ کاهشی در آهنگ شمارش دیده نشود، نشان دهنده برد پرتو بتا در ماده ای است که جذب کننده از جنس آن ساخته شده است. بایک برآورد تقریبی می توان گفت که نیم ضخامت جذب کننده (یعنی ضخامتی از جذب کننده که نیمی از ذرات چشمه را متوقف می کند) تقریباً معادل یک هشتم برد پرتو بتا است. از آنجا که انرژی بیشینه ذرات حاصل از ایزوتوپهای گوناگون معلوم است، با اندازه گیری برد پرتو بتا در جذب کننده های مختلف می توان رابطه بین برد و انرژی را مطابق شکل ۳۰۵ به دست آورد. با بررسی شکل ۳۰۵ معلوم می شود که وقتی چگالی ماده جذب کننده افزایش می یابد، به ازای هر انرژی مشخصی از پرتو بتا، ضخامت مورد لزوم جذب کننده کاهش خواهد یافت. تحلیل تفصیلی اطلاعات تجربی نشان می دهد که قدرت جذب انرژی پرتو بتا، عمدتاً به تعداد الکترونهاي ماده جذب کننده موجود در مسیر پرتو، یعنی چگالی سطحی الکترونهاي جاذب (یا الکترونهاي موجود در هر سانتی متر مربع ماده جاذب) و همچنین تا حد خیلی کمتری به عدد اتمی ماده جاذب بستگی دارد. بدین ترتیب،



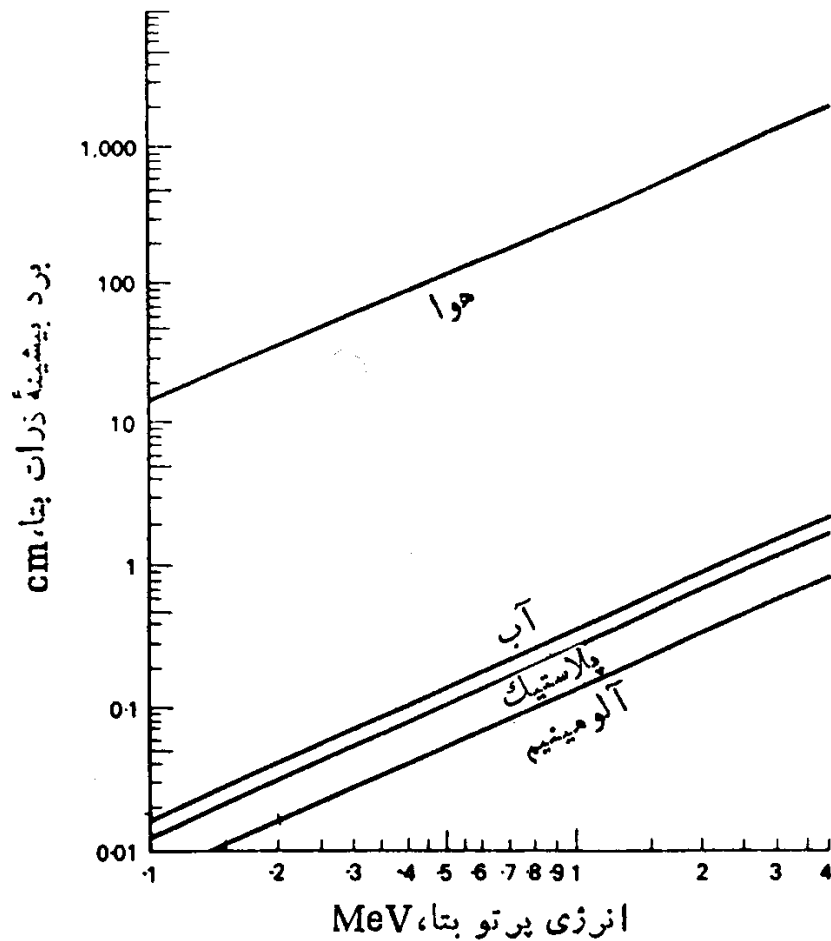
شکل ۲.۵ منحنی جذب ذرات بتای ^{210}Bi با انرژی بیشینه 1.17 MeV . خط چین افقی آهنک شمارش میانگین زمینه را نشان می‌دهد.

در موارد عملی، هنگام محاسبه ضخامت حفاظ در برابر پرتوهای بتا، از تأثیر عدد اتمی صرف‌نظر می‌شود. چگالی سطحی الکترونها تقریباً متناسب است با حاصلضرب چگالی ماده جاذب در ضخامت خطی آن. از این رو، به کمیتی از ضخامت می‌رسیم که آن را ضخامت چگالشی می‌نامیم و از لحاظ ریاضی چنین تعریف می‌کنیم

$$t_d(\text{g/cm}^2) = \rho(\text{g/cm}^3) \times t_l(\text{cm}) \quad (1.5)$$

در این معادله، یکاهای چگالی و ضخامت لزوماً بر حسب گرم و سانتی‌متر نیستند، بلکه هر مجموعه‌سازگاری از یکاهای قابل استفاده است. با کاربرد یکاهای ضخامت چگالشی، نظیر g/cm^2 یا mg/cm^2 ، می‌توان ماده جاذب را مستقل از جنس آن مشخص کرد. (باید خاطرنشان کرد، به‌دلایلی که بعدها خواهد آمد، حفاظهای پرتو بتا را تقریباً همیشه از موادی با عدد اتمی پایین اختیار می‌کنند.) برای مثال، چگالی آلومینیم برابر 2.7 g/cm^3 است. بنا بر معادله (۱.۵)، ضخامت چگالشی ورقه‌ای به کلفتی 1 cm از آلومینیم عبارت است از

$$t_d = 2.7\text{ g/cm}^3 \times 1\text{ cm} = 2.7\text{ g/cm}^2$$



شکل ۳.۵ منحنیهای برد - انرژی پرتوهای بتا در اجسام مختلف.

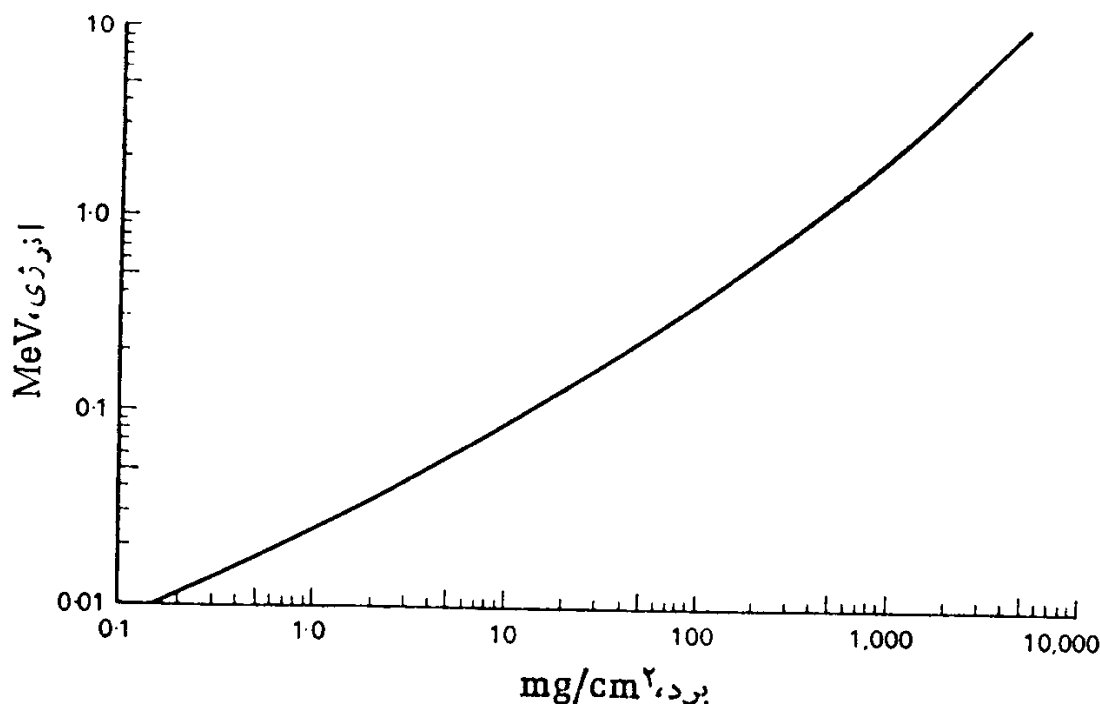
چنانچه بخواهیم ورقه‌ای از پلکسی گلاس با چگالی 1.18 g/cm^3 را به کار ببریم که توان جذب پرتو بتا در آن تقریباً همانند یک ورقه ۱ سانتی‌متری از آلومینیم است (یعنی 2.7 g/cm^2)، با استفاده از معادله (۱.۵) ضخامت خطی آن را به صورت زیر محاسبه می‌کنیم

$$t_l = \frac{t_d}{\rho} = \frac{2.7 \text{ g/cm}^2}{1.18 \text{ g/cm}^3} = 2.39 \text{ cm}$$

مزیت عملی دیگر استفاده از این نوع تعیین ضخامت، این است که جمع کردن ضخامت‌های مواد مختلف را که در کارهای پرتوشناختی متداول است امکان‌پذیر می‌سازد. شکل ۴.۵، به‌طور کلی منحنی برد را (که با یکای ضخامت چگالشی بیان شده است) بر حسب انرژی پرتو بتا نشان می‌دهد. این منحنی را که مبتنی بر اندازه‌گیریهای تجربی برد - انرژی است، می‌توان با معادله‌های (۲.۵، ۳، و ۴) نشان داد

$$R = 412 E^{1.265 - 0.0954 \ln E} \quad (2.5)$$

محدوده اعتبار این معادله برای انرژیهای $0.01 \leq E \leq 2.5 \text{ MeV}$ است



شکل ۴.۵ منحنی برد-انرژی ذرات بتا. برد برحسب یکای ضخامت چگالشی بیان شده است.

$$\ln E = 6.63 - 3.2376(10.2146 - \ln R)^{1/2} \quad (3.5)$$

این معادله برای بردهای $R \leq 1200$ برقرار است

$$R = 530E - 106 \quad (4.5)$$

و معادله اخیر برای مقادیر $E > 2.5 \text{ MeV}$ و $R > 1200$ اعتبار دارد. در این معادلات، R برد ذرات برحسب mg/cm^2 و E انرژی بیشینه ذرات برحسب MeV است.

مثال ۱.۵

حداقل ضخامت حفاظ چشمه ^{90}Sr که از (الف) پلکسی گلاس، و (ب) آلومینیم ساخته شده است، چقدر باید باشد تا هیچ پرتو بتایی نتواند از آن بگذرد؟

حل: انرژی بیشینه بتای گسیل شده از استرونیسیم ۹۰ برابر 54 MeV است. اما از ^{90}Y که دخترهسته ^{90}Sr است، پرتوهای بتا با انرژی بیشینه 2.27 MeV گسیل خواهند شد. چون همیشه همراه با پرتوهای بتای ^{90}Sr ذرات بتای ^{90}Y نیز حضور دارند، ضخامت حفاظ باید به حدی باشد که تمام این پرتوهای پرنرژتر را هم متوقف کند. با توجه به شکل ۴.۵، معلوم می شود که برد ذرات بتای 2.27 MeV برابر 1.18 g/cm^2 است. چگالی پلکسی گلاس 1.18 g/cm^3 است. بنا بر معادله (۱.۵)، ضخامت مورد لزوم پلکسی گلاس عبارت است از

$$t_l = \frac{t_d}{\rho} = \frac{1.1 \text{ g/cm}^2}{1.18 \text{ g/cm}^3} = 0.932 \text{ cm}$$

پلکسی گلاس اگر به مدت طولانی تحت تابش شدید قرار گیرد، ممکن است در اثر آسیب تابشی ترک بردارد. در این شرایط، بهتر است از آلومینیم به عنوان حفاظ استفاده شود. چون چگالی آلومینیم برابر 2.7 g/cm^3 است، ضخامت مورد لزوم آن 0.41 cm خواهد شد.

متخصصان فیزیک بهداشت غالباً برای تشخیص چشمه های ناشناخته گسیلنده بتا، از رابطه برد-انرژی استفاده می کنند. این شناسایی بدین ترتیب انجام می شود که نخست برد پرتو بتا را اندازه گیری و سپس انرژی آن را تعیین می کنند. در این حال، با استفاده از جدول ایزوتوپها، ایزوتوپی را که منشأ گسیل پرتو بتا با آن انرژی بوده است پیدا می کنند.

مثال ۲.۵

با استفاده از آزمایشی به ترتیب شکل ۵.۵، برد یک نوع ذره بتای ناشناخته معادل 111 mm آلومینیم به دست آمده است. در طی یک دوره ۱ ماهه، در فعالیت ایزوتوپ کاهش قابل اندازه گیری مشاهده نشده و تابش دیگری نیز از ایزوتوپ گسیل نشده است.

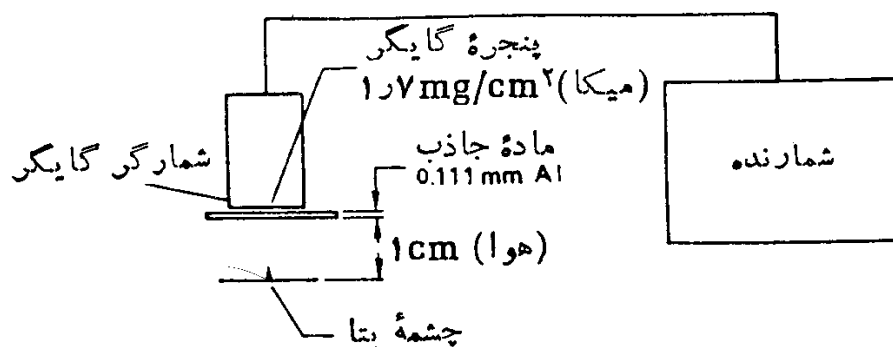
(الف) انرژی پرتو بتا چقدر است؟

(ب) ایزوتوپ مورد آزمایش کدام است؟

حل: برد کلی پرتو بتا عبارت است از

$$\text{برد} = 1.7 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2} (\text{میکا}) + 1 \text{ cm (هوا)} + 111 \text{ mm (آلومینیم)}$$

این جذب کننده های مختلف، در صورتی که ضخامتشان بر حسب ضخامت چگالی بیان شود، با هم قابل جمع اند. چگالی هوا در دما و فشار متعارف برابر 1.293 mg/cm^3 است. با استفاده از معادله (۱.۵) ضخامت چگالی هوا و آلومینیم محاسبه می شود، و برد ذره بتای نامعلوم به دست می آید.



شکل ۵.۵ شناسایی ایزوتوپ از طریق اندازه گیری برد ذرات بتای گسیل شده.

$$\text{برد} = ۱۰۷ \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2} + ۱۰۲۹ \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2} + ۳۰ \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2} = ۳۲۰۹۹ \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2}$$

طبق شکل ۴.۵، انرژی متناظر با این برد در حدود ۱۷ MeV است. بدین ترتیب، ایزوتوپ نامعلوم ممکن است ^{۱۴}C باشد که یک گسیلنده خالص بتا با انرژی بیشینه ۱۵۵ MeV و نیمه عمر ۵۷۰۰ سال است.

سازوکارهای اتلاف انرژی

یونش و برانگیزش

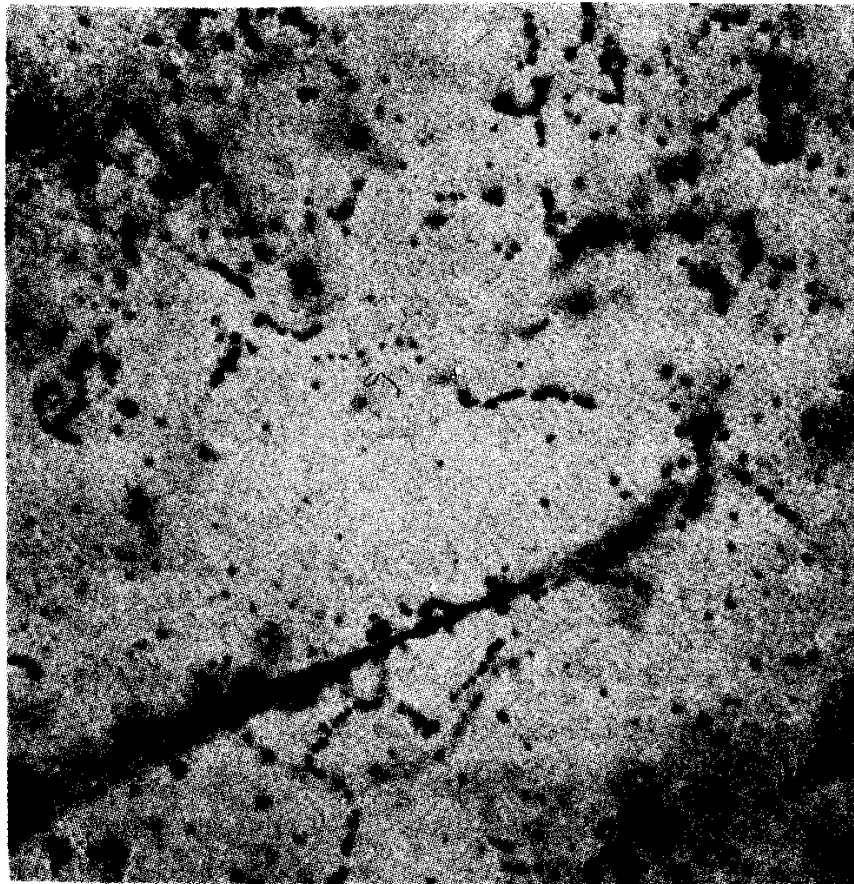
برهم کنش بین میدانهای الکتریکی ناشی از ذره بتا و الکترونهای مداری محیط جاذب، باعث یونش و برانگیزش الکترونها می شود. این برهم کنشها از نوع برخورد ناکشسان و همانند موردی هستند که در مثال ۱۳.۲ دیدیم. الکترونهای مداری را نیروهای الکتریکی در اتم نگه می دارند، و درمقابل با این نیروهاست که انرژی ذره بتا تلف می شود. چون نیروهای الکتریکی از فواصل دور اثر می کنند، «برخورد» بین ذره بتا و الکترون همانند برخورد بین قطبهای همنام دو آهنربا بدون تماس واقعی بین دو ذره صورت می گیرد. میزان افت انرژی ذره بتا به فاصله نزدیکی آن با الکترون و به انرژی جنبشی آن بستگی دارد. اگر پتانسیل یونش محیط جاذب را با ϕ و مقدار افت انرژی ذره بتا را در حین برخورد با E_i نشان دهیم، انرژی جنبشی الکترون پرتاب شده، E_k ، چنین می شود

$$E_k = E_i - \phi \quad (۵.۵)$$

در بسیاری از برخوردهای یوننده، فقط یک زوج یون تولید می شود. در موارد دیگر، الکترون پرتاب شده ممکن است آنقدر انرژی جنبشی داشته باشد که خوشه کوچکی که از چندین یونش تشکیل می شود ایجاد کند. در اندکی از موارد برخورد هم، الکترون پرتاب شده ممکن است تا آن حد انرژی جنبشی کسب کند که بتواند فاصله ای طولانی را پیماید و رگه ای یونشی برجای گذارد. چنین الکترونهایی را که انرژی جنبشی شان ممکن است از مرتبه ۱۰۰۰ eV باشد، پرتو دلتا می نامند.

جرم ذرات بتا با جرم الکترونهای مداری مساوی است، و بدین جهت این ذرات در طی فرایند برخورد به آسانی منحرف می شوند. به همین دلیل، ذرات بتا هنگام گذار از محیط جاذب، مسیرهایی پریپیچ و خم خواهند داشت. شکل ۶.۵، مسیر یک ذره بتا را در امولسیون عکاسی نشان می دهد. فیلم، در محل ایجاد یونش تحت تأثیر رویدادهای یونشی قرار می گیرد، و بدین ترتیب رد پای ذرات پس از ظهور فیلم قابل مشاهده خواهد شد.

با مرئی سازی رویدادهای یونشی به کمک فیلم عکاسی یا اتاقک ابر، و با شمارش تعداد واقعی یونش حاصل از یک تک ذره یوننده اولیه با انرژی مشخص، معلوم شده است که میانگین انرژی صرف شده در تولید هر زوج یون در حدود دو تا سه برابر پتانسیل یونش



شکل ۶.۵ مسیر الکترون در امولسیون عکاسی. خطوط پریپیچ و خم، مسیرهای الکترونی را نشان می‌دهند. خط پررنگ قسمت پایینی، از يك هسته اکسیژن در تابش کیهانی اولیه حاصل شده است.

است. تصویری رود که اختلاف میان افت انرژی ذره یوننده و انرژی صرف شده در برخورد یونشی، صرف برانگیزش الکترونها می‌شود. به عنوان مثال، پتانسیل یونش برای اکسیژن و نیتروژن به ترتیب برابر 13.6 eV و 14.5 eV است، در حالی که میانگین افت انرژی در هوا برابر 34 eV به ازای تولید هر زوج یون است. جدول ۱.۵ پتانسیل یونش و میانگین افت انرژی، w ، را برای چند گاز که عملاً مورد استفاده اند، نشان می‌دهد.

یونش ویژه. آهنگ خطی افت انرژی ذره بتا در فرایند یونش و برانگیزش، پارامتر مهمی، در طراحی سنجش افزارهای فیزیک بهداشت و در مطالعه اثرات زیست شناختی تابش به شمار می‌رود، که معمولاً آن را بر حسب یونش ویژه بیان می‌کنند. یونش ویژه عبارت است از تعداد زوج یونهای تشکیل شده در هر واحد مسافتی که ذره بتا می‌پیماید. عموماً مقدار یونش ویژه برای ذرات بتا در انرژیهای پایین نسبتاً بالاست؛ با افزایش انرژی ذره، یونش ویژه آن سریعاً کاهش می‌یابد تا اینکه در حدود انرژی 1 MeV به کمینه‌ای پهن می‌رسد. همان طور که در شکل ۷.۵ دیده می‌شود، چنانچه انرژی ذره از این مقدار هم تجاوز کند، یونش ویژه به آرامی شروع به افزایش مجدد خواهد کرد.

آهنگ خطی افت انرژی ناشی از یونش و برانگیزش را می‌توان به کمک معادله

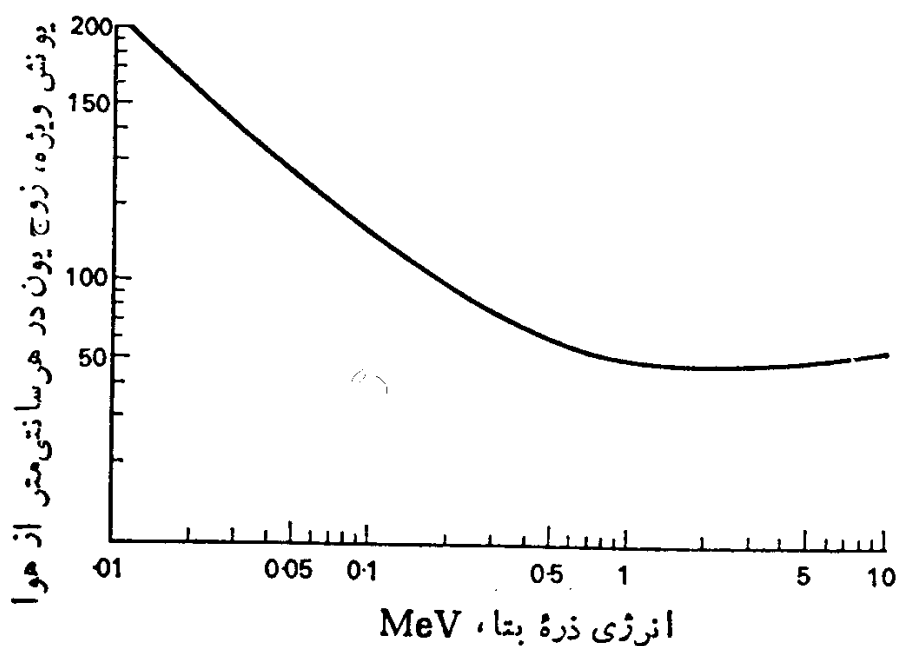
جدول ۱۰۵ میانگین افت انرژی ذره بتا در تولید هر زوج یون.

گاز	پتانسیل یونش	میانگین افت انرژی به ازای تولید هر زوج یون
H _۲	۱۳۰۶ eV	۳۶۰۶ eV
He	۲۴۰۵	۴۱۰۵
N _۲	۱۴۰۵	۳۴۰۶
O _۲	۱۳۰۶	۳۰۰۸
Ne	۲۱۰۵	۳۶۰۲
A	۱۵۰۷	۲۶۰۲
Kr	۱۴۰۵	۲۴۰۳
Xe	۱۲۰۱	۲۱۰۹
هوا		۳۳۰۷
CO _۲	۱۴۰۴	۳۲۰۹
CH _۴	۱۴۰۵	۲۷۰۳
C _۲ H _۲	۱۱۰۶	۲۵۰۷
C _۲ H _۴	۱۲۰۲	۲۶۰۳
C _۲ H _۶	۱۲۰۸	۲۴۰۶

زیر حساب کرد

$$\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi q^* N Z \times (3 \times 10^9)^2}{E_m \beta^2 (1.6 \times 10^{-6})^2} \left\{ \ln \left[\frac{E_m E_k \beta^2}{I^2 (1 - \beta^2)} \right] - \beta^2 \right\} \frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \quad (۶.۵)$$

که در آن q بار الکترون ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$)، N تعداد اتمهای محیط جاذب در هر cm^3 ، Z عدد اتمی محیط جاذب، NZ تعداد الکترونها محیط جاذب در هر cm^3 (که در هوای 0° و 76cmHg برابر 3.88×10^{20} است)، E_m انرژی هم ارز جرم الکترون (0.51MeV)، E_k انرژی جنبشی ذره بتا (بر حسب MeV)، β مساوی v/c ، و I میانگین پتانسیل یونش و برانگیزش اتمهای محیط جاذب (بر حسب MeV) است. (برای هوا $I = 8.6 \times 10^{-5}$ است، و برای مواد دیگر داریم $I = 1.35 \times 10^{-5} Z$).



شکل ۷.۵ ارتباط بین انرژی ذره بتا و یونش و یژه هوا.

چنانچه میانگین انرژی لازم برای تولید يك زوج یون (w) معلوم باشد، یونش و یژه را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد

$$S.I. = \frac{dE/dx(eV/cm)}{w(eV/ip)} \quad (7.5)$$

مثال ۳.۵

یونش و یژه حاصل از گذار يك ذره بتای ۱ MeV از هوای معمولی چقدر است؟
حل: β^2 را می‌شود از معادله (۲۰.۲) به دست آورد

$$E_k = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$$

$$0.01 = 0.51 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right)$$

$$\beta^2 = 0.03010$$

با قراردادن مقادیر معلوم در معادله (۶.۵)، حاصل می‌شود

$$\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi(1.6 \times 10^{-19})^4 \times 3.88 \times 10^{20} \times (3 \times 10^9)^4}{0.51 \times 0.3010 \times (1.6 \times 10^{-6})^2} \times \left\{ \ln \left[\frac{0.51 \times 0.11 \times 0.3010}{(1.6 \times 10^{-5})^2 (1 - 0.3010)} \right] - 0.3010 \right\} \frac{\text{MeV}}{\text{cm}}$$

$$\frac{dE}{dx} = 4.75 \times 10^{-2} \frac{\text{MeV}}{\text{cm}}$$

برای هوا داریم $w = 34 \text{ eV/ip}$. بنا براین، یونش ویژه با استفاده از معادله (۷.۵) چنین به دست می آید

$$S.I. = \frac{4.75 \text{ eV/cm}}{34 \text{ eV/ip}} = 140 \text{ یون زوج/cm}$$

در بسیاری از موارد، واحد طولی که در آهنگ افت انرژی از آن استفاده می شود ضخامت چگالشی است، یعنی آهنگ افت انرژی بر حسب MeV/gcm^2 بیان می شود. این کمیت را توان ایستاندگی جرمی می نامند که با معادله زیر تعریف می شود

$$S = \frac{dE/dx}{\rho} \quad (۸.۵)$$

چون چگالی هوای معمولی برابر $1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ است، آهنگ جرمی افت انرژی یا توان ایستاندگی جرمی در مثال ۳.۵ عبارت است از

$$S = \frac{4.75 \times 10^{-2} \text{ MeV/cm}}{1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3} = 36.7 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}$$

انتقال انرژی خطی. از اصطلاح یونش ویژه هنگامی استفاده می شود که توجه مان به افت انرژی تابش معطوف است. هنگامی که محیط جاذب مورد نظر باشد، همان طور که در پرتو-زیست شناسی و مطالعه اثرات تابش شاهدیم، چیزی که در گذار ذره یوننده از محیط جاذب برای ما اهمیت دارد آهنگ خطی جذب شدن انرژی در محیط جاذب است. برای تعیین آهنگ جذب انرژی از اصطلاح انتقال انرژی خطی، که به صورت اختصاری LET نموده و با معادله زیر تعریف می شود، استفاده می کنیم

$$LET = \frac{dE_L}{dl} \quad (۹.۵)$$

که در آن dE_L متوسط انتقال موضعی انرژی به محیط جاذب توسط ذره باردار با انرژی

معلوم در گذار از فاصله dI است. در فیزیک بهداشت و در پرتوزیست‌شناسی، کمیت LET را معمولاً بر حسب یکای $\text{keV}/\mu\text{m}$ بیان می‌کنند. اصطلاح «انتقال موضعی» در تعریف بالا می‌تواند هر دو مورد زیر را شامل شود: فاصله بیشینه از مسیر ذره یوننده، و مقدار بیشینه افت ناپیوسته انرژی ذره به طوری که افتهای بیشتری از آن دیگر موضعی تلقی نشوند. در هر دو مورد، LET انرژی منتقل شده به حجم محدودی از محیط جاذب را به دست می‌دهد. توان نسبی ایستاندگی جرمی. برای اینکه بتوانیم توان جذب انرژی را در محیطهای مختلف با هم مقایسه کنیم، از توان نسبی ایستاندگی جرمی استفاده می‌کنیم. در آینده نشان خواهیم داد کمیتی که در کارهای مربوط به فیزیک بهداشت حائز اهمیت است، توان ایستاندگی جرمی محیطهای جذب مختلف نسبت به توان ایستاندگی هواست. توان نسبی ایستاندگی جرمی چنین تعریف می‌شود

$$\rho_m = \frac{S_m (\text{محیط})}{S_a (\text{هوا})} \quad (10.5)$$

مثال ۴.۵

توان ایستاندگی جرمی گرافیت به چگالی 2.25 g/cm^3 نسبت به هوا، برای ذره بتا با انرژی 1 MeV چقدر است؟
حل: آهنگ جرمی افت انرژی در گرافیت را می‌توان با قراردادن مقادیر معلوم در معادلات (۸ و ۶.۵) به دست آورد

$$\begin{aligned} NZ &= \frac{6.03 \times 10^{23} \text{ atom/mol} \times 2.25 \text{ g/cm}^3 \times 6 \text{ electron/atom}}{12 \text{ g/mol}} \\ &= 6.77 \times 10^{23} \text{ electron/cm}^3 \\ I &= 1.35 \times 10^{-5} \times 6 = 8.1 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

و بنابراین، حاصل می‌شود

$$S_g = 3.85 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}$$

توان ایستاندگی جرمی هوا برابر 3.67 MeV/g/cm^2 است. بنابر معادله (۱۰.۵)، توان نسبی ایستاندگی جرمی گرافیت برای الکترونی با انرژی 1 MeV برابر می‌شود با

$$\rho_m = \frac{3.85}{3.67} = 1.05$$

تابش ترمزی

ذرات بارداری که به تندی در حرکت اند، هنگامی که به طور ناگهانی شتاب می گیرند، تابش ترمزی متشکل از پرتوهای x از خود گسیل می کنند. هنگامی که ذره بتا از نزدیکی یک هسته می گذرد، نیروی جاذبه قوی کولنی باعث می شود که ذره بتا به طور محسوس از مسیر اولیه اش منحرف شود. این تغییر جهت حرکت ناشی از شتاب شعاعی است و ذره بتا، بنا بر نظریه کلاسیک، از طریق تابش الکترومغناطیسی و با آهنگی متناسب با مربع شتاب، انرژی اش را از دست می دهد. این بدان معنی است که فوتونهای تابش ترمزی، توزیع پیوسته ای از انرژی دارند که از یک بیشینه نظری برابر با انرژی جنبشی ذره بتا، به طرف مقادیر کمتر گسترده است. محاسبه شکل طیف تابش ترمزی و همچنین محاسبه شدت تابش ناشی از جذب پرتو بتا، در هر آرایشی از چشمه و ماده جاذب، دشوار است ولی اندازه گیری آنها کار نسبتاً آسانی است. برای نمونه، میزان دز تابش ترمزی در فاصله ۱۰ سانتی متری از یک محفظه ۲۵ میلی لیتری محتوی $4 \times 10^9 \text{ Bq}$ ($\sim 100 \text{ mCi}$) محلول آبگون ^{32}P در حدود 3 mGy/h ($= 3 \text{ mrad/h}$) است. در حالی که میزان دز ناشی از $4 \times 10^9 \text{ Bq}$ ($\sim 100 \text{ mCi}$) ماده ^{90}Sr در یک محفظه کوچک برنجی و در فاصله ۱۰ cm از آن، در حدود 1 mGy/h ($= 100 \text{ mrad/h}$) است. (یکاهای mGy و mrad در فصل آینده معرفی خواهند شد. در اینجا کافی است که آنها را به عنوان یکاهای اندازه گیری دز تابش معرفی کنیم.)

در عملیات برآورد مخاطرات تابش ترمزی، می توان از رابطه تقریبی زیر استفاده کرد

$$f = 3.75 \times 10^{-4} ZE \quad (11.5)$$

که در آن f کسری از انرژی بتای فرودی که به صورت فوتون نمایان می شود، Z عدد اتمی ماده جاذب، و E انرژی بیشینه ذره بتا بر حسب MeV است. از آنجا که با افزایش عدد اتمی ماده جاذب احتمال تولید تابش ترمزی افزایش می یابد، حفاظهای پرتو بتا از موادی که عدد اتمی آنها کمترین است و عملاً هم قابل استفاده هستند، انتخاب می شود. در عمل برای پرتو بتا، حفاظهای با عدد اتمی بزرگتر از ۱۳ (عدد اتمی آلومینیم) چندان مورد استفاده نیستند.

مثال ۵.۵

چشمه بسیار کوچکی (از لحاظ حجم فیزیکی) از ^{32}P با فعالیت $3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ (1 Ci) در داخل یک حفاظ سربی قرار دارد، وضخامت حفاظ درست به اندازه ای است که از خروج ذرات بتا جلوگیری می کند. شار تابش ترمزی در فاصله ۱۰ cm از چشمه چقدر است؟
حل: از آنجا که برای سرب $Z = 82$ و انرژی بیشینه ذره بتای حاصل از ^{32}P برابر 1.71 MeV است، کسری از انرژی بتا که به فوتون تبدیل می شود، از معادله (۱۱.۵) چنین به دست می آید

$$f = 3.5 \times 10^{-4} \times 82 \times 1.71 = 0.049$$

چون انرژی میانگین پرتو بتا در حدود يك سوم انرژی بیشینه آن است، انرژی فروتابیده برحفاظ از طریق ذرات بتا، E_β ، برابر است با

$$E_\beta = \frac{1}{3} E \times 3.5 \times 10^4 \text{ MeV/s}$$

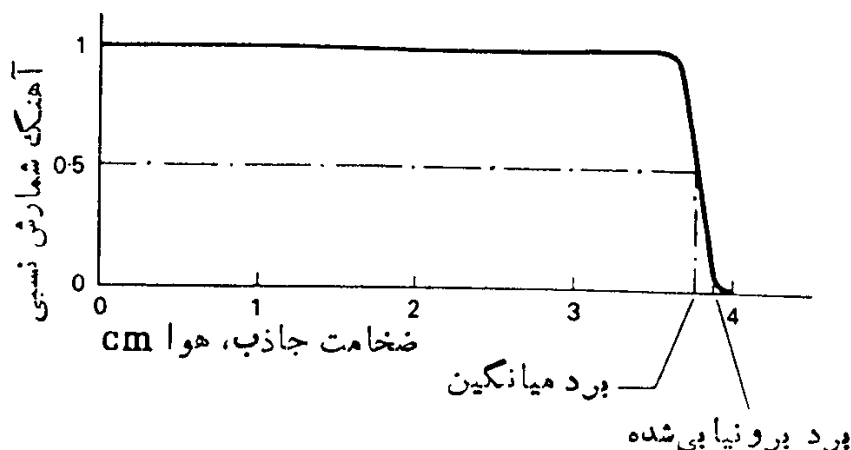
در عملیات فیزیک بهداشت، فرض می‌شود که تمام فوتونهای تابش ترمزی انرژی بیشینه دارند. بنابراین، شار فوتونهای تابش ترمزی در فاصله r cm از چشمه بتای $3.5 \times 10^4 \text{ Bq (1 Ci)}$ عبارت است از

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{f E_\beta}{4\pi r^2 E} & (12.5) \\ &= \frac{0.049 \times (1/3) \times 1.71 \text{ MeV}/\beta \times 3.5 \times 10^4 \beta/\text{s}}{4\pi \times 10^2 \text{ cm}^2 \times 1.71 \text{ MeV/photon}} \\ &= 4.8 \times 10^5 \text{ photon/cm}^2/\text{s} \end{aligned}$$

پرتوهای آلفا

رابطه برد-انرژی

پرتو آلفا کم نفوذترین نوع تابش است. برد پرتوهای آلفا از مواد پرتوزا گسیل می‌شود، فقط در حدود چند سانتی‌متر در هواست، و در بافتهای حیوانی مقدار این برد از مرتبه میکرون ($1 \mu = 10^{-4} \text{ cm}$) است. اصطلاح برد در مورد ذرات آلفا، ممکن است دو تعریف متفاوت داشته باشد: برد میانگین، و برد برونیابی شده. تفاوت میان این دو نوع برد را از روی منحنی جذب ذرات آلفا (شکل ۸.۵) می‌توان دریافت. همواری منحنی جذب ذرات آلفا از آن روست که تابش آلفا اساساً تک‌انرژی است. هر چه ضخامت ماده جاذب بیشتر باشد، صرفاً انرژی ذراتی که از آن عبور می‌کنند کاهش می‌یابد؛ و تا زمانی که ضخامت به برد تقریبی نرسد تعداد ذرات کاهش نمی‌یابد. در این نقطه، تعداد ذرات عبور کرده از ماده جاذب شدیداً کاهش می‌یابد. در نزدیکی انتهای منحنی، آهنگ جذب به علت اثرات تفرقی، یا ترکیبی از اثرات توزیع آماری «میانگین» افت انرژی به ازای هر یون و پراکندگی ناشی از هسته‌های محیط جاذب، کاهش خواهد یافت. برد میانگین، بردی است که با بیشترین دقت قابل اندازه‌گیری است، و با برد ذره آلفای «متوسط» متناظر است. برد برونیابی شده از برونیابی منحنی جذب ذرات آلفا و



شکل ۸.۵ منحنی جذب ذرات آلفا.

صفر انگاشتن تعداد ذرات آلفای عبور کرده حاصل می‌شود. متداولترین محیط جاذب برای مشخص کردن رابطه برد-انرژی ذرات آلفا، هواست. در هوای 0°C و فشار 760 mm ، برای ذرات آلفای با انرژیهای کمتر از 4 MeV و انرژیهای بین 4 تا 8 MeV ، برد با تقریب 10% از معادلات زیر به دست می‌آید

$$(E < 4\text{ MeV}) \quad R(\text{cm}) = 0.56E(\text{MeV}) \quad (13.5)$$

$$(4 < E < 8\text{ MeV}) \quad R(\text{cm}) = 1.24E(\text{MeV}) - 2.62 \quad (14.5)$$

برد ذرات آلفا را در هر محیط دیگری می‌توان از رابطه زیر محاسبه کرد

$$R_m(\text{mg/cm}^2) = 0.56A^{1/3}R \quad (15.5)$$

که در آن A عدد اتمی محیط، و R برد ذره آلفا در هوا بر حسب سانتی متر است.

مثال ۶.۵

برای متوقف کردن ذرات آلفای حاصل از ^{210}Po ، چه ضخامتی از ورقه آلومینیمی با چگالی 2.7 g/cm^3 لازم است؟

حل: انرژی ذره آلفای ^{210}Po برابر 5.3 MeV است. بنا بر معادله (۱۴.۵)، برد ذره آلفا در هوا برابر است با

$$R = 1.24 \times 5.3 - 2.62 = 3.95\text{ cm}$$

با قرار دادن این مقدار R و $A = 27$ در معادله (۱۵.۵)، حاصل می‌شود

$$R_m = 0.56 \times 27^{1/3} \times 3.95 = 6.64\text{ mg/cm}^2$$

ضخامت ورقه بر حسب سانتی متر، از معادله (۱۵.۵) محاسبه می‌شود که برابر است با 0.00246 cm .

از آنجا که ترکیب اتمی مؤثر بافتهای بدن انسان تفاوت خیلی زیادی با ترکیب هوا ندارد، برای محاسبهٔ برد ذرات آلفا در بافتهای بدن می‌توان از رابطهٔ زیر استفاده کرد

$$R_a \times \rho_a = R_T \times \rho_t \quad (۱۶.۵)$$

که در آن R_a و R_t برد ذره در هوا و در بافت بدن، ρ_a و ρ_t چگالی هوا و بافت بدن است.

مثال ۷.۵

برد ذرهٔ آلفای ^{210}Po در بافت بدن انسان چقدر است؟

حل: برد این ذره را در هوا، در مثال قبلی، برابر با ۳.۹۵ cm به دست آوردیم. با فرض اینکه چگالی بافت بدن برابر با واحد است، به کمک معادلهٔ (۱۶.۵) برد ذرهٔ آلفا را چنین به دست می‌آوریم

$$R_t = \frac{۳.۹۵\text{ cm} \times ۱.۲۹۳ \times ۱۰^{-۳}\text{ g/cm}^3}{۱\text{ g/cm}^3} = ۵.۱ \times ۱۰^{-۳}\text{ cm}$$

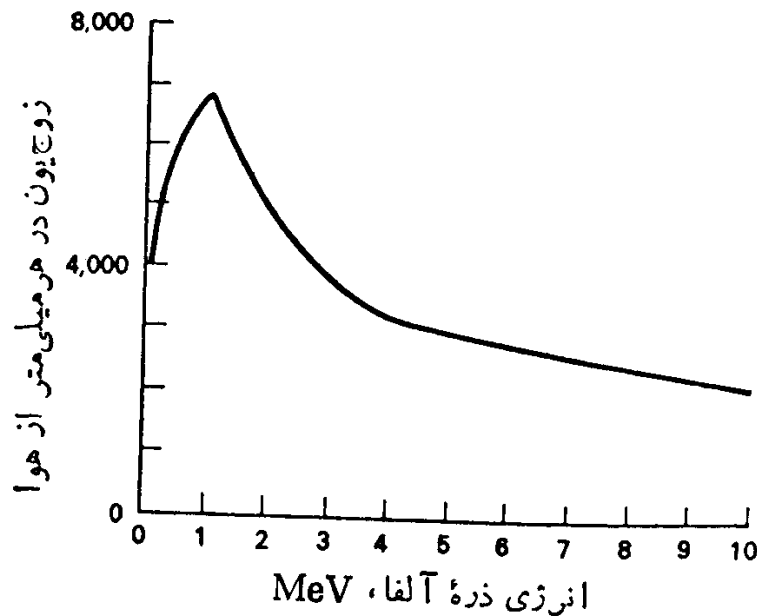
انتقال انرژی

سازوکار اصلی افت انرژی ذرات آلفا، و تنها فرایند در خور توجه در فیزیک بهداشت، یونش و برانگیزش الکترونهاست. ذرهٔ آلفا در گذار از هوا یا بافت نرم، به طور متوسط، در تولید هر زوج یون به اندازهٔ ۳۵ eV انرژی از دست می‌دهد. یونش و یژهٔ ذرهٔ آلفا، به خاطر بار الکتریکی زیاد و سرعت نسبتاً پایین آن، خیلی بالا و از مرتبهٔ دهها هزار زوج یون در هر سانتی‌متر از هواست (شکل ۹.۵).

آهنگ خطی افت انرژی برای تمام ذرات باردار سنگینتر از الکترون عبارت است از

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 q^4 N Z \times (۳ \times ۱۰^9)^4}{M v^2 \times ۱.۶ \times ۱۰^{-6}} \left[\ln \frac{2 M v^2}{I} - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \quad (۱۷.۵)$$

که در آن z عدد اتمی ذرهٔ یوننده، q بار الکتریکی واحد ($۱.۶ \times ۱۰^{-۱۹}\text{ C}$)، zq بار الکتریکی ذرهٔ یوننده، M جرم سکون ذرهٔ یوننده (گرم)، v سرعت ذرهٔ یوننده (cm/s)، N تعداد اتمهای مادهٔ جاذب در هر cm^3 ، Z عدد اتمی مادهٔ جاذب، NZ تعداد الکترونهاى جاذب در هر cm^3 ، c سرعت نور ($۳ \times ۱۰^{10}\text{ cm/s}$)، و I میانگین پتانسیل یونش و برانگیزش اتمهای جاذب است. (برای هوا داریم $I = ۱۳۸ \times 10^{-10}\text{ erg}$ و برای مواد دیگر $I = 2.16 \times 10^{-11} Z$). در حالتی که ذرهٔ یوننده ذرهٔ آلفا باشد، داریم $z = ۲$ و $M = ۶.۶۵ \times ۱۰^{-24}\text{ g}$. معادلهٔ (۱۷.۵) برای آن دسته از ذرات یوننده که سرعتشان از



شکل ۹۰۵ منحنی پراگ برای یونش ویژه ذرات آلفا در هوای با دما و فشار استاندارد.

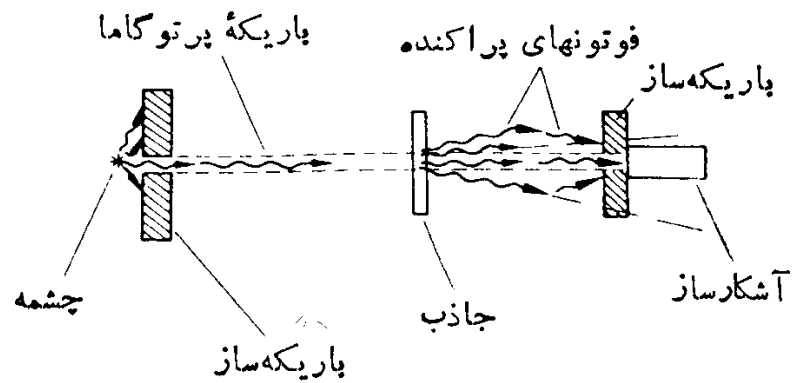
سرعت الکترونیهای مداری ماده جاذب بزرگتر باشد، برقرار است. توان ایستاندگی جرمی هر ماده جاذب را برای ذره آلفا، به همان شیوه‌ای که برای ذره بتا گفتیم، تعریف می‌کنیم. در مورد توان نسبی ایستاندگی جرمی نیز به همین ترتیب عمل می‌شود. بنا بر این، برای تعریف این دو خاصیت مواد جاذب در برابر ذرات آلفا هم از معادلات (۸۰۵ و ۱۰) استفاده می‌کنیم.

پرتوهای گاما

جذب نمایی

چگونگی تضعیف تابش گاما با تضعیف هر دو تابش بتا و آلفا متفاوت است. در حالی که هر دو این تابشهای ذره‌ای بردهای مشخص در ماده دارند، و بنا بر این کاملاً قابل جذب‌اند، در مورد تابش گاما با افزایش ضخامت جاذب فقط از شدت تابش کاسته می‌شود و جذب کامل صورت نمی‌گیرد. اگر اندازه‌گیری تضعیف پرتو گاما در شرایط هندسی خوب، یعنی با استفاده از یک باریکه تابشی باریک و کاملاً موازی (مطابق شکل ۱۰۵) انجام و اطلاعات حاصل روی کاغذ نیم لگاریتمی رسم شود، در صورتی که پرتو گاما تک انرژی باشد، یک خط مستقیم همانند شکل ۱۱۰۵ حاصل خواهد شد. اگر پرتو گاما چند رنگ (چند انرژی) باشد، نتیجه‌ای مانند منحنی خط چین در شکل ۱۱۰۵ حاصل خواهد شد. معادله خط مستقیم حاصل، در شکل ۱۱۰۵، چنین است

$$\ln I = -\mu t + \ln I_0 \quad (۱۸۰۵ الف)$$

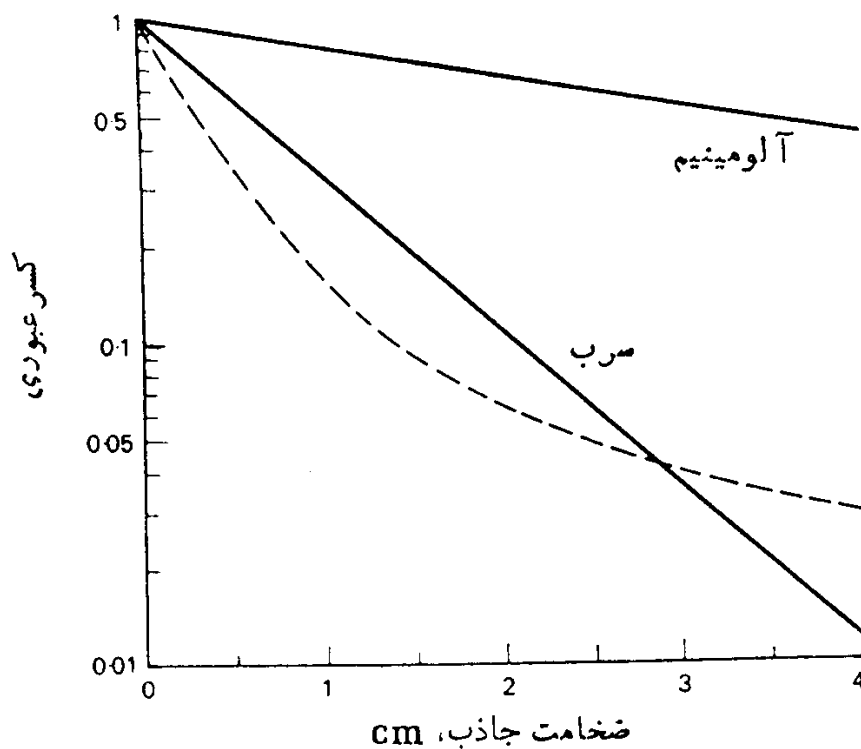


شکل ۱۰.۵ اندازه‌گیری تضعیف پرتو گاما در شرایط هندسی خوب. در حالت ایده‌آل، باریکه باید کاملاً موازی و چشمه تا حد ممکن از آشکارساز دور باشد، ماده جاذب باید در وسط فاصله چشمه و آشکارساز قرار گیرد، و ضخامت آن ناچنان کم باشد که احتمال برهم‌کنش ثانوی بین ماده جاذب و فوتون قبلاً پراکنده توسط آن ناچیز باشد، و لازم است که در اطراف آشکارساز نیز هیچگونه ماده پراکنده‌ای نباشد.

یا

$$\ln I/I_0 = -\mu t \quad (۱۸.۵ ب)$$

چنانچه از دو طرف معادله آنتی‌لگاریتم بگیریم، خواهیم داشت



شکل ۱۱.۵ تضعیف پرتوهای گاما در شرایط هندسی خوب. خطوط پر، منحنیهای تضعیف پرتوهای گامای (تک‌انرژی) ۰.۶۶۲ MeV را نشان می‌دهند. نمودار خط‌چین، منحنی تضعیف باریکه چندرنگ را نشان می‌دهد.

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \quad (19.5)$$

که در آن I_0 شدت پرتو گاما در ضخامت صفر ماده جاذب، x ضخامت ماده جاذب، I شدت پرتو گاما پس از عبور از ضخامت x در جاذب، e پایه دستگاه لگاریتم طبیعی، و μ ضریب منحنی جذب یا ضریب تضعیف است.

از آنجا که در یک معادله نمایی لازم است که نما بدون بعد باشد، بعد μ و x باید عکس یکدیگر شود. یعنی اگر ضخامت جاذب بر حسب سانتی متر اندازه گیری شود، آنگاه بعد ضریب تضعیف که ضریب تضعیف خطی μ_l خوانده می شود، باید « cm^{-1} » باشد. اگر x بر حسب g/cm^2 باشد، در این صورت ضریب جذب را ضریب تضعیف جرمی μ_m می گویند که بعد آن باید برابر $(\text{g/cm}^2)^{-1}$ یا (cm^2/g) باشد. ارتباط بین μ_m و μ_l با معادله زیر داده می شود

$$\mu_l(\text{cm}^{-1}) = \mu_m(\text{cm}^2/\text{g}) \times \rho \times (\text{g/cm}^3) \quad (20.5)$$

که در آن ρ چگالی ماده جاذب است.

ضریب تضعیف عبارت است از کسری از باریکه پرتو گاما که در طی گذار از واحد ضخامت ماده جاذب ناپدید می شود، و معادله معرف آن چنین است

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta I/I}{\Delta x} = -\mu \quad (21.5)$$

که در آن $\Delta I/I$ کسری از پرتو گاما است که در طی عبور از ماده جاذبی به ضخامت Δx ناپدید می شود. ضریب تضعیف را که بدین ترتیب تعریف شد، گاهی ضریب تضعیف کل می نامند. جدول ۲۰۵ مقادیری از ضرایب تضعیف را برای چند نوع ماده نشان می دهد.

در موارد خاصی، بهتر است که از ضریب تضعیف اتمی، μ_a ، استفاده شود. ضریب تضعیف اتمی، کسری از باریکه پرتو گاما است که بر اثر یک اتم منفرد ناپدید می شود. به عبارت دیگر می توان گفت که ضریب تضعیف اتمی همان احتمال برهم کنش یک اتم از ماده جاذب با یکی از فوتونهای موجود در باریکه خواهد بود. معادله معرف ضریب تضعیف اتمی چنین است

$$\mu_a(\text{cm}^2) = \frac{\mu_l(\text{cm}^{-1})}{N(\text{atom/cm}^3)} \quad (22.5)$$

که در آن N ، تعداد اتمهای موجود در هر سانتی متر مکعب از ماده جاذب است. توجه داشته باشید که بعد μ_a به صورت cm^2 و از نوع یکای مساحت است. به همین دلیل، تقریباً همیشه از ضریب تضعیف اتمی با عنوان «سطح مقطع» ماده جاذب یاد می شود. یکایی که برای

جدول ۲۰۵ ضرایب تضعیف خطی، cm^{-1}

انرژی فوتون														
	$\rho, \text{g/cm}^3$	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.5	2	3	5	8	10
C	2.25	0.335	0.301	0.274	0.238	0.196	0.159	0.143	0.117	0.100	0.080	0.061	0.048	0.044
Al	2.7	0.435	0.362	0.324	0.278	0.227	0.185	0.166	0.135	0.117	0.096	0.076	0.065	0.062
Fe	7.9	2.72	1.445	1.090	0.838	0.655	0.525	0.470	0.383	0.335	0.285	0.247	0.233	0.232
Cu	8.9	3.80	1.830	1.309	0.960	0.730	0.581	0.520	0.424	0.372	0.318	0.281	0.270	0.271
Pb	11.3	59.7	20.8	10.15	4.02	1.64	0.945	0.771	0.579	0.516	0.476	0.482	0.518	0.552
H ₂ O	1.29×10^{-3}	1.95×10^{-4}	1.73×10^{-4}	1.59×10^{-4}	1.37×10^{-4}	1.12×10^{-4}	9.12×10^{-5}	8.45×10^{-5}	6.67×10^{-5}	5.75×10^{-5}	4.6×10^{-5}	3.54×10^{-5}	2.84×10^{-5}	2.61×10^{-5}
بنزن	1	0.167	0.149	0.136	0.118	0.097	0.079	0.071	0.056	0.049	0.040	0.030	0.024	0.022
	2.35	0.397	0.326	0.291	0.251	0.204	0.166	0.149	0.122	0.105	0.085	0.067	0.057	0.054

ترکیب بتیون مدمولی به این صورت است: H_2O ، ۵۶٪، O ، ۵۶٪، Si ، ۳۱٪، Al ، ۵۶٪، Ca ، ۲۴٪، Fe ، ۲۲٪، Mg ، ۲۴٪، Na ، ۷۱٪، K ، ۹۲٪، S ، ۱۲٪.

اندازه گیری سطح مقطع مورد استفاده قرار می گیرد، بادن نام دارد

$$b = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

ضریب تضعیف اتمی را سطح مقطع میکروسکوپیست نیز می گویند و با نماد σ نمایش می دهند، در این صورت ضریب تضعیف خطی را سطح مقطع ماکروسکوپیست می نامند و با نماد Σ نشان می دهند. این نامگذاریها را تقریباً همیشه در مطالعات نوترونی به کار می بریم. بدین ترتیب، معادله (۲۲.۵) را می شود چنین نوشت

$$\Sigma (\text{cm}^{-1}) = \sigma \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{atom}} \right) \times N \left(\frac{\text{atom}}{\text{cm}^3} \right) \quad (23.5)$$

با استفاده از رابطه (۲۲.۵)، معادله (۱۹.۵) را می توان به صورت زیر درآورد

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu_a N t} \quad (24.5 \text{ الف})$$

یا

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\sigma N t} \quad (24.5 \text{ ب})$$

مقادیر عددی μ_a برای بسیاری از عناصر، و برای گستره پهنای انرژی از انرژیها، منتشر شده است.^۱

به کمک سطح مقطعیهای اتمی می توان ضریب تضعیف یک آلیاژ با ترکیبی متشکل از چند عنصر مختلف را محاسبه کرد.

مثال ۸.۵

برنز آلومینیمی آلیاژی است که ۹۰٪ وزن آن از Cu ($63.57 = \text{وزن اتمی}$) و ۱۰٪ آن از Al ($27 = \text{وزن اتمی}$) و چگالی آن برابر 7.6 g/cm^3 است. ضرایب تضعیف خطی و جرمی این آلیاژ را برای پرتوهای گامای 4 MeV پیدا کنید. سطح مقطع Cu و Al را برای این انرژی برابر 9.91 و 4.45 بارن بگیرید.

حل: بنا بر معادله (۲۲.۵)، ضریب تضعیف خطی برنز آلومینیمی چنین است

$$\mu_t = (\mu_a)_{\text{Cu}} \times N_{\text{Cu}} + (\mu_a)_{\text{Al}} \times N_{\text{Al}}$$

تعداد اتمهای Cu در هر cm^3 از آلیاژ عبارت است از

1. Gladys White Goodstein, *X-ray Attenuation Coefficients from 10 keV to 100 MeV*. NBS Circular 583. U. S. Government Printing Office, Washington, 1957.

$$N_{Cu} = \frac{6.023 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{63.57 \text{ g/mol}} (7.96 \times 0.89) \text{ g/cm}^3$$

$$= 6.49 \times 10^{22} \text{ atom/cm}^3$$

و برای آلومینیم داریم $N_{Al} = 1.7 \times 10^{22} \text{ atom/cm}^3$. بنا براین، ضریب تضعیف خطی چنین می‌شود

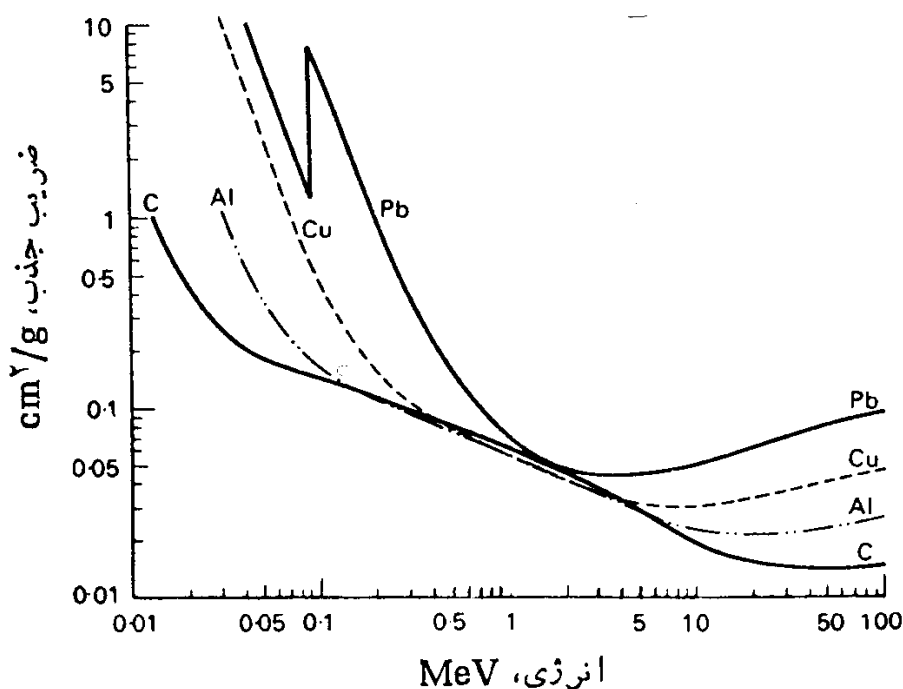
$$\mu_l = 9.9 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 \times 6.49 \times 10^{22} \text{ atom/cm}^3 + 4.45 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 \times 1.7 \times 10^{22} \text{ atom/cm}^3$$

$$= 0.0705 \text{ cm}^{-1}$$

با استفاده از معادله (۲۰.۵)، ضریب تضعیف جرمی چنین به دست می‌آید

$$\mu_m = \frac{0.0705 \text{ cm}^{-1}}{7.96 \text{ g/cm}^3} = 0.00885 \text{ cm}^2/\text{g}$$

همان گونه که در شکل ۱۲.۵ دیده می‌شود، خواص تضعیفی ماده با نظم خاصی بر حسب عدد اتمی ماده جاذب و انرژی پرتو گاما تغییر می‌کند. اما باید خاطر نشان کرد در ناحیه‌ای که اثر کامپتون غلبه دارد (در زیر بحث بیشتری درباره این اثر خواهیم داشت)، ضریب تضعیف جرمی تقریباً مستقل از عدد اتمی ماده جاذب خواهد بود.



شکل ۱۲.۵ منحنی نمایش تغییرات ضریب تضعیف بر حسب انرژی فوتون برای مواد جاذب با اعداد اتمی مختلف.

مثال ۹.۵

(الف) ضخامت ماده جاذب از نوع آلومینیم و سرب چقدر باید باشد تا ۱۰٪ از باریکه ظریفی از تابش گاما به انرژی ۱ MeV عبور دهد؟

حل: با توجه به جدول ۲.۵، ضریب μ_t برای Al برابر 0.435 cm^{-1} و برای Pb برابر 59.7 cm^{-1} است. با به کار بردن معادله (۱۹.۵)، برای آلومینیم داریم

$$\frac{1}{10} = e^{-(0.435 \text{ cm}^{-1})(t \text{ cm})}$$

$$\ln 10 = 0.435 t$$

$$\frac{2.3}{0.435} = t = 5.3 \text{ cm}$$

به همین ترتیب، برای سرب هم خواهیم داشت

$$\frac{1}{10} = e^{-(59.7 \text{ cm}^{-1})(t \text{ cm})}$$

$$t = 0.0385 \text{ cm}$$

(ب) محاسبه قسمت (الف) را برای پرتو گامای با انرژی ۱ MeV تکرار کنید. ضریب μ_t برای Al برابر ۰.۱۶۶ و برای Pb برابر ۰.۷۷۱ است. ضخامت آلومینیم چنین به دست می آید

$$\frac{1}{10} = e^{-(0.166 \text{ cm}^{-1})(t \text{ cm})}$$

$$t = 13.86 \text{ cm}$$

و برای سرب، داریم

$$\frac{1}{10} = e^{-(0.771 \text{ cm}^{-1})(t \text{ cm})}$$

$$t = 2.97 \text{ cm}$$

(ج) در این مثال، ضخامت چگالشی Al و Pb را در هر قسمت با هم مقایسه کنید. ضخامت چگالشی Al برای فوتونهای ۱ MeV، برابر معادله (۱.۵)، چنین

می شود

$$t_{dAl} = 2.97 \text{ g/cm}^2 \times 5.3 \text{ cm} = 15.7 \text{ g/cm}^2$$

و برای سرب داریم

$$t_{dPb} = 1134 \text{ g/cm}^2 \times 0.0385 \text{ cm} = 0.435 \text{ g/cm}^2$$

درمورد فوتونهای با انرژی 10 MeV ، ضخامت چگالشی Al برابر 374 g/cm^2 و برای سرب برابر 336 g/cm^2 به دست می‌آید.

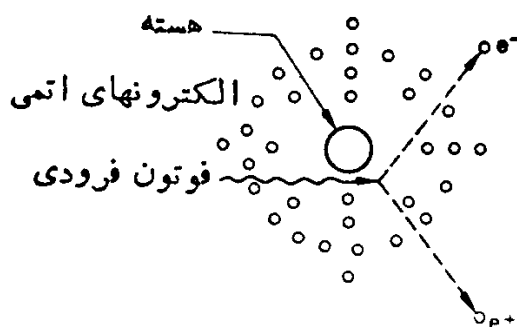
این مثال نشان می‌دهد که از نظر جرم، برتری سرب بر آلومینیم برای پرتوگامای پراثری، اندک است. اما ازسوی دیگر، درمقابل فوتونهای کم انرژی، قدرت جذب سرب برتری انکارناپذیری بر آلومینیم دارد. به‌طور کلی از لحاظ جرم، برای انرژیهای بین حدود 0.05 MeV تا 5 MeV ، خواص تضعیفی تمام مواد درمقابل پرتوگاما تقریباً یکسان است. بنابراین، در تقریب اول در این گستره انرژی، خواص حفاظتی مواد حفاظ تقریباً متناسب با چگالی آنهاست. برای انرژیهای پایینتر و بالاتر از این گستره، مواد جاذب با اعداد اتمی بالا از مواد با اعداد اتمی پایین مؤثرترند. برای درک این خواص، لازم است که سازوکارهای میکروسکوپی برهم‌کنش بین پرتوگاما و ماده را بررسی کنیم.

سازوکار برهم‌کنش

در امور حفاظت در برابر تابش، چهار نوع برهم‌کنش اصلی پرتوگاما را با ماده حائز اهمیت می‌دانند. دوتا از این فرایندها که یکی جذب فوتوالکتریک و دیگری پراکندگی کامپتون است، فقط به برهم‌کنش با الکترونهای مداری ماده جاذب مربوط می‌شوند که در حالتی که انرژی فوتونها خیلی از 1.02 MeV (انرژی معادل جرم سکون دوالکترون) بیشتر نیست، نقش غالب خواهند داشت. در حالتی که انرژی فوتونها بیشتر است، تولید زوج که نتیجه تبدیل مستقیم انرژی الکترومغناطیسی به جرم است، به وقوع خواهد پیوست. همه این برهم‌کنشها به گسیل الکترون از ماده جاذب منجر می‌شوند. فوتونهای با انرژی خیلی زیاد ($E \gg 2m_0c^2$) همچنین ممکن است جذب هسته‌های اتمی ماده جاذب شوند که در این صورت، هسته‌های برانگیخته، طی چند واکنش هسته‌ای، تابشهای دیگری از خود گسیل خواهند کرد.

تولید زوج

فوتونی که انرژی اش بیشتر از 1.02 MeV است، هنگامی که از نزدیکی يك هسته می‌گذرد، ممکن است خود به خود نابود و انرژی اش به صورت يك پوزیترون و يك الکترون پدیدار شود (شکل ۱۳.۵). جرم هر يك از این دو ذره برابر m_0c^2 یا 0.51 MeV ، و انرژی جنبشی کل آنها در حدود $(hf - 2m_0c^2)$ است. برای حفظ پایستگی تکانه، لازم است که این تبدیل انرژی به جرم در حضور يك ذره دیگر (نظیر يك هسته) صورت گیرد. انرژی جنبشی هسته پس‌زننده خیلی کم است. بنابراین، در عمل می‌توان گفت که آنچه از انرژی



شکل ۱۳۰۵ نمودار طرحوار تولید زوج، زوج پوزیترون- الکترون، به‌طور کلی، به‌سمت جلو (نسبت به جهت فوتون فرودی) پرتاب خواهد شد. با افزایش انرژی فوتون، پرتاب زوج به‌سمت جلونیز شدیدتر می‌شود.

فوتون بعد از تشکیل جرم زوج باقی می‌ماند، به‌صورت انرژی جنبشی زوج پدیدار می‌شود. این پدیده ممکن است در مجاورت يك الکترون نیز صورت گیرد، ولی احتمال وقوع آن در مجاورت هسته بسیار بیشتر است. علاوه بر این، انرژی آستانه برای تولید زوج در مجاورت الکترون برابر با $4m_0c^2$ است. این انرژی آستانه بزرگتر از آن جهت ضروری است که الکترون پس‌زننده باید با سرعتی بسیار زیاد به‌طرف عقب پرتاب شود تا پایداری تکانه برقرار بماند. چون جرم الکترون برابر جرم ذرات تازه تولید شده است، انرژی لازم برای پرتاب آن زیاد خواهد بود. سطح مقطع یا احتمال تولید زوج الکترون- پوزیترون تقریباً متناسب است با $(Z^2 + Z)$ ، و از این رو مواد جاذب با اعداد اتمی بالاتر اهمیت بیشتری در این مورد خواهند داشت. وقتی انرژی فوتون از مقدار آستانه 1.02 MeV تا حدود 5 MeV افزایش یابد، سطح مقطع هم به آهستگی افزایش خواهد یافت. برای انرژی‌های بالاتر، سطح مقطع متناسب با لگاریتم انرژی فوتون است. همین سطح مقطع فزاینده است که منجر به افزایش ضریب تضعیف در انرژی‌های بالا می‌شود.

پس از تولید زوج، پوزیترون و الکترون به‌سمت جلو (نسبت به جهت فوتون اولیه) پرتاب می‌شوند و انرژی جنبشی‌شان را، همانند هر الکترون پرنرژدی دیگر از طریق برانگیزش، یونش، و تابش ترمزی از دست می‌دهند. هنگامی که پوزیترون تمام انرژی جنبشی‌اش را از دست داد، با يك الکترون ترکیب می‌شود و دو کوانتوم تابش نابودی تولید می‌کند که انرژی هر کدام برابر 511 MeV است. از این رو، هنگامی که فوتونی با انرژی 1.0 MeV از جاذبی سربی عبور می‌کند، به يك زوج الکترون- پوزیترون تبدیل می‌شود که انرژی جنبشی هر يك در حدود 4.5 MeV است. این انرژی جنبشی هم مثل انرژی ذرات بتا، در ماده جاذب تلف می‌شود. آنگاه پوزیترون در اثر ترکیب با يك الکترون از ماده جاذب نابود می‌شود، و بدین ترتیب دو فوتون با انرژی‌های 511 MeV از ماده جاذب خارج می‌شوند (این فوتونها همچنین می‌توانند در فرایندهای پراکندگی کامپتون و جذب فوتوالکتریک شرکت کنند). بدین ترتیب، حاصل برهم‌کنش تولید زوج در این حالت چنین می‌شود: يك فوتون منفرد به انرژی 1.0 MeV به‌صورت دو فوتون با

انرژیهای 51 MeV درمی‌آید، و 898 MeV از انرژی باقیمانده در محیط جاذب تلف می‌شود.

پراکندگی کامپتون

همان‌گونه که در شکل ۱۴.۵ نموده شده است، پراکندگی کامپتون عبارت است از برخوردی کشسان بین یک فوتون و یک الکترون «آزاد» (الکترون «آزاد»، الکترونی است که انرژی بستگی اش به اتم خیلی کمتر از انرژی فوتون فرودی است).

در برخورد بین یک فوتون و یک الکترون آزاد، اگر پایستگی تکانه و انرژی برقرار بماند، امکان ندارد که تمام انرژی فوتون به الکترون منتقل شود. این حکم را با فرض امکان پذیر بودن این واکنش می‌توان اثبات کرد. اگر چنین چیزی درست بود، در آن صورت بنا بر قانون پایستگی انرژی، تمام انرژی فوتون به الکترون منتقل می‌شد و می‌توانستیم بنویسیم

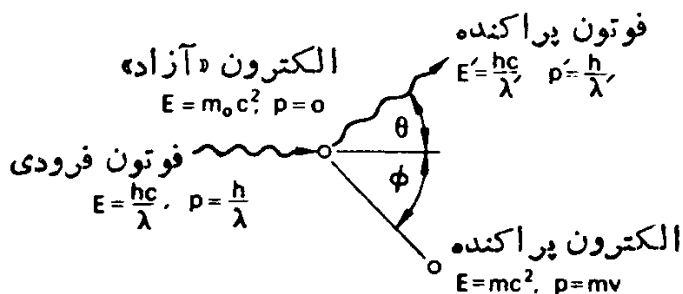
$$E = mc^2$$

بنا بر قانون پایستگی تکانه اگر فوتون ناپدید شود، تمام تکانه فوتون باید به الکترون منتقل شود

$$p = \frac{E}{c} = mv$$

با حذف m از این دو معادله، حاصل می‌شود $v = c$ که نتیجه‌ای غیرممکن است. از اینجا معلوم می‌شود که فرض اولیه ما که بنا به آن تمام انرژی فوتون به الکترون منتقل می‌شود، نادرست بوده است.

چون تمام انرژی فوتون منتقل نمی‌شود، لازم است که فوتون پراکنده شود و در این صورت فوتون پراکنده دارای انرژی کمتر (یا طول موجی بلندتر) از فوتون فرودی خواهد بود. تنها اختلاف انرژی بین فوتون فرودی و فوتون پراکنده است که به الکترون



شکل ۱۴.۵ پراکندگی کامپتون: برخورد کشسان بین یک فوتون و یک الکترون.

آزاد منتقل می‌شود. مقدار انرژی منتقل شده در هر برخورد را می‌توان با کاربرد قوانین پایستگی انرژی و تکانه (در شرایطی همانند شکل ۱۴.۵) به دست آورد. برای اینکه انرژی پایسته بماند، باید رابطه زیر برقرار باشد

$$\frac{hc}{\lambda} + m_0 c^2 = \frac{hc}{\lambda'} + mc^2 \quad (25.5)$$

و برای اینکه تکانه پایسته بماند، به ترتیب در جهات افقی و قائم باید داشته باشیم

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \theta + mv \cos \phi \quad (26.5)$$

$$0 = \frac{h}{\lambda'} \sin \theta - mv \sin \phi \quad (27.5)$$

از حل این معادلات معلوم می‌شود که تغییر طول موج فوتون چنین خواهد شد

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \text{ cm} \quad (28.5)$$

و رابطه بین زاویه‌های پراکندگی فوتون و الکترون به صورت زیر است

$$\cot \frac{\theta}{2} = \left(1 + \frac{h}{\lambda m_0 c} \right) \tan \phi \quad (29.5)$$

هنگامی که مقادیر ثابت را در معادله (۲۸.۵) قرار دهیم، تغییر طول موج بر حسب آنگستروم چنین می‌شود

$$\Delta\lambda = 0.0242 (1 - \cos \theta) \text{ \AA} \quad (30.5)$$

معادله (۲۹.۵) نشان می‌دهد که الکترون نمی‌تواند با زاویه‌ای بزرگتر از 90° پراکنده شود. این الکترون پراکنده در دزسنجی تابش از اهمیت فراوانی برخوردار است، زیرا وسیله نقلیه انتقال انرژی فوتون پراکنده به محیط جاذب همین الکترون است. الکترون کامپتون انرژی اش را به سان یک ذره بتا در ماده از دست می‌دهد، و در میان تولیدات پرتوگاما یکی از ذرات اصلی یوننده است. پراکندگی کامپتون از دیدگاه مهندسی فیزیک بهداشت نیز حائز اهمیت است، زیرا فوتون پرا انرژی در طی پراکندگی نسبت به فوتون کم انرژی، بخش بزرگتری از انرژی اش را از دست می‌دهد. با استفاده از این نکته می‌توان ضخامت حفاظها را کاهش داد، و از این رهگذر از لحاظ اقتصادی به صرفه جویی رسید.

مثال ۱۰.۵

وقتی که فوتونهای با انرژی ۱ MeV و ۱ MeV هر دو تحت زاویه 90° پراکنده

شوند، چه کسرهایی از انرژی‌شان ازدست خواهد رفت؟
 حل: با قراردادن $E = hc/\lambda$ در معادله (۲۸.۵) و پیدا کردن انرژی فوتون پراکنده، خواهیم داشت

$$E' = \frac{E}{1 + (E/m_0 c^2)(1 - \cos \theta)} \quad (۳۱.۵ \text{ الف})$$

و کسری از انرژی فرودی که فوتون پراکنده ازدست می‌دهد، چنین می‌شود

$$\frac{E'}{E} = \frac{1}{1 + (E/m_0 c^2)(1 - \cos \theta)} \quad (۳۱.۵ \text{ ب})$$

با قراردادن مقادیر انرژی فوتون فرودی و زاویه پراکندگی در معادله (۳۱.۵ الف)، حاصل می‌شود

$$E' = \frac{1 \text{ MeV}}{1 + (1/0.51)(1)} = 0.338 \text{ MeV}$$

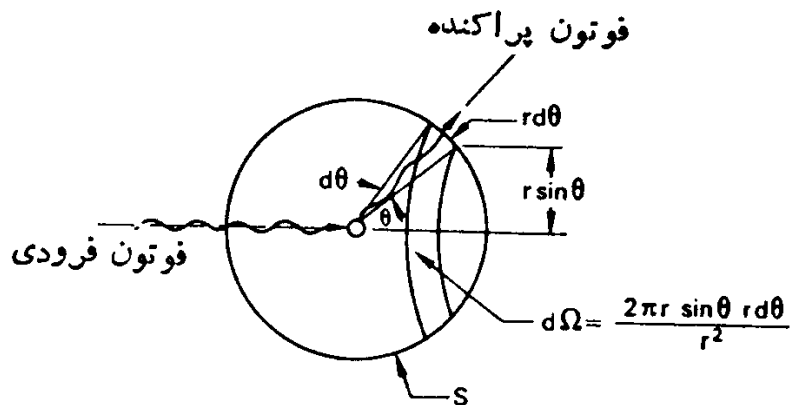
و افت نسبی انرژی چنین می‌شود

$$1 - \frac{E'}{E} = \frac{1 - 0.338}{1} = 0.662 = 66.2\%$$

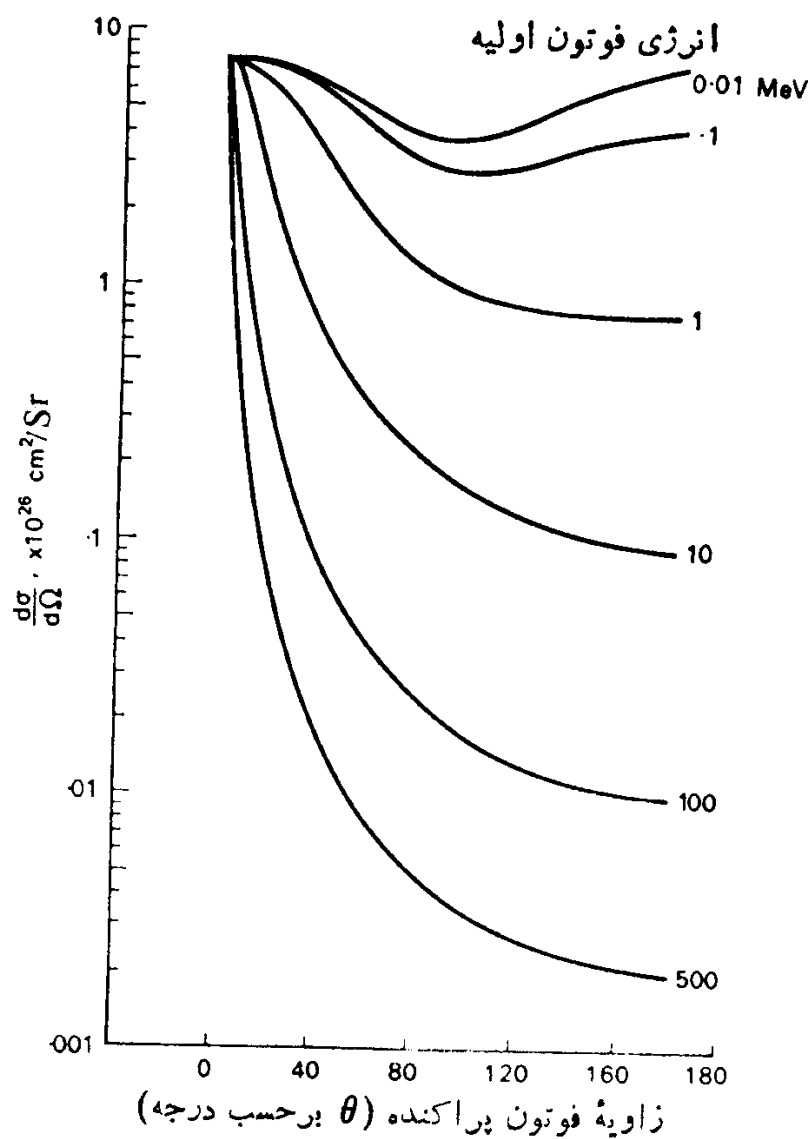
در مورد پرتو گامای 1 MeV ، بنا بر معادله (۳۱.۵ الف) انرژی فوتون پراکنده برابر 0.338 MeV و در نتیجه افت نسبی انرژی فقط برابر 0.662 یا 66.2% می‌شود. با افزایش انرژی فوتونها و همراه با افزایش عدد اتمی ماده جاذب، احتمال برهم‌کنش کامپتون کاهش می‌یابد. در عناصر با عدد اتمی پایین، پراکندگی کامپتون سازوکار اصلی برهم‌کنش است. در پراکندگی کامپتون، هر الکترون به مثابه یک مرکز پراکندگی عمل می‌کند، و خواص پراکندگی بزرگ - مقیاس ماده عمدتاً به چگالی الکترونی واحد جرم آن بستگی خواهد داشت. بدین ترتیب، احتمال پراکندگی کامپتون باید به ازای هر الکترون مشخص شود. سطح مقطع نظری پراکندگی کامپتون را نخستین بار کلاین و نیشینا محاسبه کردند. آنها ضریب کل پراکندگی جزئی را برای پراکندگی به درون زاویه فضایی دیفرانسیل $d\Omega$ که نسبت به راستای فوتون فرودی تحت زاویه θ قرار دارد، شکل ۱۵.۵، به صورت زیر به دست آوردند

$$\frac{d\sigma_t}{d\Omega} = \frac{e^4}{2m_0^2 c^4} \left[\frac{1}{1 + a(1 - \cos \theta)} \right]^2 \left[\frac{1 + \cos^2 \theta + a^2(1 - \cos \theta)^2}{1 + a(1 - \cos \theta)} \right] \quad (۳۲.۵)$$

که در آن e ، m_0 و c نمادهای متداول اند، و $a = hf/m_0 c^2$ است. معادله (۳۲.۵) و شکل ۱۶.۵، احتمال پراکندگی یک فوتون را به درون زاویه فضایی $d\Omega$ که تحت زاویه θ



شکل ۱۵.۵ نمودار پراکندگی کامپتون برای نمایش سطح مقطع پراکندگی جزئی S. کره‌ای به شعاع واحد است که الکترون پراکنده در مرکز آن قرار دارد.



شکل ۱۶.۵ ضریب پراکندگی جزئی که توزیع زاویه‌ای احتمالی را برای فوتونهای پراکنده کامپتون نشان می‌دهد.

قرار دارد، نشان می دهند. احتمال پراکندگی کلی، σ_e ، را با قراردادن $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$ و انتگرال گیری از ضریب پراکندگی جزئی در تمام فضای کره می توان به دست آورد. نتیجه این محاسبه، برای فوتونهای تا انرژی ۱۰ MeV، در شکل ۱۷.۵ نشان داده شده است. سطح مقطع هرواکنشی، هنگامی که برای يك ذره منفرد یا يك فوتون منفرد بررسی می شود، عبارت است از احتمال درگیر شدن این فوتون در آن واکنش. وقتی که با يك باریکه تابشی سروکار داریم، سطح مقطع کسری از ذرات موجود در آن باریکه است که به طریقی معلوم در آن واکنش شرکت می کنند. در پراکندگی کامپتون، انرژی از فوتون فرودی به الکترون پراکنده انتقال می یابد، و انرژی فوتون پراکنده از فوتون فرودی کمتر است. کسری از انرژی فوتون فرودی را که فوتون پراکنده منتقل می کند، معادله (۳۱.۵ ب) به دست می دهد. کسر انرژی پراکنده از باریکه پرتوگاما، از حاصلضرب کسر فوتونهای پراکنده در افت نسبی انرژی به ازای هر برخورد، قابل محاسبه است

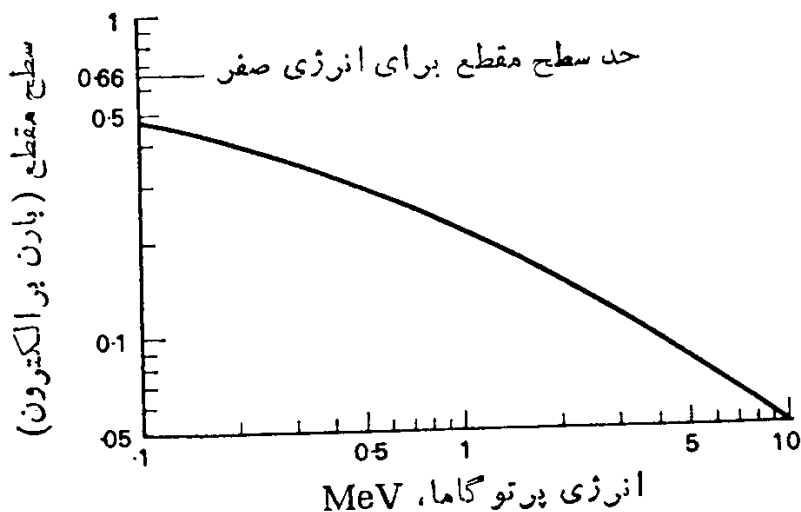
$$\frac{d\sigma_s}{d\Omega} = \frac{d\sigma_e}{d\Omega} \cdot \frac{E'}{E} \quad (33.5)$$

درفیزيك بهداشت برای محاسبه دز جذب شده از تابش x یا گاما، به کسری از انرژی باریکه فرودی که به الکترونهای کامپتون منتقل می شود نیاز داریم. این انرژی، همان انرژی جذب شده از باریکه در اثر پراکندگی کامپتون است. سطح مقطع جذب انرژی کامپتون، σ_e ، صرفاً از تفریق سطح مقطع پراکندگی از سطح مقطع کل به دست می آید

$$\sigma_e = \sigma_t - \sigma_s \quad (34.5 \text{ الف})$$

و ضریب جذب انرژی کامپتون، μ_{ce} ، از تفاضل ضریب پراکندگی کامپتون از ضریب کل کامپتون قابل محاسبه است

$$\mu_{ce} = \mu_{ct} - \mu_{cs} \quad (34.5 \text{ ب})$$



شکل ۱۷.۵ سطح مقطع کل کامپتون برای يك الکترون آزاد.

جذب فوتوالکتریک

همان گونه که در فصل ۳ گفته شد، برهم کنش میان یک فوتون و یک الکترون مقید به اتم را، هنگامی که انرژی بستگی مساوی یا کمتر از انرژی فوتون است، اثر فوتوالکتریک می نامیم. در این فرایند، فوتون فرودی به کلی ناپدید می شود. ذره یوننده اصلی حاصل از این برهم کنش، فوتوالکترون است که انرژی اش از معادله (۱۳.۳) به دست می آید

$$E_{pe} = hf - \phi$$

انرژی فوتوالکترون عمدتاً از طریق برانگیزش و یونش در محیط جذب، تلف می شود. انرژی بستگی ϕ از طریق تابش فلوئورسانسی که در پی برهم کنش اولیه رخ می دهد، به محیط جذب منتقل می شود. این فوتونهای کم انرژی هم در نقاطی نه چندان دور از محل تولیدشان، در برهم کنش فوتوالکتریک دیگری شرکت می کنند و جذب الکترونهای خارجی می شوند. اثر فوتوالکتریک برای فوتونهای کم انرژی و جذب کننده های با اعداد اتمی زیاد، حائز اهمیت است. سطح مقطع این واکنش به تقریب بر حسب $Z^4 \lambda^3$ تغییر می کند. همین بستگی شدید جذب فوتوالکتریک به عدد اتمی Z است که سرب را برای حفاظت در برابر پرتوهای γ ، عنصری چنان شایان توجه کرده است. اثر فوتوالکتریک در جذب کننده های با عدد اتمی خیلی پایین، از اهمیت زیادی برخوردار نیست.

فروپاشی فوتونی

در فروپاشی فوتونی، یک فوتون گاما در هسته جاذب گیراندازی می شود و آنگاه، در بیشتر موارد، یک نوترون از هسته گسیل می شود. این یک نوع واکنش آستانه ای است که در آن انرژی فوتون باید از کمینه معینی که به هسته جاذب بستگی دارد، بیشتر باشد. این واکنش، خاص انرژیهای بالاست و جز در موارد استثنایی، نوعی سازوکار جذب برای گامای حاصل از ایزوتوپهای پرتوزا محسوب نمی شود. یکی از موارد استثنایی مهم، هسته ${}^9\text{Be}$ است که در آن انرژی آستانه فقط برابر 1.666 MeV است. از این واکنش، ${}^9\text{Be}(\gamma, n){}^8\text{Be}$ به عنوان چشمه آزمایشگاهی نوترونهای تک انرژی استفاده می شود. برای فوتونهای بسیار پر انرژی حاصل از شتابدهنده های الکترون، نظیر بتاترونها و سنکروترونها، فروپاشی فوتونی واکنشی حائز اهمیت به شمار می رود. در اینجا نیز، این نکته مورد نظر است که فروپاشی فوتونی به تولید نوترون منجر می شود. به طور کلی، سطح مقطع فروپاشی فوتونی خیلی کوچکتر از سطح مقطع کلی است که از معادله (۳۵.۵) به دست می آید. از این رو، در محاسبات مربوط به حفاظ گذارها، سطح مقطع فروپاشی فوتونی را معمولاً بی اهمیت می گیرند و از آن صرف نظر می کنند.

فروپاشی فوتونی، بدان دلیل واکنشی آستانه ای است که انرژی افزوده شده به هسته جاذب باید دستکم برابر با انرژی بستگی یک نوکلئون در هسته باشد. علاوه بر این، در این

فروپاشی، گسیل يك نوترون از هسته برگسیل يك پرتون ترجیح دارد. زیرا نوترون برای فرار از هسته ملزم نیست که برسد پتانسیل کولنی غلبه کند، و بدین جهت آستانه پایینتری دارد. گستره انرژی آستانه برای گسیل نوترون در فروپاشی فوتونی، از 1.66 MeV برای بریلیم تا حدود 8.5 MeV تغییر می‌کند. برای هسته‌های سبک، انرژی آستانه به‌صورتی نامتقارن افت‌وخیز دارد. در گستره اعداد جرمی ۲۵ تا ۱۳۵، همراه با افزایش عدد جرمی، انرژی آستانه به آهستگی تا حدود 8.5 MeV افزایش و سپس به حدود 6 MeV کاهش می‌یابد. قسمتی از انرژی فوتون که افزون بر انرژی آستانه است، به‌صورت انرژی جنبشی نوترون گسیل شده پدیدار می‌شود و یا، اگر این فزونی انرژی به قدر کافی زیاد باشد، ممکن است باعث گسیل ذرات باردار از هسته جاذب شود.

اثرات جمعی

ضریب تضعیف یا سطح مقطع، احتمال خروج فوتون از يك باریکه را در شرایط هندسی خوب که در آن فرض می‌شود که هر گونه برهم‌کنشی فوتون را از باریکه خارج می‌کند، به‌دست می‌دهد. بدین ترتیب، ضریب تضعیف کل از جمع ضرایب تضعیف مربوط به سه واکنش مذکور در بالا به‌دست می‌آید

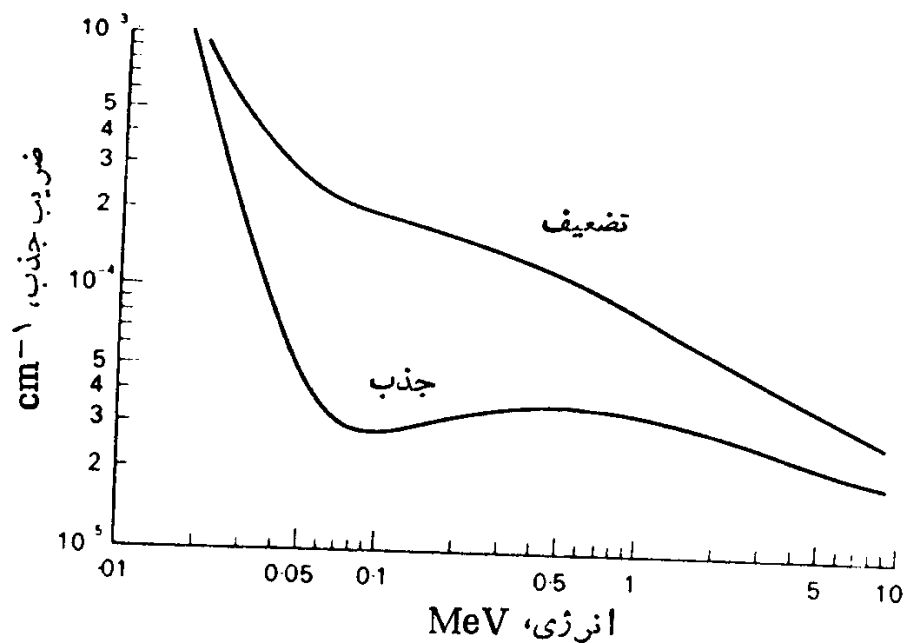
$$\mu_t = \mu_{pe} + \mu_{cs} + \mu_{pp} \quad (35.5)$$

که در آن سه جمله دست راست به ترتیب عبارت‌اند از ضریب تضعیف فوتوالکتریک، ضریب تضعیف پراکندگی کامپتون، و ضریب تضعیف تولید زوج. در عملیات مربوط به طراحی حفاظ‌گذاریها، برای محاسبه تضعیف تابش از ضریب تضعیف معادله (۳۵.۵) استفاده می‌شود.

معادله (۳۵.۵)، کسر انرژی خارج‌شده از باریکه را به‌ازای واحد مسافت طی‌شده در ماده جاذب، به‌دست می‌دهد. این کسر از انرژی منتقل شده به ماده جاذب، فقط انرژیایی را شامل می‌شود که از طریق فوتوالکتریک، الکترون کامپتون، و زوج الکترون-پوزیترون به جاذب می‌رسند. انرژیایی که از طریق فوتون پراکنده در برهم‌کنش کامپتون و تابش تابودی پس از تولید زوج، به ماده جاذب منتقل می‌شوند، در کسر مورد بحث در نظر گرفته نشده‌اند. ضریب جذب انرژی که آن را ضریب جذب حقیقی هم می‌گویند، از معادله زیر به‌دست می‌آید

$$\mu_e = \mu_{pe} + \mu_{ce} + \mu_{pp} \left(\frac{hf - 1.02}{hf} \right) \quad (36.5)$$

در محاسبات مربوط به دزتابشی از همین معادله استفاده می‌شود. ضریب جذب حقیقی و ضریب تضعیف کل برای هوا در شکل ۱۸.۵ نموده شده‌اند. ضرایب جذب انرژی برای آب، هوا، استخوان توپر، و عضلات را در جدول ۳.۵ نشان داده‌ایم.



شکل ۱۸.۵ ضریب تضعیف و ضریب جذب پرتو گاما به صورت تابعی از انرژی.

جدول ۳.۵ مقادیر ضریب جذب انرژی.

انرژی فوتون (MeV)	ضریب جرمی جذب انرژی، (μ_{en}/ρ) ، cm^2/g			
	آب	هوا	استخوان توپر	عضلات
0.010	4.89	4.66	19.0	4.96
0.015	1.32	1.29	5.89	1.36
0.020	0.523	0.516	2.51	0.544
0.030	0.147	0.147	0.743	0.154
0.040	0.0647	0.0640	0.0305	0.0677
0.050	0.0394	0.0384	0.158	0.0409
0.060	0.0304	0.0292	0.0979	0.0312
0.080	0.0253	0.0236	0.0520	0.0255
0.10	0.0252	0.0231	0.0386	0.0252
0.15	0.0278	0.0251	0.0304	0.0276
0.20	0.0300	0.0268	0.0302	0.0297
0.30	0.0320	0.0288	0.0311	0.0317
0.40	0.0329	0.0296	0.0316	0.0325
0.50	0.0330	0.0297	0.0316	0.0327
0.60	0.0329	0.0296	0.0315	0.0326
0.80	0.0321	0.0289	0.0306	0.0318
1.0	0.0311	0.0280	0.0297	0.0308
1.5	0.0283	0.0255	0.0270	0.0281
2.0	0.0260	0.0234	0.0248	0.0257
3.0	0.0227	0.0205	0.0219	0.0225
4.0	0.0205	0.0186	0.0199	0.0203
5.0	0.0190	0.0173	0.0186	0.0188
6.0	0.0180	0.0163	0.0178	0.0178
8.0	0.0165	0.0150	0.0165	0.0163
10.0	0.0155	0.0144	0.0159	0.0154

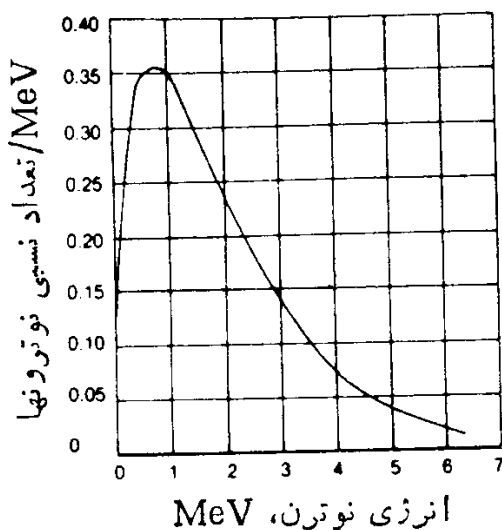
نوترونها

تولید

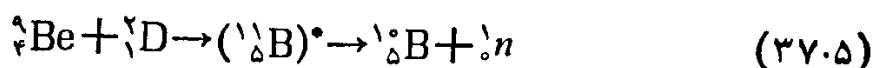
زایاترین چشمه نوترون را باید رآکتور هسته‌ای دانست. شکافت هسته‌های اورانیم یا پلوتونیم در رآکتور هسته‌ای، با گسیل چند نوترون همراه است. همان‌طور که در شکل ۱۹.۵ دیده می‌شود، گستره انرژی نوترونها حاصل از شکافت خیلی وسیع است. قله این توزیع انرژی در 7 MeV ، و مقدار میانگین آن در 2 MeV است.

به استثنای چند شکافت پاره بسیار کوتاه-عمر، هیچ ایزوتوپ پرتوزایی وجود ندارد که نوترون گسیل کند. اما، کالیفرنیم ^{252}Cf یک گسیلنده آلفاست که به‌طور متوسط در مقابل هر 313 واپاشی آلفا، 10 واپاشی از نوع شکافت هسته‌ای خود به خود دارد. نیمه عمر ^{252}Cf در واپاشی آلفا برابر با 273 سال است که با در نظر گرفتن شکافت هسته‌ای خود به خود، نیمه عمر مؤثر آن 265 سال می‌شود. بدین ترتیب، کالیفرنیم ^{252}Cf را می‌توان ایزوتوپ پرتوزایی در نظر گرفت که گسیلنده نوترون است. آهنگ گسیل هر میکروگرم ^{252}Cf برابر $10^6 \times 231$ نوترون در هر ثانیه به دست آمده است. توزیع انرژی نوترونها گسیل شده، گستره پهنای دارد. محتملترین انرژی در حدود 1 MeV ، و مقدار متوسط توزیع انرژی در حدود 23 MeV است.

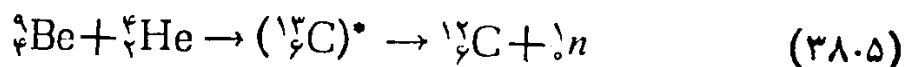
خصوصیات همه چشمه‌های نوترونی دیگر، به نوع واکنشی که نوترون از آن حاصل می‌شود بستگی دارد. با استفاده از شتابدهنده‌ها و از طریق واکنشهای هسته‌ای گوناگون، می‌توان باریکه‌های نوترونی متنوعی تولید کرد. برای نمونه، از بمباران بریلیم با دوترونها حاصل از یک سیکلوترون، طبق واکنش زیر می‌توان نوترون تولید کرد



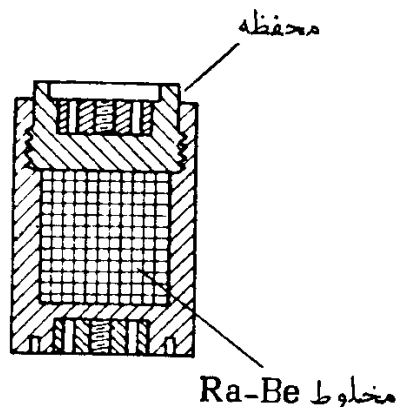
شکل ۱۹.۵ توزیع انرژی نوترونها حاصل از شکافت. محتملترین انرژی برابر 7 MeV و انرژی میانگین برابر 2 MeV است.



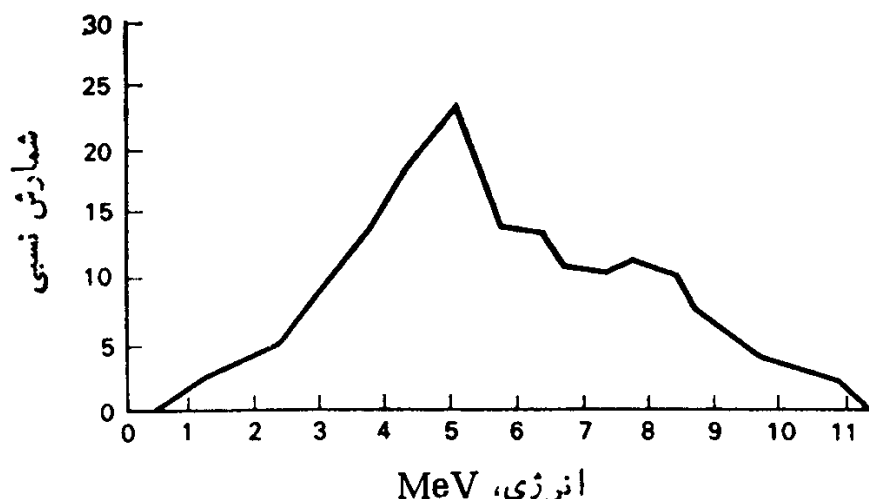
جمله داخل برانتر را يك هسته مرکب می نامند، علامت ستاره نشان می دهد که هسته در حالتی برانگیخته قرار دارد. هسته مرکب، ضمن پیشرفت به مرحله بعدی واکنش، در فاصله کوتاهی (در فاصله کمتر از 10^{-8} ثانیه) خود را از قید انرژی برانگیختگی رها می سازد. برای کارهای آزمایشگاهی که به چشمه های نوترونی کوچک نیاز دارند، می توان از فروپاشی فوتونی بریلیم استفاده کرد. در يك چشمه متداول دیگر، از بمباران بریلیم با ذرات آلفا نوترون به دست می آید. در این مورد، واکنش هسته ای نوترون را عبارت است از



چشمه ذرات آلفا در اینجا، یکی از عناصر پرتوهای رادیم، پولونیم، وپلوتونیم است. گسیلنده آلفا را به صورت پودر با بریلیم پودر شده و نرم کاملاً مخلوط می کنند، و مخلوط را مطابق شکل ۲۰.۵ در کپسولی سربسته قرار می دهند. نوترونهایی که تولید می شوند، انرژی زیادی دارند. در تمام موارد که با این واکنش نوترون تولید می شود، انرژی نوترونها مطابق شکل ۲۱.۵ در طیف پهنای گسترده است. این پخش انرژی نوترونهای حاصل از ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ ، با مورد نوترونهای تك انرژی حاصل از فروپاشی فوتونی که در آن از فوتونهای تك انرژی استفاده می شود کاملاً متفاوت است. در واکنش (α, n) ، انرژی معادل اختلاف جرم میان عوامل واکنش-زا و محصولات واکنش و همچنین انرژی جنبشی ذره بمباران کننده، بین نوترون و هسته پس زننده تقسیم می شود. در چشمه های متداول (α, n) ، بخشی از انرژی ذره آلفا از طریق خود-جذبی در چشمه تلف می شود. بدین گونه، ذرات آلفایی که باعث ایجاد واکنش می شوند، گستره ای پهنای انرژی خواهند داشت و به همین جهت است که نوترونهای حاصل نیز طیفی گسترده از انرژی دارند. با افزایش انرژی ذرات آلفا، بهره نوترونی حاصل از چشمه (α, n) هم افزایش می یابد، زیرا هر چه انرژی ذره آلفا بیشتر باشد آسانتر می تواند با نفوذ از سد کولنی وارد هسته شود. دو فهرست



شکل ۲۰.۵ نوعی چشمه نوترون $\text{Ra-Be}(\alpha, n)$ در يك محفظه سربسته.



شکل ۲۱۰۵ توزیع انرژی نوترونها حاصل از Po-Be.

از چشمه‌های نوترونی حاصل از واکنشهای (γ, n) و (α, n) را به ترتیب در جدولهای ۴۰۵ و ۵۰۵ نشان داده‌ایم.

رده‌بندی

از آنجا که نوع واکنشی که نوترون انجام می‌دهد قویاً به انرژی‌اش وابسته است، نوترونها را بر حسب انرژی‌شان رده‌بندی می‌کنند. نوترونها را بر انرژی‌شان به آن دسته از حدود ۱ MeV که نوترونها می‌گویند، در طرف دیگر طیف انرژی، نوترونها را باید نام برد که میانگین انرژی جنبشی‌شان همانند میانگین انرژی مولکولهای

جدول ۴۰۵ چشمه‌های نوترون حاصل از (γ, n) .

چشمه	نیمه عمر	میانگین انرژی نوترون (MeV)	بهره	
			$\frac{n}{s}/\text{Ci}$	$\frac{n}{s}/\text{MBq}$
$^{24}\text{Na} + \text{Be}$	15 hr	0.83	1.3×10^5	3.5
$^{24}\text{Na} + \text{D}_2\text{O}$	15 hr	0.22	2.7×10^5	7.3
$^{56}\text{Mn} + \text{Be}$	2.58 hr	0.1(90%), 0.3(10%)	2.9×10^4	0.8
$^{56}\text{Mn} + \text{D}_2\text{O}$	2.58 hr	0.22	3.1×10^3	0.08
$^{72}\text{Ga} + \text{Be}$	14.2 hr	0.78	5×10^4	1.4
$^{72}\text{Ga} + \text{D}_2\text{O}$	14.2 hr	0.13	6×10^4	1.6
$^{88}\text{Y} + \text{Be}$	88 d	0.16	1×10^5	2.7
$^{88}\text{Y} + \text{D}$	88 d	0.31	3×10^3	0.08
$^{116}\text{In} + \text{Be}$	54 min	0.30	8.2×10^3	0.2
$^{124}\text{Sb} + \text{Be}$	60 d	0.024	1.9×10^5	5.1
$^{140}\text{La} + \text{Be}$	40 hr	0.62	3×10^3	0.08
$^{140}\text{La} + \text{D}_2\text{O}$	40 hr	0.15	8×10^3	0.2
$\text{Ra} + \text{D}_2\text{O}$	1600 yr	0.12	1×10^3	0.03

جدول ۵.۵ چشمه‌های نوترون حاصل از (α, n) .

چشمه	نیمه‌عمر	میانگین انرژی نوترون (MeV)	بهره	
			$\frac{n}{s}/\text{Ci}$	$\frac{n}{s}/\text{MBq}$
Ra + Be	1600 yr	5	1.7×10^7	459
Ra + B	3.8 d	3	6.8×10^6	184
$^{222}\text{Em} + \text{Be}$	3.8 d	5	1.5×10^7	405
$^{210}\text{Po} + \text{Be}$	138 d	4	3×10^6	81.1
$^{210}\text{Po} + \text{B}$	138 d	2.5	9×10^5	24.3
$^{210}\text{Po} + \text{F}$	138 d	1.4	4×10^5	10.8
$^{210}\text{Po} + \text{Li}$	138 d	0.42	9×10^4	2.4
$^{239}\text{Pu} + \text{Be}$	24,000 yr	4	10^6	27

است که در همان محیط قرار دارند. از این نظر، نوترونها گرمایی از مولکولهای گازی که در همان دما باشند تمایز ناپذیرند. رابطه میان انرژی جنبشی مولکولهای گاز و دمای آن، از توزیع ماکسول-بولتزمن به دست می‌آید

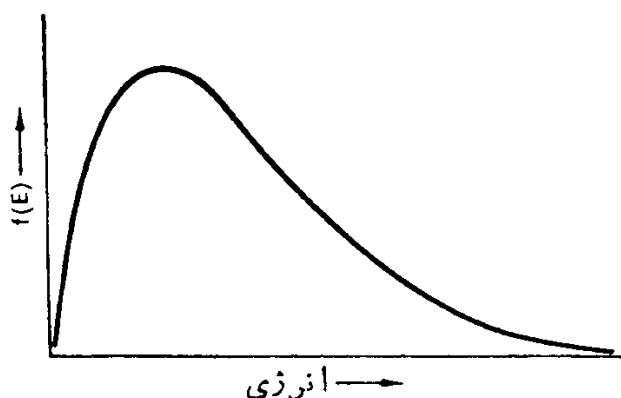
$$f(E) = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} e^{-E/kT} E^{1/2} \quad (39.5)$$

که در آن $f(E)$ کسر مولکولهای گاز (یا نوترونها) با انرژی E در هر واحد از بازه انرژی، k ثابت بولتزمن (برابر $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ یا $8.6 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)، و T دمای مطلق گاز بر حسب K است.

محتملترین انرژی که قله منحنی شکل ۲۲.۵ نمایشگر آن است، از معادله زیر به دست می‌آید

$$E_{\text{mp}} = kT \quad (40.5)$$

و انرژی میانگین مولکولهای گاز، در دمای معلوم T ، چنین است



شکل ۲۲.۵ توزیع ماکسول-بولتزمن برای انرژی مولکولهای گاز.

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT \quad (۲۱.۵)$$

برای نوترونهایی که در دمای ۲۹۳ K قرار دارند، محتملترین انرژی ۰.۰۲۵ eV است. مراد از نوترونهای «گرمایی»، غالباً نوترونهایی با همین انرژی است. سرعت متناظر با این انرژی از رابطه زیر به دست می‌آید

$$\frac{1}{2} m v^2 = kT \quad (۲۲.۵)$$

که مقدار عددی آن برای نوترونهای «گرمایی»، برابر $v = ۲۲۰۰\text{ m/s}$ است. از نوترونهایی که انرژی‌شان در ناحیه میانی انرژی گرمایی و تند قرار می‌گیرد، با عناوین گوناگونی یاد می‌کنند که نوترونهای میانی، نوترونهای تشدید، و نوترونهای کند از آن جمله است. تمام این صفتهای توصیفی را آزادانه و به تقریب به کار می‌برند، و مفهوم دقیق آنها را باید از مضمون مورد بحث استنباط کرد.

برهم‌کنش

همه نوترونها به هنگام تولید، نوترونهای تند به شمار می‌روند. به طور کلی، نوترونهای تند ابتدا در اثر برخورد کشسان با اتمهای محیط، انرژی‌شان را از دست می‌دهند و پس از کند شدن و رسیدن به انرژی گرمایی یا نزدیک به آن، توسط هسته‌های ماده جذب گیراندازی می‌شوند. اگرچه وقوع چند نوع واکنش هسته‌ای برای نوترونها امکان پذیر است، ولی از دیدگاه متخصص فیزیک بهداشت، واکنشهای اصلی همان پراکندگی کشسان و گیراندازی هستند که مورد گیراندازی با گسیل فوتون یا ذره‌ای دیگر از هسته جذب کننده تعقیب خواهد شد.

هنگامی که ماده جذب کننده را در مقابل باریکه‌ای موازی از نوترونها قرار می‌دهیم و مانند مورد پرتوهای گاما در شکل ۱۰.۵ شدت نوترونهای عبوری را اندازه گیری می‌کنیم، ملاحظه می‌شود که نوترونها هم به طور نمایی از باریکه محو می‌شوند. برای توصیف توانایی يك ماده جذب در محو نوترونها از باریکه، به جای استفاده از ضرایب جذب جرمی یا خطی، معمولاً فقط سطح مقطع میکروسکوپیك σ ماده جذب را مشخص می‌کنند. سطح مقطع ماکروسکوپیك Σ از حاصل ضرب σN که در آن N تعداد اتمهای جذب در هر cm^2 است، به دست می‌آید. بدین ترتیب، شدت نوترونهای خارج شده از باریکه را به صورت زیر معلوم می‌کنند

$$I = I_0 e^{-\sigma N t} \quad (۲۳.۵)$$

سطح مقطع نوترون، شدیداً وابسته به انرژی است. اگر نوترون بتواند با بیش از يك سازوکار از باریکه خارج شود، سطح مقطع کل را به صورت حاصل جمع سطح مقطعهای همه واکنشهای ممکن در نظر می‌گیرند.

مثال ۱۱.۵

در آزمایشی که به منظور اندازه گیری سطح مقطع کل سرب برای نوترونهای 10 MeV طراحی شده بود، معلوم شد که 1 cm از ماده جاذب سرب، شار نوترون را به 84.5% از مقدار اولیه اش تقلیل می دهد. وزن اتمی سرب برابر 207.21 و وزن مخصوص آن 11.3 است. سطح مقطع کل سرب را محاسبه کنید.

حل: چگالی اتمی سرب عبارت است از

$$\frac{6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{207.21 \text{ g/mol}} \times 11.3 \text{ g/cm}^3 = 3.29 \times 10^{22} \text{ atom/cm}^3$$

شدت نسبی باریکه خروجی نوترون، چنین می شود

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\sigma N t}$$

$$0.845 = e^{-\sigma \times 3.29 \times 10^{22} \times t}$$

که از حل آن، سطح مقطع میکروسکوپیك قابل محاسبه است

$$\ln \frac{1}{0.845} = 3.29 \times 10^{22} \sigma$$

$$\sigma = \frac{0.0168}{3.29 \times 10^{22}} = 5.1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$$

یعنی $\sigma = 5.1 \text{ b}$ است، و سطح مقطع ماکروسکوپیك سرب عبارت است از

$$\Sigma = \sigma N = 5.1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 \times 3.29 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} = 0.168 \text{ cm}^{-1}$$

پراکندگی

نوترونها پس از برخورد با هسته ها ممکن است به طور کشسان یا ناکشسان پراکنده شوند. در حالتی که برخورد ناکشسان است، بخشی از انرژی جنبشی به هسته هدف منتقل می شود و آن را به حالت برانگیخته می برد، و سپس این انرژی برانگیختگی به صورت يك فوتون گاما از هسته گسیل می شود. این برهم کنش را با استفاده از مدل هسته مرکب به بهترین وجه می توان توصیف کرد. بنا بر این مدل، هسته هدف ابتدا نوترون را گیراندازی می کند، و سپس آن را همراه با فوتون گاما مجدداً گسیل می دارد. این پدیده يك واکنش آستانه ای است. انرژی آستانه نوترون از بی نهایت برای هیدروژن (پراکندگی ناکشسان با هیدروژن قابل تحقق نیست) تا حدود 6 MeV برای اکسیژن و تا کمتر از 1 MeV برای اورانیم در تغییر است. به طور کلی سطح مقطع پراکندگی ناکشسان كوچك است. مقدار آن برای

نوترونهاى تند كم انرژی از مرتبه ۱ بارن يا كمتر است، ولى همراه با افزايش انرژی نوترون مقدار سطح مقطع ناكشسان افزايش مى‌يابد و به سطح مقطع هندسى هسته هدف نزديك مى‌شود.

محتملترين برهم‌كنش بين نوترونهاى تند و مواد با عدد اتمى پايين، پراكندگى كشسان است. اين برهم‌كنش، برخوردی از نوع «گلوله بيليارد» است كه در آن هم‌پايستگى انرژی جنبشی و هم پايستگى تكانه برقرار مى‌ماند. با به‌كار بردن اين قوانين پايستگى، مى‌توان نشان داد كه انرژی نوترون پراكنده، E ، پس از يك برخورد سر به سر چنين مى‌شود

$$E = E_0 \left(\frac{M-m}{M+m} \right)^2 \quad (44.5)$$

كه در آن E_0 انرژی نوترون فرودى، m جرم نوترون فرودى، و M جرم هسته پراكنده است.

انرژی انتقالی به هسته هدف برابر است با $(E_0 - E)$ كه بنا بر معادله (44.5) به صورت زير در مى‌آيد

$$E_0 - E = E_0 \left[1 - \left(\frac{M-m}{M+m} \right)^2 \right] \quad (45.5)$$

از معادلات (44.5 و 45) چنين بر مى‌آيد كه نوترون، در برخورد سر به سر با يك هسته هيدروژن، ممكن است تمام انرژی‌اش را به هسته هيدروژن منتقل كند. اما در برخورد با هسته‌هاى سنگينتر، تمام انرژی نوترون نمى‌تواند در يك تك برخورد منتقل شود. براى مثال، در برخورد با اكسيژن، بنا بر معادله (45.5) حداكثر مقدار نسبى انتقال انرژی جنبشی نوترون در يك تك برخورد برابر $(E_0 - E)/E_0$ ، يعنى فقط در حدود ۲۲٫۲٪ است. اين نكته نشان مى‌دهد كه در كار كندسازى نوترونها، اگر براساس «هر برخورد» قضاوت شود، هسته‌هاى با عدد جرمى كوچك مؤثرتر از هسته‌هاى با عدد جرمى بزرگ خواهند بود.

معادلات (44.5) و (45.5) فقط براى برخوردهاى سر به سر برقرارند. اما بيشتر برخوردها از نوع سر به سر نيستند، و در نتيجه انرژی منتقل شده به هسته‌هاى هدف كمتر از مقادير بيشينه حاصل از معادلات بالاست.

كاهش متوسط لگاريتم انرژی نوترون تند، در گذار نوترون از محيط كندساز و در طى برخوردهاى متوالى با هسته‌ها، به ازاي هر برخورد ثابت مى‌ماند (كه آن را ميانگين كاهش لگاريتمى انرژی مى‌گويند). اين مقدار ميانگين كاهش، مستقل از انرژی نوترون و فقط تابع جرم هسته‌هاى پراكنده است. ميانگين كاهش لگاريتمى انرژی چنين تعريف مى‌شود

$$\zeta = \overline{\Delta \ln E} = \overline{\ln E_0 - \ln E} = \overline{\ln \frac{E_0}{E}} = -\overline{\ln \frac{E}{E_0}} \quad (46.5)$$

و می توان نشان داد که مقدار آن به صورت زیر است

$$\zeta = 1 + \frac{\alpha \ln \alpha}{1 - \alpha} \quad (47.5)$$

که در آن $\alpha = [(M - m)/(M + m)]^2$ همان عاملی است که در معادله (۴۴.۵) هم به کار رفته است. اگر محیط کندساز شامل n نوع هسته با سطح مقطع پراکندگی میکروسکوپی σ_{si} و میانگین کاهش لگاریتمی انرژی ζ_i برای هسته i ام باشد، مقدار میانگین ζ برای آن چنین می شود

$$\zeta = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{si} N_i \zeta_i}{\sum_{i=1}^n \sigma_{si} N_i} \quad (48.5)$$

چون داریم

$$\overline{\ln \frac{E}{E_0}} = -\zeta$$

$$\frac{E}{E_0} = e^{-\zeta}$$

کسر متوسط انرژی نوترون فرودی که در خلال یک برخورد به هسته هدف منتقل می شود، چنین خواهد شد

$$f = 1 - \frac{E}{E_0} = 1 - e^{-\zeta} \quad (49.5)$$

بدین ترتیب، در مورد هیدروژن ($\zeta = 1$) مقدار متوسط انتقال انرژی در برخورد با یک نوترون تند برابر ۶۳٪ انرژی جنبشی نوترون می شود، در حالی که در مورد کربن ($\zeta = 0.159$) به طور متوسط فقط در حدود ۱۴.۷٪ از انرژی جنبشی نوترون جذب هسته ای می شود که در برخورد کشسان با نوترون شرکت دارد. هسته ضربه دیده، پس از دریافت این بخش از انرژی جنبشی به صورت یک ذره یوننده درمی آید، و انرژی جنبشی اش را با ایجاد برانگیزش و یونش در محیط جذب از دست می دهد.

فاصله طی شده توسط یک نوترون تند، از لحظه ورودش به محیط کندساز تا لحظه گرمایی شدنش، بستگی به تعداد برخوردهای آن و مسافت بین برخوردها دارد. مسیر واقعی

نوترون هر چند که به علت انحرافهای ناشی از برخورد پریپیچ وخم است، ولی مقدار متوسط مسافت مستقیم نوترون که طول پخش تند یا طول کندسازی نامیده می شود، قابل تعیین است. مربع طول پخش تند را سن فرمی نوترون می نامند. مسافت طی شده توسط نوترون گرمایی تا لحظه جذب شدنش را طول پخش گرمایی می گویند. طول پخش گرمایی به صورت ضخامتی از محیط کندساز تعریف می شود که بتواند باریکه ای از نوترونهای گرمایی را به اندازه ضریب e تضعیف کند. از این رو، تضعیف باریکه ای از نوترونهای گرمایی را توسط ماده ای به ضخامت x و طول پخش گرمایی L ، می توان به صورت زیر نوشت

$$n = n_0 e^{-x/L} \quad (50.5)$$

اصطلاحات طول پخش تند و طول پخش گرمایی، فقط برای موادی قابلیت کاربرد دارند که سطح مقطع جذب در آنها بسیار کوچک است. هنگامی که این شرط برقرار نباشد، مثل مورد بور یا کادمیم، تضعیف باریکه نوترون گرمایی از معادله (۴۳.۵) قابل تعیین است. اگرچه طولهای پخش تند و گرمایی را می توان حساب کرد، ولی به دلایل فرضیه ای که در این محاسبات وارد می شوند ترجیح داده می شود که مقادیر این پارامترها را اندازه گیری کنند. مقادیر طول پخش تند و گرمایی نوترونهای حاصل از شکافت را برای چند نوع محیط کندساز، در جدول ۶.۵ آورده ایم.

در مورد یک چشمه نقطه ای، به شدت n_0 نوترون در هر ثانیه که در محیطی بدون تکثیر (محیطی که ماده شکافت پذیر ندارد) و کروی شکل به شعاع R ، به طول پخش گرمایی L ، و به ضریب پخش D قرار داشته باشد، شار نوترونهای خارج شونده از سطح محیط عبارت است از

$$\phi = \frac{n_0 e^{-R/L}}{4\pi R D} \quad (51.5)$$

جدول ۶.۵ طول پخش تند و طول پخش گرمایی در چند ماده انتخابی.

ماده	طول پخش تند	طول پخش گرمایی	ضریب پخش
H ₂ O	۵۷۵ cm	۲۸۸ cm	۰.۱۶ cm
D ₂ O	۱۱	۱۷۱	۰.۸۷
Be	۹.۹	۲۴	۰.۵۰
C (گرافیت)	۱۷.۳	۵۰	۰.۸۴

مثال ۱۲.۵

چشمه نوترونی از Pu-Be، که در هر ثانیه تعداد 10^6 نوترون گسیل می‌کند، در مرکز یک حفاظ کروی از آب به قطر ۵۰ cm قرار گرفته است. در هر ثانیه از هر سانی متر مربع سطح حفاظ، چند نوترون گرمایی خارج می‌شود؟

حل: چون شعاع حفاظ آب خیلی بزرگتر از طول پخش تند مندرج در جدول ۶.۵ است، در این محاسبه می‌توان فرض کرد که تمام نوترونها ی تند به صورت گرمایی در می‌آیند و نوترونها ی گرمایی از مرکز کره به طرف خارج در حال پخش هستند. با قرار دادن مقادیر معلوم در معادله (۵۱.۵)، حاصل می‌شود

$$\phi = \frac{10^6}{4\pi \times 25 \times 0.16} e^{-25/2.88} = 3.4 \frac{\text{نوترون}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

جذب

از بحث بالا معلوم می‌شود که نوترونها ی تند، اگر با موادی که اعداد اتمی پایین دارند برهم‌کنش کنند، سرعت انرژی‌شان را از طریق برخوردهای کشسان از دست می‌دهند. نوترونها هر چه به انرژیهای گرمایی یا نزدیک به گرمایی نزدیکتر می‌شوند، احتمال گیراندازی‌شان توسط هسته جاذب بیشتر می‌شود. هنگامی که انرژی نوترون خیلی کم می‌شود، سطح مقطع جذب بسیاری از هسته‌ها با جذر انرژی جنبشی نوترون، و بنابراین با سرعت نوترون، نسبت عکس پیدا می‌کند

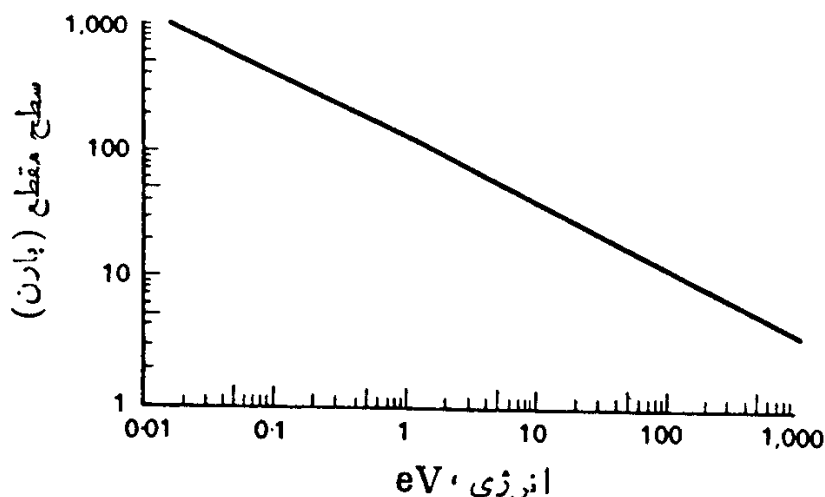
$$\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \propto \frac{1}{v} \quad (52.5)$$

در جذب نوترونها ی کند، این معادله را تحت عنوان «قانون یک-روی- v » می‌شناسند. همان‌طور که در شکل ۲۳.۵ دیده می‌شود، این رابطه برای ${}^1_0\text{B}$ از انرژی ۰.۰۰۱ eV تا انرژی ۱۰۰۰ eV معتبر است. سطح مقطع نوترون گرمایی، معمولاً برای نوترونها ی در نظر گرفته می‌شود که محتملترین انرژی‌شان برابر ۰.۰۲۵ eV است. اگر سطح مقطع در انرژی E_0 برابر σ_0 باشد، در این صورت در گستره اعتبار قانون $1/v$ ، سطح مقطع در انرژی دیگر E چنین به دست می‌آید

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \sqrt{\frac{E_0}{E}} \quad (53.5)$$

مثال ۱۳.۵

سطح مقطع بور در واکنش ${}^1_0\text{B}(n, \alpha){}^4_7\text{Li}$ برای نوترونها ی ۰.۰۲۵ eV برابر ۷۵۳ بارن است. سطح مقطع بور برای نوترونها ی ۵۰ eV چقدر است؟



شکل ۲۳.۵ سطح مقطع جذب نوترون در بور که اعتبار قانون $1/v$ را برای نوترونهای با انرژی ۰.۰۲ eV تا ۱۰۰۰ eV نشان می‌دهد. معادله منحنی به صورت $\alpha = 116/\sqrt{\text{eV}}$ (بارن) است.

حل: با قراردادن مقادیر معلوم در معادله (۵۳.۵) حاصل می‌شود

$$\sigma = 753 \sqrt{\left(\frac{0.025}{50}\right)} = 1678 \text{ b}$$

در فهرست زیر، مشخصات چند واکنش گیراندازی را که در فیزیک بهداشت از اهمیت عملی برخوردارند آورده‌ایم

$${}^1\text{H}(n, \gamma){}^2\text{H} \quad \sigma = 0.33 \text{ b} \quad (54.5)$$

$${}^{14}\text{N}(n, p){}^{14}\text{C} \quad \sigma = 1.75 \text{ b} \quad (55.5)$$

$${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li} \quad \sigma = 4.201 \times 10^3 \text{ b} \quad (56.5)$$

$${}^{113}\text{Cd}(n, \gamma){}^{114}\text{Cd} \quad \sigma = 2.1 \times 10^4 \text{ b} \quad (57.5)$$

چون H و N از عناصر عمده سازنده بافت بدن انسان هستند، معادلات (۵۴.۵) و (۵۵.۵) از لحاظ دزسنجی نوترونی حائز اهمیت اند. اهمیت معادله (۵۶.۵) در طراحی دستگاههای اندازه‌گیری نوترون و همچنین در حفاظت نوترونی است، درحالی‌که اهمیت معادله آخر عمدتاً در کار حفاظ‌گذاری است. باید توجه داشت که در واکنشهای نوترون با هیدروژن و کادمیم، پرتوهای گامای پرا انرژی گسیل خواهند شد، درحالی‌که گیراندازی نوترون گرمایی در ${}^{10}\text{B}$ در ۹۳٪ از موارد واکنش به آزادسازی یک پرتو گامای کم انرژی (0.48 MeV) منجر می‌شود. گیراندازی یک نوترون گرمایی در هسته ${}^{14}\text{N}$ باعث گسیل یک پروتون با انرژی 0.6 MeV می‌شود.

فعالسازی نوترونی

فعالسازی نوترونی عبارت است از تولید يك نوع ایزوتوپ پرتوزا از طریق جذب نوترون. واکنش (n, p) در معادله (۵۵.۵) یکی از نمونه‌های فعالسازی است. در این مورد، محصول واکنش ^{14}C است. فعالسازی از طریق جذب نوترون، به‌چند دلیل در فیزیک بهداشت حائز اهمیت است. اولاً، فعالسازی بدین معنی است که هر ماده‌ای که تحت تابش نوترون قرار می‌گیرد ممکن است به ماده‌ای پرتوزا تبدیل شود، یعنی پس از خاتمه تابش نوترون هم ممکن است خطر تابش همچنان باقی بماند. ثانیاً، با استفاده از فعالسازی می‌توان به روش ساده‌ای شار نوترونها را اندازه‌گیری کرد. انجام این کار به این صورت است که مقدار معلومی از ماده فعال‌شونده را زیر تابش نوترون قرار می‌دهند، فعالیت حاصل را اندازه‌گیری و آنگاه، با در دست داشتن سطح مقطع واکنش، شار نوترون را محاسبه می‌کنند. در حوادث بحرانی (واکنشهای زنجیری کنترل نشده که به‌طور تصادفی ایجاد می‌شوند)، با استفاده از اندازه‌گیری پرتوایی ناشی از تابش نوترون می‌توان در نوترونها را محاسبه کرد. شیمییدانها هم در تجزیه با روش فعالسازی نوترونی از همین اصل استفاده می‌کنند. در این روش که برای بسیاری از عناصر از دیگر طریق‌های فیزیکی و شیمیایی حساستر است، چنین عمل می‌شود: نمونه مجهول را زیر تابش يك میدان نوترونی با شدت معلوم قرار می‌دهند، فعالیت حاصل را اندازه‌گیری و آنگاه مقدار مجهول را در نمونه محاسبه می‌کنند. علاوه بر این، تجزیه کیفی نمونه مجهول نیز به کمک بررسی طیف نمودی تابش ایجاد شده امکان پذیر است.

چنانچه يك نوع هسته پرتوزا را از طریق پرتو دهی نوترونی در دست تولید داشته باشیم، به‌طوری که واپاشی آن هم در طی تولید ادامه داشته باشد، تعداد اتمهای پرتوزای موجود در نمونه در هر لحظه از اختلاف بین آهنگ تولید و آهنگ واپاشی به دست می‌آید. چنین وضعی را از لحاظ ریاضی می‌توان با معادله زیر بیان کرد

آهنگ واپاشی — آهنگ تولید = آهنگ افزایش اتمهای پرتوزا

$$\frac{dN}{dt} = \phi \sigma n - \lambda N \quad (58.5)$$

که در آن ϕ شار یا تعداد نوترونها در سانتی متر مربع در ثانیه، σ سطح مقطع فعالسازی بر حسب cm^2 ، λ ثابت واپاشی نمونه پرتوزای حاصل، N تعداد اتمهای پرتوزا، و n تعداد اتمهای هدف است.

معادله (۵۸.۵) يك معادله دیفرانسیل خطی است که از انتگرال‌گیری آن حاصل می‌شود

$$\lambda N = \phi \sigma n (1 - e^{-\lambda t}) \quad (59.5)$$

در معادله (۵۹.۵)، عامل $\phi \sigma n$ را گاهی فعالیت اشباع می‌نامند، زیرا حداکثر مقدار

فعالیت قابل حصول را برای هر شار نوترونی، پس از پرتودهی بی‌نهایت طولانی، نشان می‌دهد.

مثال ۱۴.۵

نمونه‌ای محتوی مقدار نامعلومی از کروم را به مدت ۱ هفته در شار نوترون گرمایی $10^{11} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ تحت تابش قرار داده‌ایم. محصول واکنش را که ^{51}Cr است، در برابر شمارگر سوسوزن گذاشته‌ایم. این شمارگر که بازده کل آن ۱۰٪ است، آهنگ شمارش پرتوهای گاما را برابر ۶۰۰ شمارش در دقیقه به دست می‌دهد. در نمونه اولیه، چند گرم کروم موجود بوده است؟

حل: واکنش مورد نظر در این مسئله عبارت است از



سطح مقطع فعالسازی ^{50}Cr با نوترون گرمایی برابر 135 barn است، و 431% از تعداد اتمهای کروم طبیعی را اتمهای ^{50}Cr تشکیل می‌دهد. واپاشی کروم ۵۱ از طریق گیراندازی الکترون مداری و با نیمه عمر 278 روز صورت می‌گیرد، و در 98% از موارد واپاشی یک پرتو گاما با انرژی 323 MeV گسیل می‌شود. وزن اتمی کروم طبیعی برابر 52.01 است.

فعالیت نمونه در معادله (۵۹.۵) به صورت λN داده شده است. با قراردادن مقادیر عددی معلوم در معادله (۵۹.۵)، مقدار n یا تعداد اتمهای هدف به صورت زیر قابل محاسبه است

$$\frac{\text{شمارش}}{\text{s}} \times 10 \frac{\text{واپاشی}}{\text{شمارش}} = 10^{11} \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \times 135 \times 10^{-23} \frac{\text{cm}^2}{\text{atom}} \\ \times 0.098 \times 0.0431 n \text{ atom} (1 - e^{-0.693/278 \times 7})$$

$$n = \frac{10^2 \times 10^{23}}{10^{11} \times 135 \times 10^6 \times 10^{-1} \times 98 \times 10^{-2} \times 431 \times 10^{-2}} \\ = 1095 \times 10^{18} \text{ (اتم کروم)}$$

از آنجا که وزن اتمی کروم برابر 52.01 g/mol است، وزن کروم موجود در نمونه چنین به دست می‌آید

$$\frac{1095 \times 10^{18} \text{ atom}}{6.022 \times 10^{23} \text{ atom/mol}} \times 52.01 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 946 \times 10^{-5} \text{ g}$$

مسائل

۱. چگالی جیوه برابر 13.6 g/cm^3 و وزن اتمی آن برابر ۲۰۰.۶ است. چگالی اتمی جیوه را بر حسب اتم در سانتی متر مکعب محاسبه کنید.
۲. چگالی بلور کوارتز (SiO_2) برابر 2.65 g/cm^3 است. چگالی اتمی سیلیسیم و اکسیژن را بر حسب اتم در سانتی متر مکعب در کوارتز تعیین کنید.
۳. چگالی الکترونی یک قطعه آلومینیمی به ضخامت 5 mm و یک قطعه آهن با همان ضخامت چگالشی را با هم مقایسه کنید.
۴. متخصص فیزیک بهداشتی در واریسی یک آزمایشگاه به وجود یک سطح آلوده به مواد پرتوزا پی می برد. پس از رسم منحنی جذب، با استفاده از شمارگری با دریچه انتهایی بسیار نازک و جذب کننده های آلومینیمی متوجه می شود که برد پرتوبنای ناشی از ناحیه آلوده برابر 800 mg/cm^2 آلومینیم است (بدون مشاهده پرتوگاما). ماده آلاینده چه می تواند باشد؟ برای کمک به تشخیص آن، چه مطالعات دیگری روی نمونه آلودگی می توان انجام داد؟
۵. متخصص فیزیک بهداشتی با یک ماده آلاینده مجهول که صرفاً بتا-گیل است، برخورد می کند. درحالی که به منظور شناسایی ماده آلاینده و برای تعیین بیشینه انرژی پرتوبتا، منحنی جذب آن را تعیین و از شمارگر GM با دریچه انتهایی از میکا به ضخامت 1 mm (و به چگالی 2.7 g/cm^3) استفاده می کند، متوجه می شود که ضخامت 1.74 mm آلومینیم می تواند تمام ذرات بتا را متوقف سازد. فاصله بین نمونه و شمارگر GM برابر 2 cm است. انرژی ذرات بتا چقدر است؟ نوع آلاینده چیست؟
۶. یک الکترون کامپتون را که مستقیماً به جلو ($\phi = 0^\circ$) پراکنده شده است، با استفاده از ضخامت 460 mg/cm^2 آلومینیم کاملاً متوقف می کنیم.
(الف) انرژی جنبشی الکترون کامپتون چقدر است؟
(ب) انرژی فوتون فرودی چقدر است؟
۷. پرتوهای تکفام گاما با انرژی 1 MeV ، پس از برخورد با یک قطعه کربن، تحت زاویه 120° پراکنده می شوند.
(الف) انرژی فوتون پراکنده چقدر است؟
(ب) انرژی جنبشی الکترون کامپتون چقدر است؟
۸. فوتون حاصل از ایزوتوپ طبیعی 4°K ، با انرژی 1.36 MeV ، دوبار پراکنده می شود: اول تحت زاویه 30° و سپس تحت زاویه 150° .
(الف) انرژی فوتون پس از پراکندگی دوم چقدر است؟
(ب) در صورتی که ترتیب زاویه های پراکندگی معکوس شود، انرژی فوتون پراکنده چقدر خواهد شد؟
۹. انرژی لبه کامپتون برای پرتوگامای 1 MeV حاصل از ^{137}Cs ، چقدر است؟

۱۰. انرژی يك فوتون، پس از آنكه تحت زاویه ۱۳۵° پراکنده شد، مساوی ۲ MeV می‌شود. انرژی این فوتون قبل از برخورد پراکندگی چقدر است؟
۱۱. انرژی لبه کامپتون برای فوتونهای زیر چقدر است؟
- (الف) گامای ۱۳۶ MeV حاصل از ^{۵۷}Co ،
- (ب) گامای ۸۱۱ MeV حاصل از ^{۵۸}Co ،
- (ج) گامای ۱۳۳ MeV حاصل از ^{۶۰}Co .
۱۲. در يك آزمایش جذب پرتوگاما که با ضخامتهای مختلف جذب‌کننده سربی انجام شده اطلاعات زیر به‌دست آمده است:

ضخامت جاذب (mm)	۰	۲	۴	۶	۸	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵
شمارش در هر دقیقه	۱۰۰۰	۸۸۰	۷۷۰	۶۸۰	۶۰۰	۵۳۰	۳۹۰	۲۸۵	۲۱۰

- (الف) ضریب جذب خطی، ضریب جذب جرمی، و ضریب جذب اتمی سرب را تعیین کنید.
- (ب) انرژی پرتوگاما چقدر است؟
۱۳. در يك آزمایش جذب در ماده جاذب آلومینیم، اطلاعات زیر به‌دست آمده است:

ضخامت جاذب (mm)	۰	۰.۰۰۲	۰.۰۰۴	۰.۰۰۶	۰.۰۰۸	۰.۰۱	۰.۰۱۲	۰.۰۱۴	۰.۰۱۶	۰.۰۲	۰.۰۴	۰.۰۸	۱.۰۵	۲	۲.۰۸
شمارش در هر دقیقه	۱۰۰۰	۵۷۶	۳۲۸	۲۳۰	۱۶۸	۱۳۲	۱۲۰	۱۰۷	۹۶	۹۵	۹۰	۸۲	۶۸	۶۰	۵۰

- (الف) منحنی نمایش این اطلاعات را رسم کنید. این منحنی، وجود چه نوع تابشهایی را نشان می‌دهد.
- (ب) در صورت وجود ذره بتا، انرژی آن چقدر است؟
- (ج) در صورت وجود پرتوگاما، انرژی آن چقدر است؟
- (د) این اطلاعات جذب، با چه ایزوتوپی مناسبت دارد؟
- (ه) معادله برازش این اطلاعات جذب را بنویسید.
۱۴. باریکه‌ای موازی از پرتوهای گاما که از تعداد مساوی فوتونهای ۱ MeV و ۱۰ MeV تشکیل شده است، برحفاظی بتونی به ضخامت ۱۵ cm فرود می‌آید. نسبت

فوتونهای 1 MeV بدفوتونهای 1 MeV در باریکه خروجی چقدر است؟
 ۱۵. سه باریکه موازی پرتو گاما با شارهای مساوی و انرژیهای 2 MeV ، 5 MeV و 10 MeV از ضخامت 5 سانتی متری سرب عبور می کنند. نسبت شارهای خروجی چقدر است؟

۱۶. باریکه هایی تکفام، موازی و نازک از پرتوهای گاما با انرژیهای 1 MeV و 8 MeV ، بر جذب کننده هایی از Al و Cu فرود می آیند. ضخامتهای مورد نیاز مواد جاذب را برای حالت های زیر محاسبه کنید:

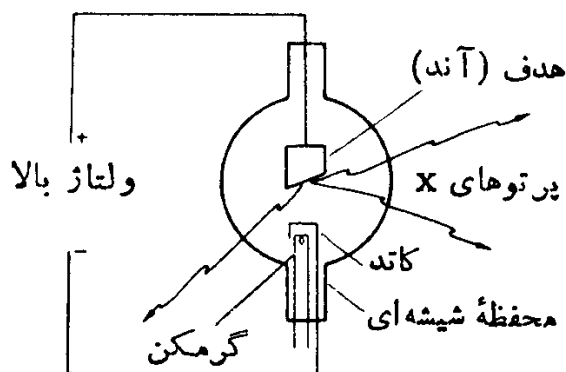
(الف) برای آنکه شدت تابش به یک دوم تقلیل یابد (ضخامت نیم-مقدار HVL).
 (ب) برای آنکه شدت تابش به یک دهم تقلیل یابد (ضخامت یک دهم-مقدار TVL).
 جوابها را بر حسب cm و g/cm^2 بیان کنید.

(ج) رابطه بین ضخامت نیم-مقدار و ضخامت یک دهم-مقدار چگونه است؟
 ۱۷. حفاظ لایه لایه ای از دو لایه آلومینیم و سرب که ضخامت هر یک از آنها 1.35 g/cm^2 است، تشکیل شده است. این حفاظ زیر تابش باریکه موازی و نازکی از فوتونهای 2 MeV قرار می گیرد.

(الف) ضخامت حفاظ لایه لایه ای در مجموع، بر حسب cm ، چقدر است؟
 (ب) ضریب تضعیف حفاظ را در دو حالت زیر محاسبه کنید: (۱) اولین لایه آلومینیم است، (۲) اولین لایه سرب است.

۱۸. انرژی آستانه پرتو گاما را در واکنش $^{12}\text{C}(n, \gamma)^{13}\text{C}$ محاسبه کنید.

۱۹. مطابق شکل زیر، هنگامی که الکترونهای خیلی سریع توسط هدفی با عدد اتمی بالا متوقف می شوند، پرتوهای x به صورت تابش ترمزی تولید می شود. اگر الکترونها را با ولتاژ ثابت 250 kV شتاب دهند، و اگر شدت جریان باریکه الکترونی برابر 10 mA باشد، شار انرژی پرتو x را در فاصله 1 متری هدف تنگستن حساب کنید. از جذب محفظه شیشه ای صرف نظر و گسیل تابش ترمزی را همسانگرد فرض کنید.



۲۰. اگر پراثرترین فوتون پرتو x در پی توقف یکبارۀ الکترون در یک تک برخورد حاصل شود، برای تولید پرتوهای x با کوتاهترین طول موج $1.24 \text{ \AA}$ ، چه ولتاژی باید به دوسر لامپ مولد اعمال شود؟

۲۱. يك ذره بتا با انرژی جنبشی 159 MeV ، پس از عبور از پنجره‌ای به ضخامت 4 mg/cm^2 ، به داخل لامپ گایگري که محتوی هلیوم است وارد می‌شود. این ذره بتا، چند زوج یون در داخل لامپ تولید می‌کند؟
۲۲. اگر آهنک گسیل نوترون در ^{252}Cf برابر $10^6 \times 231$ نوترون در ثانیه به ازای هر میکروگرم، و ثابت واپاشی گسیل آلفای آن برابر 1 y^{-1} باشد، آهنک گسیل نوترون به ازای هر MBq و هر μCi چقدر است؟
۲۳. سرعت يك نوترون کند را که انرژی جنبشی آن 1 eV است، حساب کنید. این انرژی متناظر با چه دمایی است؟
۲۴. هنگامی که ^9Be زیر بمباران دوترون قرار می‌گیرد، طبق واکنش $^9\text{Be}(d, n)^{10}\text{B}$ نوترون تولید می‌شود. سطح مقطع این واکنش برای دوترونهای 15 MeV برابر 12 barn است. چنانچه 1 g هدف بریلیم با باریکه‌ای از دوترونها به شدت $100 \mu\text{A}$ و به قطر 1.13 cm بمباران شود، شار نوترون در فاصله 25 cm از هدف چقدر است؟ توزیع نوترونها را همسانگرد فرض کنید.
۲۵. چه ضخامتی از Cd می‌تواند 50% از يك باریکه فرودی نوترون گرمایی را جذب کند؟ سطح مقطع گیراندازی عنصر Cd برای نوترونهای گرمایی برابر 2550 barn ، چگالی نسبی Cd برابر 8.65 و وزن اتمی آن 112.4 است.
۲۶. چشمه کوچکی از پرتوگامای ^{124}Sb ، با فعالیت $(1 \text{ Ci}) (3.7 \times 10^{10} \text{ Bq})$ ، را کاملاً با کهرای از بریلیم به وزن 25 g محصور کرده‌ایم. اگر قطر محفظه کروی فراگیرنده چشمه گاما برابر 1 cm و سطح مقطع واکنش $^9\text{Be}(\gamma, n)^{10}\text{Be}$ برابر 1 میلی بارن باشد، تعداد نوترونهای حاصل از واکنش را در هر ثانیه حساب کنید.
۲۷. برای حفاظت در برابر نوترونهای گرمایی با شار متوسط $(10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s})$ از کادمیم استفاده شده است. چه مدت زمانی طول خواهد کشید تا 10% از اتمهای ^{113}Cd به مصرف برسند؟
۲۸. سطح مقطع واکنش $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ برای نوترونهای با انرژی بیشتر از 25 MeV برابر 300 mb است. اگر 100 mg از ^{32}S را با استفاده از نوترونهای تند با شار $(10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s})$ به مدت 1 هفته پرتو دهی کنند، فعالیت ^{32}P تولید شده چقدر است؟
۲۹. اگر ضریب جذب مؤلفه انرژی بالای تابش کیهانی در آب برابر 10^{-3} m^{-1} باشد، کاهش شدت این پرتوهای کیهانی را در عمق 10000 متری ته اقیانوس محاسبه کنید.
۳۰. اگر دوتریم را با پرتوهای گامای 262 MeV حاصل از $^{208}\text{Tl}(\text{ThC}'')$ بمباران کنیم، هسته به اجزای سازنده اش یعنی 1 پروتون و 1 نوترون فرومی‌پاشد. چنانچه انرژی جنبشی هر ذره پروتون و نوترون برابر 225 MeV و جرم پروتون برابر 1836 amu باشد، جرم نوترون را محاسبه کنید.

۳۱. باریکه‌ای از نوترونهای تند از دو گروه انرژی تشکیل شده است: انرژی گروه اول که ۹۹٪ از شار نوترونی را شامل می‌شود، برابر 1 MeV است. انرژی گروه دوم، یعنی ۱٪ بقیه نوترونهای، برابر 10 MeV است.
(الف) نسبت درصد این دو گروه، پس از عبور از 25 cm آب، چقدر خواهد شد؟
(ب) پس از عبور این باریکه از تیغه‌ای با همان ضخامت چگالشی سرب، نسبت درصد این دو گروه چقدر خواهد شد؟
سطح مقطعهای حذف نوترون از باریکه عبارت‌اند از:

عنصر	گروه 1 MeV	گروه 10 MeV
H	4.2 b	0.95 b
O	۸	۱۰۵
Pb	۵۰۵	۵۰۱

۳۲. بورال يك نوع آلیاژ کربیدی متشکل از بور و آلومینیم است که به عنوان حفاظ در برابر نوترونهای گرمایی به کار می‌رود. اگر محتوای وزنی بور در آلیاژ برابر ۳۵٪ و چگالی بورال برابر 2.7 g/cm^3 باشد، نیم ضخامت بورال را برای نوترونهای گرمایی در دمای اتاق محاسبه کنید. سطح مقطعهای گیراندازی اجزای آلیاژ عبارت‌اند از: $755 \text{ b} = \text{بور}$ ، $230 \text{ mb} = \text{آلومینیم}$ ، $3.2 \text{ mb} = \text{کربن}$.

۳۳. سطح مقطعهای پراکندگی O و N برای نوترونهای گرمایی، به ترتیب، عبارت‌اند از: 10 b و 4.2 b .

(الف) سطح مقطع ماکروسکوپیك هوا را در شرایط متعارف دما و فشار (STP) حساب کنید. ۷۹٪ از حجم هوا را نیتروژن و ۲۱٪ حجم آن را اکسیژن تشکیل می‌دهد.

(ب) مسافت میانگین آزاد پراکندگی نوترونهای گرمایی در هوا چقدر است؟

۳۴. برای کاهش انرژی نوترونهای 2.5 MeV به مقادیر زیر، به چند برخورد پراکننده در گرافیت نیاز است؟

(الف) ۵۱٪ انرژی اولیه نوترون

(ب) 0.25 eV

۳۵. برگه‌ای از کبالت به قطر 1 cm و به ضخامت 1 mm از ۵ در باریکه‌ای گرمایی به شار $(n/\text{cm}^2 \cdot \text{s}) = 1 \times 10^{11}$ به مدت ۷ روز پرتوگیری کرده است. اگر سطح مقطع فعالسازی کبالت برابر 36 barn و چگالی کبالت برابر 8.9 g/cm^3 باشد، فعالیت حاصل در پایان دوره پرتوگیری بر حسب Bq و میلی کوری چقدر است؟ توجه داشته باشید که کبالت طبیعی به طور ۱۰۰٪ از ایزوتوپ ^{59}Co تشکیل می‌شود.

۳۶. فولاد زنگ‌زن نوع ۳۰۴ از سه عنصر Fe (۷۱٪ وزنی)، Cr (۱۹٪)، و

Ni (۱۰٪) تشکیل می شود. فراوانی ایزوتوپی این عناصر بر حسب درصد، و سطح مقطع گیراندازی نوترون m/s ۲۲۰۰ برای آنها بر حسب بارن در جدول زیر داده شده است:

Ni			Cr			Fe		
σ_c	فراوانی	A	σ_c	فراوانی	A	σ_c	فراوانی	A
۴۰۴	۶۷۰۷۶	۵۸	۱۷	۴۰۳۱	۵۰	۲۰۹	۵۰۸۴	۵۴
۲۰۶	۲۶۰۱۶	۶۰	۰۰۸	۸۳۰۷۶	۵۲	۲۰۷	۹۱۰۶۸	۵۶
۲	۱۰۲۵	۶۱	۱۸	۹۰۵۵	۵۳	۲۰۵	۲۰۱۷	۵۷
۱۵	۳۰۶۶	۶۲	۰۰۳۸	۲۰۳۸	۵۴	۱۰۱	۰۰۳۱	۵۸
۱۰۵	۱۰۱۶	۶۴						

(الف) سطح مقطع ماکروسکوپیکی گیراندازی را حساب کنید.

(ب) اگر باریکه ای موازی و به قطر 1 cm از نوترونهای m/s ۲۲۰۰ بر بزرگای از فولاد زنگ نزن نوع ۳۰۴ به ضخامت 2 mm فرود آید، در حالی که شار این باریکه برابر $(n/cm^2 \cdot s)$ 5×10^{11} است، تعداد نوترونهای گیراندازی شده در هر ثانیه چقدر خواهد بود؟

دزسنجی تابش

یکاهها

هنگامی که دانش پرتوشناسی مراحل اولیه خود را می‌پیمود، یکای دقیقی که برای حفاظت یا درمان تابشی مناسب باشد وجود نداشت. دزسنج متداول برای حفاظت تابش یک قطعه فیلم دندان بود که یک گیره کاغذی به آن چسبیده بود. مقدار پرتوگیری روزانه‌ای که می‌توانست یک سایه قابل آشکارسازی تولید کند، بیشینه دز مجاز در نظر گرفته می‌شد. برای دزهای زیادتر و یا برای مقاصد درمانی، یکای دز اغلب «یکای التهاب پوست» بود. به دلیل وابستگی زیاد این یکاهای دز به انرژی و نیز کاستیهای ذاتی دیگر، هیچیک از این دو یکا نمی‌توانست از لحاظ زیست‌شناسی برای مطالعه کمی اثرات زیست‌شناختی تابش یا حفاظت تابشی با معنی یا سودمند باشد. وانگهی چون آن مقدار از انرژی که جسم از میدان تابش جذب می‌کند وابسته به انرژی است، ناگزیر باید میان پرتوگیری تابش و دز جذب‌شده تابشی فرق گذاشته شود.

دز جذب‌شده

گری

آسیب حاصل از تابش به جذب انرژی بستگی دارد، و تقریباً با تراکم انرژی جذب‌شده در بافت متناسب است. از این رو یکاهای اصلی دز تابشی بر حسب انرژی جذب‌شده در یکای

جرم بافت بیان می‌شود. این یکا که به‌گری (Gy) معروف است، به صورت زیر تعریف می‌شود

یک گری عبارت است از دز تابشی جذب‌شده یک ژول بر کیلوگرم

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} \quad (۱.۶)$$

به‌طور کلی، یکای گری برای کلیه انواع دزسنجی تابش یوننده ناشی از میدانهای خارجی پرتوهای گاما، نوترونها یا ذرات باردار، و نیز ایزوتوپهای پرتوزایی که در درون بدن ته‌نشین شده‌اند، قابل استفاده است.

راد

پیش از آنکه یکاهای SI پذیرفته شوند، دز تابش با یکایی بدنام داد (صورت اختصاری دز تابش جذب‌شده) اندازه‌گیری می‌شد. راد بنا به تعریف عبارت است از:

تابش جذب‌شده متناظر با انرژی ۱۰۰ ارگ بر گرم

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g} \quad (۲.۶)$$

از آنجا که $1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg}$ و $1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$ است، پس داریم

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} \quad (۳.۶)$$

با آنکه گری یکای جدیدتری است و انتظار می‌رود که سرانجام جای راد را بگیرد، ولی هنوز هم راد را به‌طور وسیعی به کار می‌برند.

پرتوگیری

یکای پرتوگیری

در بررسی تابش خارجی با شار انرژی معین، مقدار دز جذب‌شده در هر نقطه از اندام بستگی دارد به نوع و انرژی تابش، فاصله عمقی محل در سافت دز مورد نیاز در داخل اندام، و اجزای اصلی سازنده محیط جاذب در آن نقطه. به عنوان مثال، استخوان که عدد اتمی عناصر سازنده آن (Ca و P) از عدد اتمی عناصر سازنده بافت نرم (C، O، H، و N) بیشتر است، به ازای واحد جرم، بیشتر از بافت نرم انرژی از باریکه پرتو ایکس جذب می‌کند. به همین دلیل، میدانهای پرتو ایکس که اندامها در معرض آنها قرار می‌گیرند، غالباً با یکاهای پرتوگیری مشخص می‌شوند. یکای پرتوگیری که برای اندازه‌گیری شار فوتون به کار می‌رود متناسب است با مقدار انرژی انتقال یافته از میدان پرتو ایکس به

واحد جرم هوا. هر یکای پرتوگیری به صورت مقداری از تابش گاما یا ایکس تعریف می شود که بتواند در هر کیلو گرم هوا یونهای حامل ۱ کولن بار (با هر علامتی) ایجاد کند

$$1 X = 1 C/kg \text{ (هوا)} \quad (4.6)$$

از آنجا که یونش حاصل از تابش نسبتاً به آسانی قابل اندازه گیری است، یکای پرتوگیری بر حسب یونش هوا تعریف می شود. ولی در انرژیهای فوتونی کمتر از چندین keV و بیشتر از چندین MeV اندازه گیری یکای پرتوگیری تا حدی دشوار خواهد شد. به همین دلیل، یکای پرتوگیری تنها در مورد پرتوهای ایکس و گامایی که انرژی آنها از ۳ MeV تجاوز نمی کند به کار می رود. در مورد فوتونهایی که انرژی بیشتری دارند، پرتوگیری بر حسب یکای وات ثانیه بر مترمربع، و آهنگ پرتوگیری بر حسب وات بر متر مربع بیان می شود. با توجه به اینکه بار هر تک یون برابر $1.6 \times 10^{-19} C$ و میانگین انرژی لازم برای تولید هر زوج یون در هوا برابر ۳۴ eV است، می توانیم تعریف عملیاتی یکای پرتوگیری را به یکاهای اصلی جذب انرژی در واحد جرم هوا تبدیل کنیم. بنا بر این

$$1 X = 1 \frac{C}{kg \text{ هوا}} \times \frac{1 \text{ یون}}{1.6 \times 10^{-19} C} \times 34 \frac{eV}{\text{یون}} \times 1.6 \times 10^{-19} J/eV \\ \times 1 \frac{Gy}{J/kg} = 34 Gy \text{ (هوا)} \quad (5.6)$$

لازم به یادآوری است که یکای پرتوگیری، در واقع یک معیار جمعی است و بنا بر این به زمانی که طی آن پرتوگیری انجام می شود بستگی ندارد. شدت میدان پرتو ایکس یا گاما، معمولاً به صورت آهنگ پرتوگیری تعریف و با یکایی مانند کولن بر ساعت بیان می شود. البته پرتوگیری کل برابر است با حاصلضرب آهنگ پرتوگیری در زمان.

رونتگن

قبل از آنکه دستگاه SI پذیرفته شود، یکای پرتوگیری پرتو ایکس رونتگن نامیده و با نماد R نشان داده می شد. رونتگن به صورت آن مقدار از تابش ایکس یا گاما تعریف می شد که بتواند یونهای حامل یک ایستاکولن بار (با هر علامتی) در هر سانتی متر مکعب هوا در دمای $0^\circ C$ و فشار ۷۶۰ mm Hg تولید کند

$$1 R = 1 St.C/cm^3 \quad (6.6)$$

چون هر یون حامل باری برابر $1.6 \times 10^{-19} St.C$ و جرم هر سانتی متر مکعب هوای استاندارد برابر ۱۲۹۳ g است، پرتوگیری ۱ R با جذب ۸۷.۷ ارگ در هر گرم

هوا (یا دزی برابر ۸۷۷ره راد) متناظر خواهد بود. هنگامی که پرتوگیری برحسب رونتگن اندازه گیری می شود، شدت میدان پرتو ایکس یا گاما برحسب یکاهایی چون رونتگن بر دقیقه یا میلی رونتگن بر ساعت اندازه گیری می شود. میلی رونتگن که با نماد mR نشان داده می شود برابر ۰۰۰۱ رونتگن است.

ارتباط میان یکای پرتوگیری و رونتگن را می توان به صورت زیر محاسبه کرد

$$\frac{32 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \frac{\text{C}}{\text{kg}} \times 10^7 \frac{\text{erg}}{\text{J}} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}{877 \frac{\text{erg}}{\text{g}} / \text{R}} = 3881 \text{ R} / \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

یا

$$1 \text{ X} = 3881 \text{ R} \quad (7.6)$$

مثال ۱.۶

هرگاه حفاظ پزشکی پرتوایکس بر مبنای پرتوگیری هفتگی بیشینه ۱۰۰ mR برای نواحی کنترل شده و ۱۰ mR برای نواحی کنترل نشده طراحی شده باشد، این پرتوگیرها را برحسب یکاهای SI محاسبه کنید.

حل: با توجه به معادله (۷.۶) خواهیم داشت

$$\frac{1 \text{ X}}{3881 \text{ R}} = 258 \times 10^{-4} \text{ X/R} \times 1 \frac{\text{C/kg}}{\text{X}} = 258 \times 10^{-4} \frac{\text{C/kg}}{\text{R}}$$

برای نواحی کنترل شده

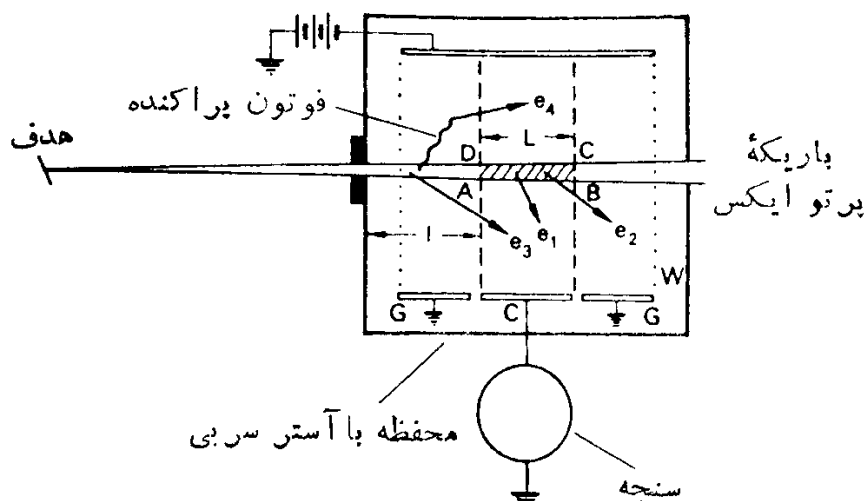
$$258 \times 10^{-4} \frac{\text{C/kg}}{\text{R}} \times 0.1 \text{ R} = 258 \times 10^{-6} \text{ C/kg} = 258 \mu\text{C/kg}$$

برای نواحی کنترل نشده

$$258 \times 10^{-4} \frac{\text{C/kg}}{\text{R}} \times 0.01 \text{ R} = 258 \times 10^{-6} \text{ C/kg} = 258 \mu\text{C/kg}$$

اندازه گیری پرتوگیری: اتاقلک هوای آزاد

با استفاده از دستگاهی که در شکل ۱.۶ نشان داده شده است می توان تعریف عملیاتی یکای پرتوگیری را توضیح داد. باریکه ای از پرتو ایکس پس از ورود از طریق مدخل با ستون



شکل ۱۰۶ نمودار ساده اتاقک یونس با هوای آزاد و صفحات موازی.

استوانه‌ای شکلی از هوا که محدود به دریچه ورودی است برهم کنش می‌کند. سپس یونهای ناشی از برهم کنش پرتوهای ایکس با حجم هوای محصور در ABCD (که از برخورد این پرتوها با خطوط نیروی الکتریکی لبه‌های صفحه جمع‌کننده C حاصل می‌شود)، به کمک صفحات این خازن جمع می‌شود و در نتیجه جریانی در مدار خارجی به وجود می‌آید. حلقه حفاظتی G و سیمهای حفاظتی W کمک می‌کنند که خطهای میدان الکتریکی به صورت مستقیم و عمود بر صفحه باقی بمانند. شدت میدان الکتریکی میان صفحه‌ها در حدود 100 V/cm است. این شدت به اندازه‌ای است که می‌تواند یونها را قبل از ترکیب مجدد جمع‌آوری کند ولی در آن حد نیست که به وسیله الکترونها رها شده از ذرات یوننده اولیه، یونس ثانوی تولید کند. سیمهای حفاظتی به یک شبکه تقسیم و لتاز وصل اند تا افت پتانسیل در میان صفحات یکنواخت باشد. از روی شارش جریان می‌توان تعداد یونهای گردآوری شده در اثر برهم کنشهای پرتو ایکس در حجم جمع‌کننده را محاسبه کرد و سپس آهنگ دز را بر حسب رونتگن در واحد زمان به دست آورد. برای اندازه‌گیری یکای پرتوگیری با این روش، باید تمامی انرژی الکترونها اولیه در هوای درون سنجه تلف شود. این شرط با ساختن اتاقک هوایی که از برد بیشینه الکترونها اولیه بزرگتر باشد برآورده می‌شود. (برای پرتوهای ایکس 300 keV ، باید فاصله بین صفحه‌های جمع‌کننده در حدود 30 cm و ضلع جعبه مکعب شکل تقریباً برابر 50 cm باشد). اگر تعداد الکترونهايي که حجم حساس را ترك می‌کنند برابر با تعداد الکترونهايي باشد که از برهم کنشهای نقاط دیگر باریکه پرتو ایکس وارد حجم حساس می‌شوند، این واقعیت که بیشتر الکترونهايي حاصل از برهم کنش پرتو x در داخل حجم حساس جمع‌آوری نمی‌شوند اهمیت چندانی نخواهد داشت. این شرط را تعادل الکترونی می‌گویند. وقتی تعادل الکترونی برقرار می‌شود، به ازای هر الکترونی که حجم حساس را ترك می‌کند يك الکترون با انرژی مساوی وارد آن می‌شود. ضخامت هوای میان مدخل باریکه و حجم حساس (لایه ۱ در شکل ۱۰۶) باید به اندازه‌ای باشد که تعادل الکترونی برقرار شود. مثلاً برای پرتوهای

ایکس تصفیه شده ۲۵۰ kV ضخامت هوای لازم برابر ۹ cm است. ولی برای پرتوهای ۵۰۰ kV ضخامت لازم به ۴۰ cm افزایش می یابد. تحت شرایط تعادل الکترونی و با فرض اینکه تضعیف باریکه پرتو ایکس به وسیله هوا در طول واحد ناچیز باشد، یونهای گردآوری شده از حجم حساس از برهم کنشهای فوتون اولیه در مدخل ورودی باریکه حاصل می شوند، و در نتیجه میزان پرتوگیری در همان نقطه اندازه گیری می شود نه در داخل حجم حساس. اتاقکهای هوای آزاد معمولی برای اندازه گیری کمی پرتوهای ایکسی که انرژی کوانتومی آنها تا حدود ۵۰۰ keV است به کار می روند. برای انرژیهای تابشی بیشتر از این مقدار اتاقکهای بزرگتری لازم است. ولی به دلیل مشکلات فنی، عملاً نمی توان برای سنجش پرتوگیری با انرژیهای کوانتومی بیش از ۵۰۰ keV از اتاقک یونش با هوای آزاد استفاده کرد.

چگونگی استفاده از اتاقک یونش با هوای آزاد برای اندازه گیری آهنگ پرتوگیری تابش ایکس (بر حسب کولن بر کیلو گرم بر ثانیه) در مثال زیر آمده است.

مثال ۲۰۶

قطر مدخل ورودی در يك اتاقک یونش با هوای آزاد برابر ۱ cm و طول AB حجم حساس آن برابر ۵ cm است. باریکه ای از پرتو ایکس ۲۰۰ kV به درون اتاقک می تابد و جریان پایای ۰.۱ ره میکروآمپری در مدار خارجی تولید می کند. هرگاه دمای لحظه اندازه گیری ۲۰°C و فشار برابر ۷۵۰ mm Hg باشد، آهنگ پرتو دهی این باریکه پرتو ایکس را محاسبه کنید.

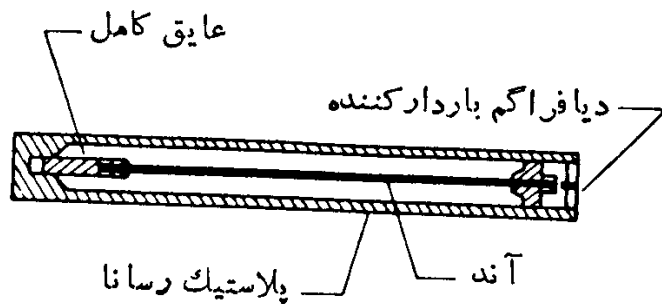
حل: جریان ۰.۱ ره میکروآمپری متناظر است با شارش بار الکتریکی $۱۰^{-۸}\text{ C/s}$ و حجم حساس در این مورد برابر ۳۹۲۷ cm^3 است. هرگاه فشار و دما با شرایط استاندارد تصحیح شوند، خواهیم داشت

$$\dot{X} = \frac{۱۰^{-۸}\text{ C/s}}{۳۹۲۷\text{ cm}^3 \times ۱.۲۹۳ \times ۱۰^{-۶}\text{ kg/cm}^3} \times \frac{۲۹۳}{۲۷۳} \times \frac{۷۶۰}{۷۵۰}$$

$$= ۲.۱۴ \times ۱۰^{-۳}\text{ X/s} \quad (۸.۳۱\text{ R/s})$$

اندازه گیری پرتوگیری: اتاقک باديواره هوا

اتاقک یونش هوای آزادی که قبلاً توصیف شد، در عمل فقط به عنوان استاندارد اولیه آزمایشگاهی قابل استفاده است، ولی در کارهای خارج از آزمایشگاه يك وسیله قابل حمل بیشتر مورد نیاز است. چنین وسیله ای را می توان با متراکم کردن هوا در اطراف محفظه اندازه گیری فراهم کرد. در این صورت باید شرایط لازم برای تعریف یکای پرتوگیری همیشه برقرار بماند. بدیهی است که ساختن وسیله ای که دیواره های آن هوای فشرده باشد، عملاً بسیار



شکل ۲.۶ اتاقک یونش جیبی از نوع خازن غیرمدرج.

دشوار خواهد بود. اما می‌توان وسیله‌ای ساخت که دیواره‌های آن از ماده «معادل هوا» باشد، یعنی ماده‌ای که خواص جذب پرتو α در آن بسیار شبیه به همین خواص در هوا باشد. چنین اتاقکی را می‌توان به شکل یک خازن الکتریکی و به صورتی که در طرح زیر دیده می‌شود ساخت.

دیواره بیرونی این وسیله به شکل استوانه‌ای از جنس پلاستیک به ضخامت تقریباً 4.75 mm است که رسانای الکتریکی است. در مرکز استوانه سیمی قرار دارد که با دیواره بیرونی هم‌محور است و به وسیله یک عایق خوب کاملاً از آن جدا شده است. بار این سیم مرکزی (آند) نسبت به دیواره مثبت است. هنگامی که پرتو ایکس یا گاما به این اتاقک می‌تابد، یونش حاصل از برهم‌کنش میان فوتونها و دیواره، در محفظه اندازه‌گیری باعث تخلیه خازن می‌شود و در نتیجه پتانسیل آند کاهش می‌یابد. کاهش ولتاژ آند بسا یونش تولید شده در محفظه نسبت مستقیم دارد که آن نیز به نوبه خود متناسب با میزان پرتوگیری است. اکنون به عنوان مثال، نمونه زیر را در نظر می‌گیریم.

مثال ۳.۶

اتاقکی به حجم 2 cm^3 و ظرفیت الکتریکی $5 \mu\text{F}$ را که محتوی هوا در شرایط متعارفی است، در معرض تابش قرار داده‌ایم. اگر ولتاژ دو سر اتاقک قبل و بعد از پرتوگیری به ترتیب برابر 180 V و 160 V ، و مدت زمان پرتوگیری برابر 5 h باشد، مقدار پرتوگیری و آهنگ پرتوگیری چقدر است؟

حل: مقدار پرتوگیری به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$C \times \Delta V = \Delta Q \quad (۸.۶)$$

$$5 \times 10^{-12} \text{ F} \times (180 - 160) \text{ V} = 1 \times 10^{-10} \text{ C}$$

چون هر یکای پرتوگیری برابر 1 C/kg است، پرتوگیری اندازه‌گیری شده در این اتاقک برابر است با

$$\frac{1 \times 10^{-10} \text{ C}}{2 \text{ cm}^3 \times 1.293 \times 10^{-6} \text{ kg/cm}^3} = 3.867 \times 10^{-5} \text{ C/kg}$$

که متناظر است با

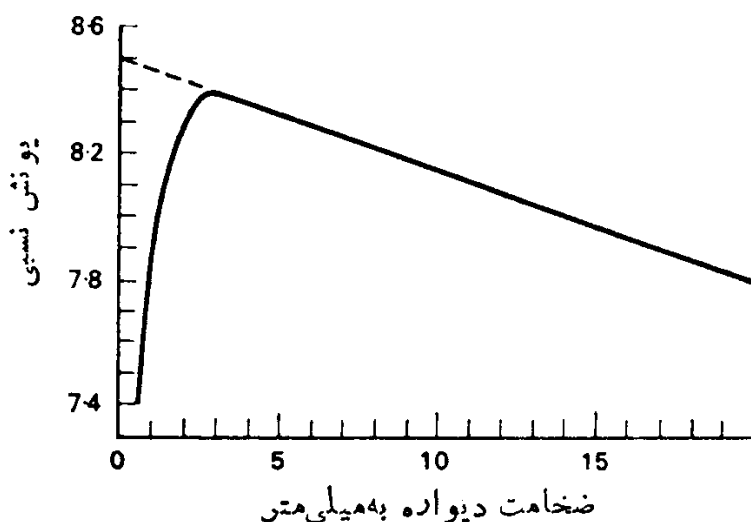
$$3.867 \times 10^{-5} \text{ C/kg} \times 3881 \frac{\text{R}}{\text{C/kg}} = 0.150 \text{ R} = 150 \text{ mR}$$

آهنگ پرتوگیری عبارت است از

$$\frac{150 \text{ mR}}{0.5 \text{ h}} = 300 \text{ mR/h}$$

که معادل $77.3 \mu\text{C/kg}$ در ساعت است.

اتاقکی که بدین ترتیب ساخته می‌شود اتاقك با «دیواره هوا» نام دارد. هنگام کار با این اتاقك باید توجه داشت که ضخامت دیواره با انرژی تابشی مورد اندازه‌گیری متناسب باشد، زیرا اگر دیواره خیلی نازك باشد تعداد فوتونهایی که از برهم‌کنش آنها الکترونهاي اولیه تولید می‌شوند بسیار کم خواهد شد و اگر خیلی ضخیم باشد مقدار قابل توجهی از فوتونها را جذب می‌کند و در نتیجه شار الکترونی اولیه تضعیف می‌شود. با استفاده از آزمایشی که در آن یونش تولید شده در محفظه اتاقك یونشی اندازه‌گیری می‌شود می‌توان پهنای بهینه را مشخص کرد. در عمل، با افزایش تسریجی ضخامت دیواره‌ها و اندازه‌گیری یونش تولید شده، حد مطلوب به دست می‌آید. در این آزمایش از ورود الکترونهاي ثانوی که در خارج از دیواره‌ها تشکیل می‌شوند و همچنین از ورود پرتوهای بتای حاصل از چشمه پرتوگاما، به حجم حساس باید جلوگیری به عمل آورد. در این صورت نمودار یونش محفظه بر حسب ضخامت دیواره به شکل منحنی ۳.۶ خواهد بود.

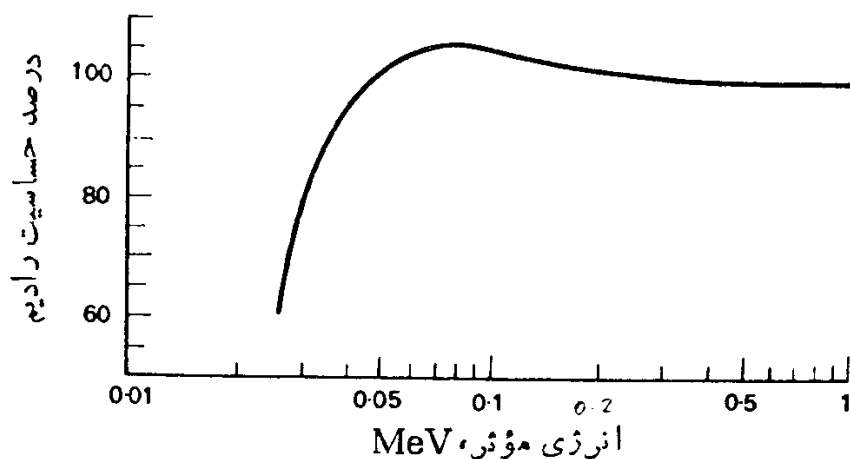


شکل ۳.۶ تعداد زوج یونها در واحد حجم به صورت تابعی از ضخامت دیواره. اتاقك یونشی از کربن خالص ساخته شده و به شکل استوانه‌ای به قطر داخلی ۲۰ mm و ارتفاع ۲۰ mm است.

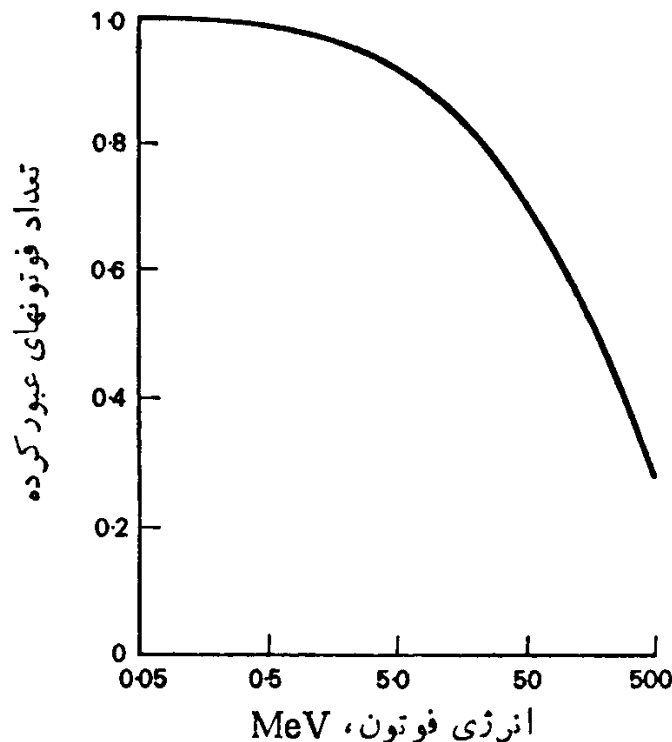
چون یونش محفظه را عمدتاً الکترونهاى اولیه‌ای باعث می‌شوند که خود نتیجه برهم‌کنش میان پرتوگاما و دیواره هستند، با افزایش ضخامت دیواره فوتونهاى بیشتری با آن برهم‌کنش می‌کنند و در نتیجه الکترونهاى اولیه‌ی بیشتری که عامل یونش گاز درون محفظه هستند تولید می‌شوند. اما، اگر ضخامت دیواره به‌حدی برسد که الکترون اولیه تولید شده در سطح خارجی دیواره انرژی کافی برای عبور از آن و ورود به‌داخل محفظه نداشته باشد، یونش در محفظه کاهش می‌یابد. آن ضخامتی از دیواره را که در آن چنین حالتی تازه آغاز می‌شود ضخامت تعادلی دیواره می‌نامند.

در صورتی که ماده دیواره با دیواره «معادل هوا» تفاوت داشته باشد، پاسخ اتاقک یونش وابسته به انرژی می‌شود. بسا انتخاب ضخامت و ماده مناسب برای دیواره، بیشینه منحنی شکل ۳.۶ می‌تواند کاملاً پهن و در نتیجه اتاقک یونش در گستره وسیعی از انرژی فوتونها نسبتاً مستقل از انرژی باشد. در عمل این پاسخ تقریباً تخت، گستره‌ای از انرژی از حدود 200 keV تا حدود 2 MeV را در برمی‌گیرد. در این گستره از انرژی، اثر کامپتون سازوکار عمده انتقال انرژی است. در انرژیهای پایینتر از این گستره، احتمال اثر کامپتون تقریباً با طول موج افزایش می‌یابد، در حالی که احتمال اثر فوتوالکتریک تقریباً با توان سوم طول موج فوتون متناسب است. بنابراین، تعداد کل الکترونهاى اولیه و در نتیجه حساسیت اتاقک افزایش می‌یابد. اما این افزایش حساسیت با کاهش انرژی فوتون به یک قله می‌رسد و پس از آن بر اثر تضعیف شدید تابش فرودی توسط دیواره اتاقک، مقدار آن سرعت کاهش می‌یابد. در منحنی شکل ۴.۶ که عامل تصحیح انرژی یک دزسنج جیبی را نشان می‌دهد، این اثرها نشان داده شده‌اند.

با توجه به این واقعیت که انرژی زیاد و در نتیجه برد بلند الکترونهاى اولیه تولید شده در دیواره، ساخت وسیله‌ای با معیارهای اندازه‌گیری رونتگن را امکان‌ناپذیر می‌کند، از C/kg و رونتگن برای انرژیهای بیش از 3 MeV به‌عنوان یکای اندازه‌گیری پرتوگیری نمی‌توان استفاده کرد. برد بلند الکترونهاى اولیه، وجود دیواره‌های بسیار ضخیم را ایجاب می‌کند. اما هنگامی که این دیواره‌ها، بر مبنای برد الکترونهاى اولیه، به قدر کافی



شکل ۴.۶ منحنی مشخصه دزسنج جیبی شکل ۱۸.۹ به صورت تابعی از انرژی.



شکل ۵.۶ تعداد نسبی فوتونهای عبور کرده از يك دیواره هوا با ضخامت برابر با برد پیشینه الکترونهاي ثانوی.

ضخیم می شوند، همان طور که در شکل ۵.۶ دیده می شود، تابش گاما را تا حد زیادی تضعیف می کنند. بنا بر این، در چنین شرایطی حصول تعادل الکترونی امکان پذیر نیست، زیرا شدت تابش در داخل دیواره ثابت نیست و در نتیجه الکترونهاي اولیه در تمام حجم دیواره که از آنجا به محفظه می رسند به طور یکنواخت تولید نمی شوند.

ارتباط بین پرتوگیری و دز

اتاقك با دیواره هوا چنانکه از اسمش برمی آید، جذب انرژی در هوا را اندازه گیری می کند. در بیشتر موارد، جذب انرژی در بافت بدن مطرح است. چون جذب انرژی تقریباً با چگالی الکترونی محیط جاذب متناسب است، در کاربرد یکای پرتوگیری در هر ناحیه از انرژی باید توجه داشت که دز جذب شده در بافت بدن لزوماً با دز جذب شده در هوا برای هر نوع تابش یکسان نیست. به عنوان مثال اگر يك بافت ماهیچه ای را در نظر بگیریم که چگالی نسبی آن برابر ۱ و عناصر تشکیل دهنده آن به صورت $10^{22} \times 598$ اتم هیدروژن بر گرم، $10^{22} \times 275$ اتم اکسیژن بر گرم و $10^{22} \times 172$ اتم نیتروژن بر گرم و $10^{21} \times 602$ اتم کربن بر گرم باشد، چگالی الکترونی این بافت برابر $10^{23} \times 328$ الکترون بر گرم خواهد بود. چگالی الکترونی هوا با چگالی $10^{-3} \times 1293$ g/cm³ برابر $10^{23} \times 301$ الکترون بر گرم است. بنا بر این، جذب انرژی در بافت بر حسب ژول بر کیلوگرم که متناظر با پرتوگیری ۱ کوان بر کیلوگرم هواست، عبارت است از

$$\frac{3728 \times 34}{3701} = 37 \text{ J/kg (بافت)}$$

که با اندازه‌گیریهای گرماسنجی مربوط به جذب انرژی بافت نرم از پرتودهی 1 C/kg (هوا) کاملاً سازگاری دارد. اگر این مقدار را با پرتوگیری 1 R که با $87.8 \text{ ارگ بر گرم هوا}$ متناظر است مقایسه کنیم، جذب بافت عضلانی مورد بحث معادل 95 ارگ بر گرم می‌شود. این دز جذب شده در بافت که از پرتوگیری 1 R حاصل می‌شود، به دز 100 ارگ بر گرم که متناظر با 1 راد است بسیار نزدیک است. به همین دلیل غالباً پرتوگیری 1 رونتگن تقریباً هم‌ارز دز جذب شده 1 rad تلقی می‌شود، و یکای «روننگن» با اندکی مسامحه (و البته به غلط) به جای rad به کار می‌رود.

از طرف دیگر بین یکای پرتوگیری و گری یک ارتباط ساده کمی وجود دارد که در نتیجه در هر محیطی که پرتوگیری آن بر حسب C/kg معلوم باشد محاسبه دز جذب شده، چنانکه در مثال زیر دیده می‌شود، به آسانی امکان پذیر است.

مثال ۴.۶

باریکه‌ای از پرتوگاما با انرژی کوانتومی 3 MeV را در نظر بگیرید. هر گاه شار فوتون برابر 1000 کوانتوم بر سانتی متر مربع در ثانیه باشد، آهنگ پرتوگیری و آهنگ دز جذب شده در بافت نرم را در نقطه‌ای از این باریکه تعیین کنید.

حل: با استفاده از شکل ۱۸.۵، ضریب جذب انرژی هوا μ_a در 20°C برای فوتونهای 300 keV برابر $3.46 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ به دست می‌آید. آهنگ پرتوگیری بر حسب C/kg بر ثانیه برابر است با

$$\dot{X} = \frac{\phi \frac{\text{فوتون}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \times E \text{ MeV/فوتون} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \times \mu_a \text{ cm}^{-1}}{\rho_a \text{ kg/cm}^3 \times 34 \frac{\text{J/kg}}{\text{C/kg}}}$$

(۹.۶)

که پس از قراردادن مقادیر عددی مناسب، معادله (۹.۶) به صورت زیر درمی‌آید

$$\begin{aligned} \dot{X} &= \frac{10^3 \times 0.3 \times 1.6 \times 10^{-13} \times 3.46 \times 10^{-5}}{(1.293 \times 10^{-6} \times 273/293) \times 34} \\ &= 4 \times 10^{-11} \frac{\text{C}}{\text{kg}} / \text{s} \end{aligned}$$

آهنگ دز جذب شده بر حسب گری بر ثانیه با رابطه زیر داده می‌شود

$$\dot{D} = \frac{\phi \frac{\text{فوتون}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \times E \text{ MeV/فوتون} \times ۱.۶ \times ۱۰^{-۱۳} \text{ J/MeV} \times \mu_m \text{ cm}^{-۱}}{\rho_m \text{ kg/cm}^3 \times ۱ \frac{\text{J/kg}}{\text{Gy}}} \quad (۱۰.۶)$$

اگر در این معادله مقدار ضریب جذب وابسته به انرژی بافت را برای فوتونهای ۰.۳ MeV برابر $\mu_m = ۰.۰۳۱۲ \text{ cm}^{-۱}$ و چگالی بافت را برابر $\rho_m = ۰.۰۰۱ \text{ kg/cm}^3$ قرار دهیم، آهنگ دز جذب شده برابر $۱.۵ \times ۱۰^{-۹} \text{ Gy/s}$ به دست می آید. رابطه میان پرتوگیری و دز از تقسیم معادله (۱۰.۶) بر (۹.۶) به دست می آید

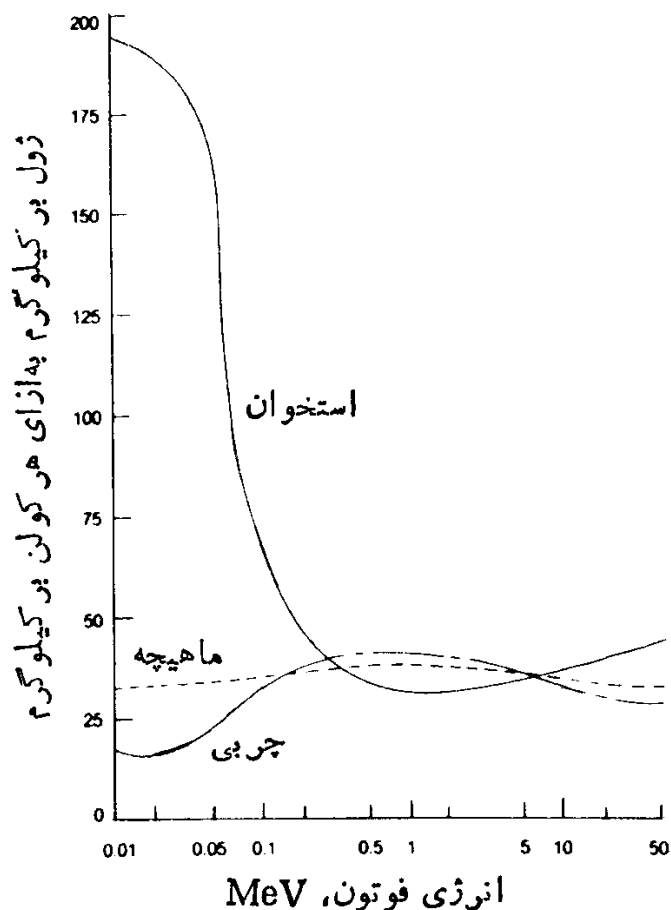
$$\frac{\dot{D}}{\dot{X}} = \frac{(\phi \times E \times ۱.۶ \times ۱۰^{-۱۳} \times \mu_m) / \rho_m}{(\phi \times E \times ۱.۶ \times ۱۰^{-۱۳} \times \mu_a) / (\rho_a \times ۳۴)}$$

$$\dot{D} = ۳۴ \times \frac{\mu_m / \rho_m}{\mu_a / \rho_a} \times \dot{X} \text{ Gy/s} \quad (۱۱.۶)$$

در صورتی که پرتوگیری بر حسب رونتگن باشد، برای به دست آوردن دز جذب شده در بافت (بر حسب rad) می توان از رابطه مشابه زیر استفاده کرد

$$\text{رانتگن} = \frac{۸۷.۷}{۱۰۰} \times \frac{\mu_m / \rho_m}{\mu_a / \rho_a} \times \text{راد} \quad (۱۲.۶)$$

معادلات (۱۱.۶) و (۱۲.۶) نشان می دهند که مقدار دز جذب شده از هر پرتوگیری مفروضی را می توان با استفاده از نسبت ضریب جذب جرمی محیط به ضریب جذب جرمی هوا به دست آورد. در مورد بافت بدن، وقتی که انرژی فوتون در گستره حدود $۱۰-۱۰۰ \text{ MeV}$ باشد، این نسبت تقریباً ثابت می ماند. زیرا مهمترین برهم کنش بین بافت و تابش پراکندگی کامپتون است، و سطح مقطع این پراکندگی عمدتاً به چگالی الکترونی محیط جاذب وابسته است. در انرژیهای پایینتر، اثر فوتوالکتریک غالب می شود، و سطح مقطع مربوط به این برهم کنش با عدد اتمی ماده جاذب افزایش می یابد. در نتیجه این وابستگی به عدد اتمی، استخوان که تقریباً ۱۰٪ وزن آن کلسیم است، بیشتر از بافت نرم از یک دز معین پرتوهای کم انرژی X ، انرژی جذب می کند. این نکته در شکل ۶.۶ که در آن مقدار انرژی جذب شده در پرتوگیری (ژول بر کیلو گرم به ازای هر کولن بر کیلو گرم) به صورت تابعی از انرژی فوتون برای چربی، ماهیچه، و استخوان رسم شده است، نشان داده می شود.



شکل ۶.۶ جذب انرژی در پرتوگیری یکای ایکس (کولن بر کیلوگرم) برای چند نوع بافت.

اندازه‌گیری دز جذب‌شده: اصل براگ-گری

در صورتی که دیواره اتاقک یونش از ماده‌ای ساخته شود که خاصیت جذب تابش آن همانند بافت مورد نظر باشد، می‌توان با استفاده از اصل براگ-گری وسیله‌ای ساخت که دز بافت را مستقیماً اندازه‌گیری کند. (طبق این اصل، مقدار یونش تولید شده در یک محفظه کوچک پراز گاز که در یک محیط جاذب جامد قرار گرفته باشد با انرژی جذب شده در محیط جامد متناسب است) هنگام به کار بردن این اصل، باید توجه داشت که محفظه گاز نسبت به محیط جاذب جامد به اندازه کافی کوچک باشد تا توزیع سرعت و توزیع زاویه‌ای الکترونهای اولیه تغییر نکند. این شرط هنگامی برآورده می‌شود که الکترونهای اولیه فقط مقدار کمی از انرژی خود را در گذر از محفظه محتوی گاز از دست بدهند. اگر ضخامت محیط جامد طوری باشد که تعادل الکترونی برقرار شود، آنگاه انرژی جذب شده در واحد جرم دیواره (dE_m/dM_m) با انرژی جذب شده در واحد جرم گاز (dE_g/dM_g) به صورت زیر به هم مربوط می‌شوند

$$\frac{dE_m}{dM_m} = \frac{S_m}{S_g} \times \frac{dE_g}{dM_g} \quad (۱۳.۶)$$

که در آن S_m توان ایستاندگی جرمی ماده دیواره و S_g توان ایستاندگی جرمی گاز است. چون مقدار یونش واحد جرم گاز مستقیماً متناسب با dE_g/dM_g است، معادله قبلی (۱۳.۶) را می توان به صورت زیر درآورد

$$\frac{dE_m}{dM_m} = \rho_m \times w \times J \quad (14.6)$$

در این معادله ρ_m نسبت توانهای ایستاندگی جرمی جامد به گاز، S_m/S_g ، w میانگین انرژی تلف شده در تولید یک زوج یون در گاز، و J تعداد زوج یونهای تولیدی در واحد جرم گاز است. مقدار ρ_m الکترونیهای با هر انرژی را می توان با استفاده از معادله های توان ایستاندگی (فصل ۵) به آسانی محاسبه کرد. در مواردی که گاز محفظه مثلاً به صورت متان یا پارافین و همانند دیواره اتاقک باشد، مقدار ρ_m برابر با واحد خواهد شد. جدول ۱۰.۶ نسبتهای توان ایستاندگی چندین جسم را نسبت به هوا برای الکترونیهای تک انرژی نشان می دهد. اما مسئله محاسبه ρ_m در مورد تابش گاما تا حدی دشوارتر است؛ زیرا کسر نسبی پرتوهای گاما که از طریق هریک از سازوکارهای رقیب برهم کنش خواهند کرد و همچنین توزیع طیفی الکترونیهای اولیه (حاصل از فرایندهای کامپتون، فوتوالکتریک، و زوج

جدول ۱۰.۶ مقادیر میانگین توان ایستاندگی جرمی نسبت به هوا، برای طیفهای تعادل الکترونی حاصل از الکترونیهای اولیه تک انرژی.

انرژی اولیه (MeV)	عنصر شیمیایی و حالت بستگی مولکولی								
	هیدروژن شده اشباع	هیدروژن نشده اشباع	کربن اشباع شده	کربن اشباع نشده	کربن کاملاً کلردار شده	نیتروژن در آمینها و نیتراها	نیتروژن در ترکیبات حلقوی	اکسیژن، -O-	اکسیژن، O=
0.1	2.52	2.59	1.016	1.021	1.047	0.976	1.018	0.978	0.994
0.2	2.52	2.59	1.015	1.019	1.043	0.978	1.016	0.979	0.995
0.3	2.48	2.55	1.014	1.018	1.040	0.979	1.016	0.981	0.995
0.327	2.48	2.54	1.014	1.018	1.040	0.979	1.015	0.981	0.995
0.4	2.46	2.53	1.014	1.018	1.038	0.980	1.015	0.981	0.996
0.5	2.44	2.51	1.013	1.017	1.037	0.980	1.015	0.982	0.996
0.6	2.44	2.50	1.012	1.016	1.035	0.980	1.013	0.981	0.995
0.654	2.43	2.49	1.011	1.014	1.034	0.979	1.012	0.981	0.994
0.7	2.42	2.48	1.010	1.013	1.033	0.978	1.011	0.980	0.993
0.8	2.40	2.46	1.009	1.012	1.031	0.978	1.010	0.979	0.992
1.0	2.39	2.44	1.004	1.008	1.026	0.975	1.005	0.977	0.988
1.2	2.37	2.42	1.001	1.004	1.022	0.973	1.002	0.974	0.985
1.308	2.36	2.42	0.999	1.002	1.019	0.971	1.000	0.972	0.983
1.5	2.35	2.39	0.995	0.998	1.015	0.967	0.996	0.969	0.980

جدول ۲.۶ توان ایستاندگی جرمی میانگین نسبت به هوا، S_m/S_a ، برای طیفهای تعادل الکترونی ناشی از ^{198}Au ، ^{137}Cs و ^{60}Co ، با فرض کندشدن پیوسته الکترونها.

محیط			انرژی (MeV)
گرافیت	آب	بافت بدن	
۱۰۳۲			۰۴۱۱ (^{198}Au)
۱۰۲۷	۱۰۱۶۲	۱۰۱۲۵	۰۶۷۵ (^{137}Cs)
۱۰۱۷	۱۰۱۵۵	۱۰۱۳۷	۱۰۲۵ (^{60}Co)

الکترون) را باید در نظر گرفت، و مقدار میانگین توان ایستاندگی نسبی را باید تعیین کرد. در جدول ۲.۶ مقادیر میانگین توانهای نسبی ایستاندگی جرمی مربوط به طیفهای تعادل الکترونی پرتوهای گاما حاصل از ^{198}Au ، ^{137}Cs و ^{60}Co آمده است. میانگین انرژی لازم برای تولید یک زوج یون در هوا، W ، برابر 34 eV است. برای تعیین دز تابش جذب‌شده، فقط اندازه‌گیری یونش در واحد حجم گاز، J ، مورد نیاز است.

مثال ۵.۶

با استفاده از اطلاعات زیر آهنگ دز جذب‌شده در یک اتاقک معادل بافت را محاسبه کنید. این اتاقک با دیواره‌های معادل که در داخل یک مدل مصنوعی بدن قرار دارد به مدت ۱۵ دقیقه در معرض پرتوهای گامای ^{60}Co قرار می‌گیرد. حجم هوا در داخل اتاقک برابر 1 cm^3 ، ظرفیت خازن برابر $5\text{ }\mu\text{F}$ است و افت ولتاژ در دوسر اتاقک در اثر پرتوگیری گاما برابر 72 V است.

حل: بار الکتریکی جمع‌شده در اتاقک برابر است با

$$\begin{aligned} Q &= C\Delta V \\ &= 5 \times 10^{-12}\text{ F} \times 72\text{ V} \\ &= 3.6 \times 10^{-10}\text{ C} \end{aligned}$$

و تعداد الکترونها جمع‌شده که با زوج‌یونهای تشکیل‌شده در محفظه متناظر است برابر است با

$$\frac{3.6 \times 10^{-10}\text{ C}}{1.6 \times 10^{-19}\text{ C/الکترون}} = 2.25 \times 10^9\text{ الکترون}$$

چون به ازای تشکیل هر زوج یون در هوا 34 eV الکترون ولت انرژی مصرف می‌شود، و نیز

توان ایستاندگی بافت نسبت به هوا برابر ۱۰۱۳۷ است، بنابراین از رابطه براگ-گری یا معادله (۷.۶) نتیجه می‌شود که

$$\frac{dE_m}{dM_m} = \rho_m \times w \times J$$

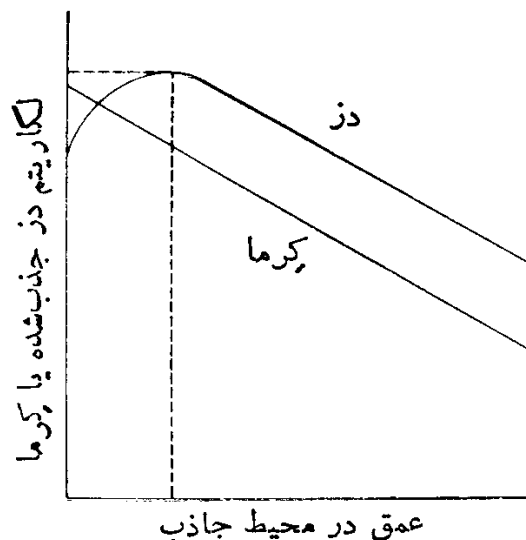
$$= \frac{1.0137 \times 34 \text{ eV/زوج یون} \times 2.25 \times 10^9 \text{ زوج یون/cm}^2 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}}{1.293 \times 10^{-6} \text{ kg/cm}^3 \times 1 \text{ J/kg.Gy}^{-1}}$$

$$= 0.0108 \text{ Gy}$$

چون مدت پرتوگیری ۱۰ دقیقه بوده است، آهنگ دز برابر ۱.۰۸ mGy/min خواهد شد.

کرما

در مورد تابش یوننده غیرمستقیم، مثل پرتوهای ایکس و نوترونها، گاهی به انرژی جنبشی ذرات یوننده اولیه (مثل فوتوالکترونها، الکترونها، کامپتون یا زوجهای پوزیترون-الکترون در مورد تابش فوتون، و هسته‌های پراکنده شده در مورد نوترونها) که از برهم کنش تابش فرودی با واحد جرم محیط برهم کنش کننده تولید می‌شود، احتیاج داریم. این کمیت که کرما نام دارد در دستگاه یکاهای SI بر حسب ژول بر کیلوگرم یا گری (و راد در دستگاههای قبلی) اندازه گیری می‌شود. کرما، به علت کاهش پیوسته شار تابش یوننده غیرمستقیم، با افزایش عمق محیط جاذب کاهش می‌یابد. اما دز جذب شده با افزایش عمق تا رسیدن به یک مقدار بیشینه افزایش می‌یابد، زیرا چگالی ذرات یوننده اولیه و ذرات ثانویه‌ای که این ذرات تولید می‌کنند زیاد می‌شود، و سپس با ادامه افزایش عمق کاهش می‌یابد. دز جذب شده در عمقی که تقریباً با برد بیشینه ذرات یوننده اولیه برابر است به مقدار بیشینه می‌رسد. رابطه بین کرما و دز تابش فوتون یا نوترونها، در شکل ۷.۶ نشان داده شده است.



شکل ۷.۶ رابطه بین کرما و دز تابش فوتون یا نوترونها، تندر.

قدرت چشمه: گسیل ویژه پرتوگاما

شدت تابش هر چشمه پرتوگامای معین را به عنوان معیاری برای قدرت چشمه به کار می‌برند. آهنگ پرتودهی تابش گامای يك چشمه نقطه‌ای با فعالیت واحد و در فاصله واحد را گسیل ویژه پرتوگاما می‌نامند و آن را بر حسب کولن بر کیلوگرم بر ساعت در فاصله يك متری از يك چشمه نقطه‌ای ۱ MBq مشخص می‌کنند (در گذشته، این کمیت را بر حسب R بر ساعت در فاصله ۱ متری از يك چشمه نقطه‌ای ۱ Ci مشخص می‌کردند). در صورتی که چگونگی واپاشی ایزوتوپ مورد استفاده معلوم باشد، می‌توان قدرت چشمه را به سادگی محاسبه کرد. به عنوان مثال در مورد ^{131}I که پرتوهای گامای آن در شکل ۷.۴ و ضرایب جذب واقعی هر يك از پرتوها در شکل ۱۸.۵ آمده است، داریم:

ضریب جذب انرژی برای هوا	تعداد فوتون به ازای هر فروپاشی	انرژی کوانتومی (MeV)
$3.78 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$	۰.۰۱۶	۰.۷۲۳
3.79×10^{-3}	۰.۰۶۹	۰.۶۳۷
3.78×10^{-3}	۰.۰۰۳	۰.۵۰۳
3.78×10^{-3}	۰.۰۰۲	۰.۳۲۶
3.74×10^{-3}	۰.۰۰۲	۰.۱۷۷
3.78×10^{-3}	۰.۸۵۳	۰.۳۶۵
3.77×10^{-3}	۰.۰۵۱	۰.۲۸۴
3.72×10^{-3}	۰.۰۵۱	۰.۰۸۰
3.73×10^{-3}	۰.۰۰۶	۰.۱۶۴

با توجه به انرژی جذب شده در واحد جرم هوا در فاصله معینی از چشمه نقطه‌ای ۱ MBq در اثر شار فوتونی در آن فاصله، سطح پرتودهی تابش گاما را با استفاده از معادله (۱۵.۶) می‌توان محاسبه کرد

$$\dot{X} = \frac{f \times E \text{ MeV/فوتون} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}}{4\pi(1 \text{ m})^2 \times \rho \text{ kg/m}^3 \times 34 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \frac{\text{C}}{\text{kg}}} \times 1 \times 10^6 \text{ tps/MBq} \times 3600 \text{ s/h} \times \mu \text{ m}^{-1} \quad (15.6)$$

که در آن X آهنگ پرتوگیری (کولن بر کیلو گرم بر ساعت)، f کسر تبدیلاتی است که منجر به تولید یک فوتون با انرژی کوانتومی مورد نظر می‌شوند، E انرژی فوتون (MeV)، μ ضریب جذب خطی انرژی (m^{-1})، و ρ چگالی هوا (kg/m^3) است. این محاسبه را برای انواع مختلف انرژی فوتونها انجام می‌دهند، و از مجموع آنها قدرت چشمه را به دست می‌آورند. به عنوان مثال، برای پرتو گامای $MeV 0.080$ ، محاسبه به شرح زیر خواهد بود

$$\dot{X} = \frac{5.1 \times 10^{-2} \times 1 \times 10^{-2} \times 1.6 \times 10^{-13} \times 1 \times 10^6 \times 3.6}{4\pi(1)^2 \times 1.293 \times 34} \times 10^2 \times 3.2 \times 10^{-2}$$

$$= 1.36 \times 10^{-11} \frac{C/(kg \cdot h)}{MBq}$$

آهنگ پرتو دهی هر کدام از سایر فوتونهای گسیل شده از ^{131}I را با همین روش می‌توان محاسبه کرد، بجز اینکه ضریب جذب و کسرهاوانی هر یک از فوتونهای با انرژی مختلف را باید در نظر گرفت. نتایج حاصل از این محاسبات را در جدول زیر مشاهده می‌کنید:

در فاصله ۱ متری $C/(kg \cdot h)$	انرژی کوانتومی (MeV)
4.583×10^{-11}	۰.۷۲۳
1.7787×10^{-11}	۰.۶۳۷
0.598×10^{-11}	۰.۵۰۳
0.258×10^{-11}	۰.۳۲۶
0.126×10^{-11}	۰.۱۷۷
1.237400×10^{-11}	۰.۳۶۵
5.569×10^{-11}	۰.۲۸۴
1.361×10^{-11}	۰.۰۸۰
0.339×10^{-11}	۰.۱۶۴
در یک متر $C/kg \cdot h$ $1.540 \times 10^{-9} MBq$ جمع کل	

۱. در هر t تبدیل هسته‌ای f فوتون گسیل می‌شود.

معادله (۱۵.۶) شامل چندین مقدار ثابت است که عبارت‌اند از: 1×10^6 تبدیل در هر ثانیه بر MBq، 3.6×10^3 s/h، 1.6×10^{-13} J/MeV، $4\pi(1)^2$ ، 1.293 kg/m^3 ، و 34 J/kg به ازای هر C/kg. اگر این مقادیر ثابت با هم ترکیب شوند، قدرت چشمه در فاصله ۱ متری، Γ ، بر حسب C/kg به ازای هر MBq از رابطه زیر به دست می‌آید

$$\Gamma = 1.293 \times 10^{-6} \sum_i f_i \times E_i \times \mu_i \frac{(\text{C/kg})\text{m}^2}{\text{MBq}\cdot\text{h}} \quad (16.6)$$

که در آن f_i کسر تبدیل ایزوتوپ برای گسیل i امین فوتون، E_i انرژی i امین فوتون، و

جدول ۳.۶ گسیل ویژه پرتوگاما برای چند ایزوتوپ پرتوزا.

Γ		ایزوتوپ
$\frac{X \cdot \text{m}^2}{\text{MBq} \cdot \text{h}}$	$\frac{R \cdot \text{m}^2}{\text{Ci} \cdot \text{h}}$	
$1.67 \text{E}-09$	۰.۲۴	آنتیموان-۱۲۲
$2.30 \text{E}-09$	۰.۳۳	سزیم-۱۳۷
$1.11 \text{E}-10$	۰.۰۱۶	کروم-۵۱
$9.19 \text{E}-09$	۱.۳۲	کیالت-۶۰
$1.60 \text{E}-09$	۰.۲۳	طلا-۱۹۸
$2.87 \text{E}-10$	۰.۰۷	ید-۱۲۵
$1.53 \text{E}-09$	۰.۲۲	ید-۱۳۱
$3.34 \text{E}-09$	۰.۴۸	ایریدیم-۱۹۲
$9.05 \text{E}-10$	۰.۱۳	جیوه-۲۰۳
$1.39 \text{E}-09$	۰.۱۴	پتاسیم-۴۲
$5.75 \text{E}-09$	۰.۸۲۵	رادیوم-۲۲۶
$8.36 \text{E}-09$	۱.۲۰	سدیم-۲۲
$1.280 \text{E}-09$	۱.۸۴	سدیم-۲۲
$1.88 \text{E}-09$	۰.۲۷	روی-۶۵

$1 \text{X} (\text{یکای ایکس}) = 1 \text{C/kg} *$

μ ضریب جذب خطی انرژی در هوا برای γ امین فوتون است. در اکثر موارد، معادله (۱۶.۶) را می‌توان ساده کرد. در مورد انرژیهای کوانتومی از ۶۰ keV تا ۲ MeV ضریب جذب خطی انرژی فقط اندکی با انرژی تغییر می‌کند. μ در این گستره در حدود $3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ خواهد بود و در نتیجه معادله (۱۶.۶) به شکل زیر ساده می‌شود

$$\Gamma = 3.365 \times 10^{-9} \sum_i f_i \times E_i \frac{(\text{C/kg}) \text{ m}^2}{\text{MBq} \cdot \text{h}} \quad (17.6)$$

هرگاه پرتو دهی بر حسب رونتگن و فعالیت بر حسب کوری اندازه گیری شود، گسیل ویژه پرتوگاما تقریباً برابر است با

$$\Gamma = 0.5 \sum_i f_i \times E_i \frac{\text{R} \cdot \text{m}^2}{\text{Ci} \cdot \text{h}} \quad (18.6)$$

در جدول ۳.۶ گسیل ویژه پرتوگاما برای چند ایزوتوپ که غالباً مورد نیاز متخصصان فیزیک بهداشت هستند، آمده است.

رسوب ایزوتوپهای پرتوزا در داخل بدن

تابش ذره‌ای

دز جذب شده حاصل از ایزوتوپهای پرتوزای رسوب یافته در داخل بدن را می‌توان مستقیماً با استفاده از تعریف گری محاسبه کرد. در یک محیط بزرگ و نامتناهی، که در آن ایزوتوپ پرتوزا به طور یکنواخت توزیع شده است، تراکم انرژی جذب شده باید با تراکم انرژی گسیل شده به وسیله ایزوتوپ برابر باشد. بنا به تعریف، انرژی جذب شده در واحد جرم به ازای هر واپاشی را انرژی مؤثر ویژه (SEE) می‌گویند. برای مقاصد عملیاتی فیزیک بهداشت، مفهوم «بزرگ و نامتناهی» را می‌توان به تقریب جرم بافتی در نظر گرفت که ابعاد آن از برد تابش ایزوتوپ توزیع شده بیشتر است. در مورد تابش آلفا و بیشتر موارد تابش بتا این شرط در عمل به راحتی برآورده می‌شود، و انرژی مؤثر ویژه صرفاً از تقسیم انرژی متوسط تابش بر جرم بافتی که این انرژی در آن توزیع شده است، به دست می‌آید

$$\text{SEE}(\alpha \text{ یا } \beta) = \frac{\bar{E}(\alpha \text{ یا } \beta)}{m} \frac{\text{MeV}}{\text{t}} / \text{kg} \quad (19.6)$$

مثال زیر، روش محاسبه دز تابش جذب شده از یک گسیلنده بتا با توزیع یکنواخت را در داخل بافت نشان می‌دهد.

مثال ۶.۶

یک بیضه به وزن ۱۸ گرم محتوی 6660 Bq ایزوتوپ پرتوزای ^{35}S با توزیع یکنواخت است، آهنگ دز روزانه آن را حساب کنید.

حل: در این مثال گوگرد گسیلنده خالص بتاست که انرژی بیشینه آن برابر 1674 MeV و میانگین انرژی آن برابر 488 MeV است. آهنگ دز ناشی از $q \text{ Bq}$ پرتو بتا که به طور یکنواخت در بافتی به جرم $m \text{ kg}$ توزیع شده است، در صورتی که انرژی مؤثر ویژه به ازای هر واپاشی در هر کیلوگرم برابر $\text{SEE}(\text{MeV})$ باشد عبارت است از

$$\dot{D}(\beta) = \frac{q \text{ Bq} \times 1 \text{ tps/Bq} \times \text{SEE} \frac{\text{MeV}}{\text{t}} \text{ kg} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}}{1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \text{Gy}} \times 86400 \times 10^4 \text{ s/d} \quad (20.6)$$

با قراردادن معادله (۱۹.۶) در (۲۰.۶) خواهیم داشت

$$\begin{aligned} \dot{D}(\beta) &= \frac{q \text{ Bq} \times 1 \text{ tps/Bq} \times \bar{E} \text{ MeV/t} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}}{m \text{ kg} \times 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \text{Gy}} \times 86400 \times 10^4 \text{ s/d} \quad (21.6) \\ &= \frac{666 \times 10^3 \times 1 \times 488 \times 10^{-2} \times 1.6 \times 10^{-13} \times 86400 \times 10^4}{0.018 \times 1} \\ &= 2.5 \times 10^{-4} \text{ Gy/d} \quad (0.25 \text{ rad/d}) \end{aligned}$$

نیمه عمر مؤثر

با گرفتن انتگرال از آهنگ دز در فاصله زمانی لازم، می توان دز کلی جذب شده در بیضه را در یک فاصله زمانی معین بعد از رسوب گوگرد محاسبه کرد. در این محاسبه دو عامل را باید در نظر گرفت.

۱. واپاشی فیزیکی ایزوتوپ پرتوزا؛

۲. دفع زیست شناختی ایزوتوپ.

در اکثر موارد، دفع زیست شناختی از سینتیک مرتبه اول تبعیت می کند. در این صورت، مقدار ایزوتوپ پرتوزا در داخل عضو، در زمان t بعد از رسوب مقدار Q_0 ، عبارت است از

$$Q = (Q_0 e^{-\lambda_R t})(e^{-\lambda_B t}) \quad (22.6)$$

که در آن λ_R ثابت واپاشی ایزوتوپ پرتوزا، و λ_B ثابت دفع زیست‌شناختی است. دو تابع نمایی در معادله (۲۲.۶) را می‌توان به صورت زیر تلفیق کرد

$$Q = Q_0 e^{-(\lambda_R + \lambda_B)t} \quad (23.6)$$

و با قراردادن

$$\lambda_E = \lambda_R + \lambda_B \quad (24.6)$$

خواهیم داشت

$$Q = Q_0 e^{-\lambda_E t} \quad (25.6)$$

که در آن λ_E ثابت دفع مؤثر نامیده می‌شود. بدین سان، نیمه عمر مؤثر برابر خواهد بود با

$$T_E = \frac{0.693}{\lambda_E} \quad (26.6)$$

با در نظر گرفتن رابطه بین λ_R ، λ_E و λ_B خواهیم داشت

$$\frac{1}{T_E} = \frac{1}{T_R} + \frac{1}{T_B} \quad (27.6)$$

یا

$$T_E = \frac{T_R \times T_B}{T_R + T_B} \quad (28.6)$$

در مثال ۶.۶ برای ^{35}S داریم: (روز) $T_R = 87.1$ و T_B یا نیمه عمر زیست‌شناختی ایزوتوپ در بیضه برابر ۶۲۳ روز است. بنابراین، نیمه عمر مؤثر عبارت خواهد بود از

$$T_E = \frac{87.1 \times 623}{87.1 + 623} = 76.4 \text{ d}$$

و ثابت دفع مؤثر برابر است با

$$\lambda_E = \frac{0.693}{76.4} = 0.009 \text{ d}^{-1}$$

دزکل: انباشت دز

مقدار دز دریافتی در فاصله زمانی بی نهایت کوچک dt ، در زمان t پس از دریافت دز اولیه با آهنگ $\dot{D}_0$ ، برابر است با

$$dD = \text{آهنگ دز لحظه‌ای} \times dt \\ = \dot{D}_0 e^{-\lambda_E t} dt \quad (29.6)$$

دزکل در فاصله زمانی T پس از رسوب ایزوتوپ عبارت است از

$$D = \dot{D}_0 \int_0^T e^{-\lambda_E t} dt \quad (30.6)$$

که پس از انتگرال گیری، حاصل می شود

$$D = \frac{\dot{D}_0}{\lambda_E} (1 - e^{-\lambda_E T}) \quad (31.6)$$

برای يك زمان بی نهایت طولانی، یعنی مدت زمانی که طی آن ایزوتوپ کاملاً از بین می رود، معادله (31.6) به صورت خلاصه زیر درمی آید

$$D = \frac{\dot{D}_0}{\lambda_E} \quad (32.6)$$

«زمان بی نهایت طولانی» در موارد عملی متناظر است با تقریباً شش برابر نیمه عمر مؤثر. لازم به تذکر است که دز ناشی از واپاشی کل صرفاً برابر است با حاصل ضرب آهنگ اولیه دز ($\dot{D}_0$) در عمر میانگین ایزوتوپ پرتوزا در داخل اندام ($1/\lambda_E$). بنابراین، در مثال ۶.۶ دز جذب شده در طی پنج روز اولیه بعد از رسوب گوگرد پرتوزا در بیضه از معادله (31.6) به دست می آید

$$D = \frac{2.75 \times 10^{-4} \text{ Gy/d}}{0.0009 \text{ d}^{-1}} (1 - e^{-0.0009 \text{ d}^{-1} \times 5 \text{ d}})$$

$$= 1.2 \times 10^{-2} \text{ Gy} (0.12 \text{ rad})$$

و دز واپاشی کل، از معادله (32.6) نتیجه می شود

$$D = \frac{2.75 \times 10^{-4} \text{ Gy/d}}{0.0009 \text{ d}^{-1}} = 0.028 \text{ Gy} (2.8 \text{ rad})$$

کل دز جذب شده 0.028 Gy از رسوب گوگرد پرتوزا را دز انباشته این تابش در

بیضه می گویند. دذانباشته را به صورت دز جذب شده از يك عمل معین یا از يك پرتوگیری معین تعریف می کنند. اگرچه انباشت دز در این مثال مربوط به ایزوتوپ پرتوزای رسوب یافته در داخل بود، ولی مفهوم آن برای تابش ناشی از چشمه های خارج از بدن نیز همانند تابش ناشی از ایزوتوپهای پرتوزای داخلی قابل استفاده است.

در مثال بالا، رفتار بیضه طوری است که گویی ایزوتوپ پرتوزا فقط در يك محل انباشته شده است، در صورتی که ایزوتوپ پرتوزا اغلب در بیش از يك قسمت ذخیره می شود. مواد رسوب شده در هر قسمت از سینتیک مرتبه اول پیروی می کند، و با آهنگ دفع خاص خود تخلیه می شود. مثلاً معلوم شده است که سزیم به طور یکنواخت در تمام بدن توزیع می شود، اما بدن انسان طوری رفتار می کند که گویی سزیم در دو قسمت انباشته شده است. يك قسمت شامل ۱۰٪ بار بدنی کل با نیمه عمر احتباس ۲ روز، و قسمت دیگر شامل ۹۰٪ محتوای سزیم بدن با نیمه عمر دفع ۱۱۰ روز است. بنابراین، منحنی احتباس سزیم از معادله زیر به دست می آید

$$q(\tau) = 0.1 q_0 e^{-(0.693\tau/2d)} + 0.9 q_0 e^{-(0.693\tau/110d)} \quad (33.6)$$

که در آن $q(\tau)$ بار بدنی پس از گذشت زمان τ از رسوب مقدار q_0 از ایزوتوپ سزیم در بدن است. مقدار ۱۰٪ بار کل در قسمت اول و ۹۰٪ در قسمت دوم رسوب می کند. معمولاً اگر بیش از يك قسمت وجود داشته باشد، بار بدنی پس از گذشت زمان τ از رسوب مقدار q_0 از رابطه زیر به دست می آید

$$q(\tau) = q_{10} e^{-\lambda_1 \tau} + q_{20} e^{-\lambda_2 \tau} + \dots + q_{n0} e^{-\lambda_n \tau} \quad (34.6)$$

که در آن $q_{10}, q_{20}, \dots, q_{n0}$ به ترتیب مقدار رسوب اولیه در قسمت های ۱، ۲، ...، و n ، و $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ آهنگ دفع مؤثر از قسمت ۱، ۲، ...، و n را نشان می دهد. چون فعالیت هر قسمت سهمی در دز اندام یا بافت بدن دارد، معادله (۳۱.۶) برای موارد چند قسمتی چنین خواهد شد

$$D = \frac{\dot{D}_{10}}{\lambda_{1E}} (1 - e^{-\lambda_{1E} \tau}) + \frac{\dot{D}_{20}}{\lambda_{2E}} (1 - e^{-\lambda_{2E} \tau}) + \dots + \frac{\dot{D}_{n0}}{\lambda_{nE}} (1 - e^{-\lambda_{nE} \tau}) \quad (35.6)$$

و در حالتی که ایزوتوپ کاملاً از بین رفته باشد، معادله (۳۵.۶) به صورت زیر درمی آید

$$D = \frac{\dot{D}_{10}}{\lambda_{1E}} + \frac{\dot{D}_{20}}{\lambda_{2E}} + \dots + \frac{\dot{D}_{n0}}{\lambda_{nE}} \quad (36.6)$$

گسیلنده‌های گاما

در مورد ایزوتوپهای گسیلنده گاما محاسبه دز جذب شده با فرض بی نهایت بزرگ گرفتن اندام به آسانی میسر نیست، زیرا تابش گاما نفوذپذیری زیادی دارد و می تواند فواصل زیادی را در درون بافت طی کند، و بدون آنکه با بافت برهم کنشی داشته باشد آن را ترك کند. از این رو، فقط کسری از انرژی فوتونهایی که در ایزوتوپ پرتوزای داخل بافت تولید می شوند در آن بافت جذب می شود.

همان گونه که در شکل ۸.۶ نشان داده شده است، برای ایزوتوپ گاما گسیلی که به طور یکنواخت توزیع شده است، آهنگ دز در نقطه ای مانند p در اثر ایزوتوپهای موجود در حجم بی نهایت كوچك dV که به فاصله r از p قرار دارد به صورت زیر خواهد بود

$$dD = C\Gamma \frac{e^{-\mu r}}{r^2} dV \quad (37.6)$$

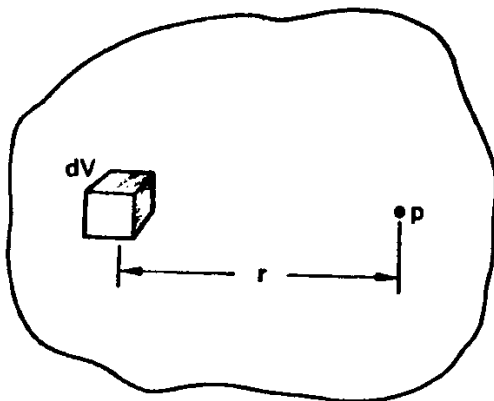
که در آن C تراکم ایزوتوپ، Γ گسیل ویژه پرتو گاما، و μ ضریب خطی جذب انرژی است. آهنگ دز ناشی از کل ایزوتوپ موجود در بافت در نقطه p از انتگرال زیر محاسبه می شود

$$D = C\Gamma \int_0^V \frac{e^{-\mu r}}{r^2} dV \quad (38.6)$$

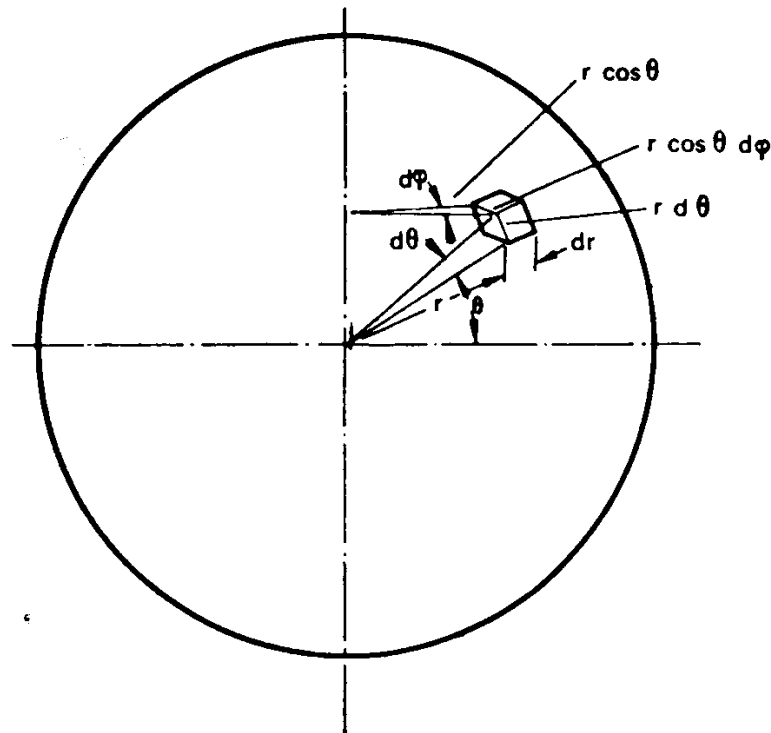
در حالت محیط کروی، آهنگ دز در مرکز کره عبارت است از

$$D = 4C\Gamma \int_{r=0}^R \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \frac{e^{-\mu r}}{r^2} \cdot r d\theta \cdot r \cos \theta d\varphi \cdot dr \quad (39.6)$$

با انتگرال گیری نسبت به هر يك از متغیرها می توان آهنگ دز در مرکز کره را به دست آورد



شکل ۸.۶ نمودار محاسبه دز ناشی از پرتوهای گامای گسیل شده از جزء حجم dV در نقطه p در محیطی که ایزوتوپ پرتوزا به طور یکنواخت در آن توزیع شده است.



شکل ۹.۶ طرح هندسی استفاده از معادله (۳۸.۶) برای محاسبه دز جذب شده در مرکز کره.

$$D = D\Gamma \cdot \frac{4\pi}{\mu} (1 - e^{-\mu R}) \quad (40.6)$$

از بررسی معادلات (۳۷.۶)، (۳۸.۶)، و (۳۹.۶) به این نتیجه می‌رسیم که ضریب CT فقط به شکل هندسی اندام مورد نظر بستگی دارد، به همین دلیل آن را عامل هندسی می‌گویند. عامل هندسی را با g نشان می‌دهند و به صورت زیر تعریف می‌کنند

$$g = \int_V \frac{e^{-\mu r}}{r^2} dV \quad (41.6)$$

بنابراین، معادله (۳۸.۶) به صورت زیر باز نویسی می‌شود

$$D = CT g \quad (42.6)$$

تعریفی از g که با معادله (۴۱.۶) داده شد، در مورد هر نقطه‌ای از حجم بافت مورد نظر صادق است. در فیزیک بهداشت، در اکثر موارد آهنگ دز میانگین مورد نظر است نه آهنگ دز در یک نقطه معین. برای این منظور عامل هندسی میانگین را به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$\bar{g} = \frac{1}{V} \int_V g dV \quad (43.6)$$

جدول ۴.۶ عوامل هندسی میانگین برای استوانه‌های مختلف محتوی ایزوتوپهای گسیلنده گاما با توزیع یکنواخت.

شعاع استوانه به cm								ارتفاع استوانه به cm
۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵	۳	
۳۹۰۳	۳۸۰۶	۳۷۰۵	۳۶۰۲	۳۴۰۰	۳۰۰۳	۲۲۰۱	۱۷۰۵	۲
۷۰۰۵	۶۷۰۹	۶۵۰۲	۶۱۰۶	۵۶۰۴	۴۷۰۷	۳۱۰۸	۲۲۰۳	۵
۱۰۳	۹۸۰۴	۹۳۰۴	۸۶۰۵	۷۶۰۱	۶۱۰۳	۳۸۰۱	۲۵۰۱	۱۰
۱۳۳	۱۲۶	۱۱۷	۱۰۵	۸۹۰۸	۶۸۰۹	۴۰۰۵	۲۵۰۷	۲۰
۱۴۶	۱۳۷	۱۲۶	۱۱۲	۹۴۰۶	۷۱۰۳	۴۱۰۰	۲۵۰۹	۳۰
۱۵۳	۱۴۳	۱۳۱	۱۱۶	۹۶۰۵	۷۲۰۴	۴۱۰۳	۲۵۰۹	۴۰
۱۵۹	۱۴۸	۱۳۴	۱۱۸	۹۷۰۸	۷۳۰۰	۴۱۰۶	۲۶۰۰	۶۰
۱۶۱	۱۵۰	۱۳۵	۱۱۹	۹۸۰۴	۷۳۰۳	۴۱۰۶	۲۶۰۰	۸۰
۱۶۲	۱۵۰	۱۳۶	۱۱۹	۹۸۰۵	۷۳۰۳	۴۱۰۶	۲۶۰۰	۱۰۰

که در مورد کره چنین خواهد شد

$$\bar{g} = \frac{4}{3}(g)_{\text{مرکز}} \quad (۴۴.۶)$$

اما عامل هندسی برای هر نقطه‌ای از کره که به فاصله d از مرکز قرار داشته باشد، عبارت است از

$$g_p = (g)_{\text{مرکز}} \left[0.5 + \frac{1 - (d^2/R)}{4(d/R)} \ln \frac{1 + d/R}{|1 - d/R|} \right] \quad (۴۵.۶)$$

عامل هندسی میانگین برای استوانه، به شعاع و ارتفاع آن بستگی دارد. جدول ۴.۶ مقادیر عددی $\bar{g}$ را در استوانه‌هایی به شعاع و ارتفاع مختلف به دست می‌دهد.

مثال ۴.۶

یک مخزن کروی به گنجایش ۱ متر مکعب و شعاع ۰.۶۲ متر از پسماند مایع ^{137}Cs با

فعالیت کل (۱Ci) 37000 MBq پر شده است. اگر مقدار جذب در دیواره مخزن ناچیز فرض شود، آهنگ دز در سطح مخزن چقدر است؟

حل: از روی جدول ۳.۶ مقدار Γ در فاصله ۱ متری برابر با 2.3×10^{-9} یکای ایکس بر ساعت بر MBq به دست می آید. چون آب 38 Gy/X را جذب می کند، آهنگ دز در فاصله ۱ متری برابر 8.74×10^{-8} گری بر ساعت بر MBq خواهد شد. ضریب جذب آب برای پرتوهای گامای 1.04 MeV ناشی از ^{137}Cs بنا بر جدول ۳.۵ برابر $0.0327 \text{ cm}^2/\text{g}$ است. چون چگالی آب برابر 1 g/cm^3 است، ضریب جذب خطی برابر 0.0327 بر سانتی متر یا 3.27 بر متر خواهد بود. آهنگ دز در مرکز کره، با گذاشتن مقادیر مربوط در معادله (۴.۶) به دست خواهد آمد

$$\begin{aligned} \dot{D}_0 &= 3.7 \times 10^4 \text{ MBq/m}^3 \times 8.74 \times 10^{-8} \frac{\text{Gy} \cdot \text{m}^2}{\text{MBq} \cdot \text{h}} \\ &\times \frac{4\pi}{3.27 \text{ m}^{-1}} (1 - e^{-3.27 \times 0.62}) \\ &= 1.08 \times 10^{-2} \text{ Gy/h} \quad (1.08 \text{ rad/h}) \end{aligned}$$

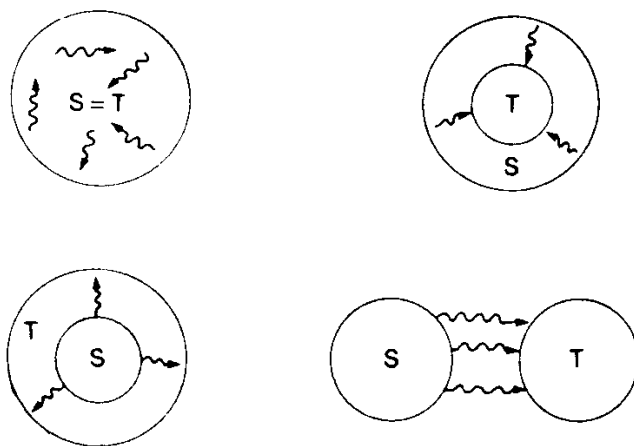
از معادله (۴.۶) به این نتیجه می رسیم که آهنگ دز سطحی برابر با $0.5 \times D_0$ است

$$\therefore \dot{D}_{\text{سطح}} = 0.5 \times 1.08 \times 10^{-2} = 0.54 \times 10^{-2} \text{ Gy/h} \quad (0.54 \text{ rad/h})$$

روش MIRD

کمیت دز تابش داخلی درمانی (MIRD) انجمن پزشکی هسته ای برای محاسبه جذب جزئی انرژی پرتوگاما در اندامها و بافتها روشی ارائه داده است که با آن می توان دز جذب شده در اندام یا بافت «هدف» (T) را بر اثر تابش اندام «چشمه» (S) که ایزوتوپ پرتوزا در آن به طور یکنواخت توزیع شده است محاسبه کرد. این روش بر مفهوم کسر جذب شده مبتنی است، یعنی کسری از انرژی تابیده از اندام چشمه که در اندام هدف جذب می شود. S و T می توانند یک اندام و یا دو اندام مختلف باشند که به یکی از صورتهایی که در شکل ۱۰.۶ دیده می شود باهم ارتباط دارند. این کسرهای جذب شده را می توان با اعمال روشهای مونت کارلو در مورد برهم کنش فوتونها یا الکترونها گسیل شده از نوکلید پرتوزای رسوب یافته محاسبه کرد.

برای حل مسائلی چون برهم کنش فوتونها با ماده که بیشتر تابع قانون احتمالات است تا قانون قطعی باید از روشهای مونت کارلو سود جست. در راه حلهای مونت کارلو، تک تک فوتونها (یا هر تابش ذره ای دیگری) توسط کامپیوتر شبیه سازی می شود و برهم کنش آنها در تمام مراحل مورد «رسیدگی» قرار می گیرد. چون فرض بر این است که ایزوتوپ



شکل ۱۵۰۶ ارتباط فیزیکی ممکن میان اندامهای چشمه و هدف.

پرتوزا در سرتاسر يك حجم معين به طور يکنواخت توزیع می شود، و چون تبدیل پرتوزا يك فرايند کتره ای است که با آهنگ متوسطی که مشخصه ذاتی هر ایزوتوپ معين است به وقوع می پیوندد، می توانيم اين فرايند را با راه اندازی کتره ای يك تبدیل پرتوزا آغاز كنيم (این فرايند کتره ای را در فضا و زمان در نظر می گیریم و آن را محدود به حجم معين و ثابت واپاشی نوکلید مشخص می دانیم). در اینجا انرژی تابش گسیل شده، نقطه شروع حرکت، و جهت اولیه حرکت ذره تابشی در هر کدام از اين تبديلهای معلوم است. همچنین احتمال هر نوع برهم کنش ممکن در داخل اندام، و انرژی منتقل شده طی برهم کنش نیز معلوم است. با راه اندازی تعداد بسيار زيادی از اين تبديلات هسته ای، دنبال کردن تاريخچه هر ذره ضمن عبور آن از بافت هدف، و جمع کردن مقدار کل انرژی که ذرات در داخل اين بافت هدف از دست می دهند، هروضعیتی قابل شبیه سازی است. به عنوان مثال برای تمرکز ۱ Bq در هر سانتی متر مکعب بافت، به ۱ تبدیل هسته ای در هر سانتی متر مکعب در ثانیه نیاز خواهد بود. چون مجموع انرژیهای اولیه چنین ذراتی معلوم است، کسر انرژی گسیل شده را که در بافت هدف جذب می شود می توان به صورت زیر محاسبه کرد

$$(۴۶.۶) \quad \text{انرژی جذب شده در هدف} \\ \text{کسر جذب شده} = \varphi = \frac{\text{انرژی گسیل شده از چشمه}}{\text{انرژی جذب شده در هدف}}$$

چون معمولاً مسافت آزاد میانگین فوتونها نسبت به ابعاد اندامی که ایزوتوپ گسیلنده فوتون در آن توزیع می شود بزرگتر است، این کسر جذب شده برای فوتونها از واحد کوچکتر خواهد بود. برای تابش غیر نفوذی، کسر جذب شده، بسته به اینکه اندامهای هدف و چشمه یکی باشند یا دو اندام مختلف، اغلب ۱ یا صفر است. کمیته MIRD طی چندین پیوست در مجله *Journal of Nuclear Medicine*، کسرهای جذب شده ناشی از فوتونهای با انرژی مختلف از چشمه های نقطه ای همسانگرد و چشمه هایی که به طور یکنواخت در بافت و در آب توزیع شده اند را برای اشکال کره، استوانه، و بیضوی محاسبه و منتشر کرده است. نمونه ای از مقادیر را در جدولهای ۵.۶، ۶.۶، و ۷.۶ مشاهده می کنید.

جدول ۵.۶ کسره‌های جذب شده برای توزیع یکنواخت فعالیت در کره‌های کوچک و بیضویهای ضخیم^۱.

جرم (کیلوگرم)	ϕ بر حسب MeV										
	0.020	0.030	0.040	0.060	0.080	0.100	0.160	0.364	0.662	1.460	2.750
0.3	0.684	0.357	0.191	0.109	0.086	0.085	0.087	0.099	0.096	0.092	0.077
0.4	0.712	0.388	0.212	0.121	0.096	0.093	0.097	0.108	0.108	0.099	0.083
0.5	0.731	0.412	0.229	0.131	0.104	0.099	0.104	0.116	0.117	0.104	0.089
0.6	0.745	0.431	0.244	0.140	0.111	0.105	0.111	0.122	0.124	0.109	0.093
1.0	0.780	0.486	0.289	0.167	0.135	0.125	0.130	0.142	0.144	0.125	0.106
2.0	0.818	0.559	0.360	0.212	0.173	0.160	0.162	0.174	0.173	0.153	0.127
3.0	0.840	0.600	0.405	0.245	0.201	0.188	0.186	0.197	0.195	0.174	0.143
4.0	0.856	0.629	0.438	0.271	0.222	0.209	0.205	0.216	0.213	0.190	0.156
5.0	0.868	0.652	0.464	0.294	0.241	0.227	0.222	0.231	0.228	0.204	0.167
6.0	0.876	0.671	0.485	0.312	0.258	0.241	0.236	0.245	0.240	0.216	0.177

۱. محورهای اصلی کره‌های کوچک و بیضویهای ضخیم به نسبت ۱/۱/۱ و ۱/۳۳۳/۱/۵۶۶۷/۱ هستند.

جدول ۶.۶ کسره‌های جذب شده چشمه‌های نقطه‌ای مرکزی در استوانه‌های قائم با مقطع دایره^۱.

جرم (کیلوگرم)	ϕ بر حسب MeV					
	0.040	0.080	0.160	0.364	0.662	1.460
2	0.528	0.258	0.224	0.240	0.229	0.200
4	0.645	0.336	0.290	0.295	0.288	0.253
6	0.712	0.391	0.335	0.333	0.326	0.286
8	0.757	0.435	0.370	0.363	0.354	0.311
10	0.789	0.471	0.399	0.387	0.376	0.332
20	0.878	0.593	0.501	0.472	0.453	0.401
30	0.917	0.668	0.568	0.528	0.504	0.446
40	0.940	0.721	0.618	0.571	0.543	0.480
50	0.954	0.761	0.658	0.605	0.575	0.509
60	0.964	0.792	0.691	0.633	0.602	0.533
70	0.971	0.818	0.719	0.658	0.625	0.553
80	0.977	0.838	0.743	0.679	0.646	0.572
90	0.981	0.856	0.763	0.698	0.664	0.588
100	0.984	0.871	0.781	0.714	0.680	0.603
120	0.989	0.894	0.811	0.742	0.708	0.629
140	0.992	0.911	0.834	0.765	0.730	0.651
160	0.994	0.924	0.852	0.784	0.749	0.669
180	0.994	0.933	0.866	0.800	0.765	0.685
200	0.994	0.939	0.877	0.813	0.777	0.698

۱. نسبت محورهای اصلی استوانه‌ها به صورت ۱/۱/۵۷۵ است.

جدول ۷.۶ کسرهای جذب شده چشمه های نقطه ای مرکزی در کره ها.

	ϕ بر حسب MeV									
جرم (کیلوگرم)	0.020	0.030	0.040	0.060	0.100	0.140	0.160	0.279	0.662	2.750
2	0.989	0.794	0.537	0.322	0.243	0.233	0.234	0.241	0.235	0.168
4	0.996	0.878	0.658	0.421	0.317	0.301	0.297	0.302	0.293	0.209
6	0.999	0.916	0.727	0.488	0.370	0.348	0.342	0.344	0.330	0.238
8	0.999	0.938	0.772	0.540	0.413	0.386	0.379	0.377	0.359	0.259
10	0.999	0.952	0.806	0.581	0.448	0.418	0.409	0.405	0.382	0.277
20	0.999	0.982	0.894	0.709	0.569	0.529	0.517	0.500	0.461	0.339
30	0.999	0.991	0.932	0.780	0.644	0.600	0.587	0.562	0.514	0.380
40	0.999	0.995	0.954	0.826	0.698	0.652	0.639	0.608	0.554	0.411
50	0.999	0.996	0.966	0.859	0.738	0.692	0.679	0.644	0.586	0.436
60	0.999	0.997	0.974	0.882	0.770	0.725	0.712	0.675	0.613	0.457
70	0.999	0.998	0.980	0.900	0.796	0.752	0.739	0.700	0.637	0.476
80	0.999	0.998	0.983	0.915	0.818	0.775	0.762	0.722	0.657	0.492
90	0.999	0.999	0.986	0.926	0.836	0.794	0.781	0.741	0.675	0.507
100	0.999	0.999	0.988	0.935	0.851	0.811	0.799	0.758	0.691	0.520
120	0.999	0.999	0.991	0.948	0.876	0.839	0.827	0.786	0.719	0.544
140	0.999	0.999	0.993	0.958	0.895	0.860	0.849	0.809	0.742	0.564
160	0.999	0.999	0.995	0.965	0.910	0.878	0.867	0.829	0.761	0.582
180	0.999	0.999	0.996	0.971	0.923	0.892	0.882	0.845	0.778	0.598
200	0.999	0.999	0.998	0.976	0.933	0.904	0.894	0.858	0.792	0.612

مثال ۸.۶

به منظور آشنایی با طرز استفاده از کسرهای دز جذب شده، آهنگ دز کره ای به وزن ۶۰۰ کیلوگرم را که ازماده ای هم ارز ماده بافت ساخته شده و ۱ MBq از ^{131}I در آن به طور یکنواخت توزیع شده است، حساب کنید.

حل: در این مثال، انرژی از ذرات بتا و پرتوهای گاما جذب خواهد شد. چون برد بتا در بافت بسیار اندک است، می توانیم فرض کنیم که تمام انرژی پرتوهای بتا جذب می شود. اما فقط کسری از انرژی پرتوهای گاما جذب خواهد شد. از این رو، کل انرژی جذب شده ^{131}I را به سادگی می توان از جمع انرژی پرتو بتای گسیل شده به اضافه کسری از انرژی گامای گسیل شده که در کره جذب می شود به دست آورد. این حاصل جمع را انرژی مؤثر به ازای هر تبدیل می گویند. کسر جذب شده پرتوهای گاما به ابعاد محیط جذب کننده و انرژی فوتون بستگی دارد.

اکنون با استفاده از کسرهای دز جذب شده که در جدول ۵.۶ آمده است و درونیایی آن برای انرژیهای پرتوگامایی که میان مقادیر ثبت شده در جدول قرار دارند، می توانیم انرژی گامای جذب شده به ازای هر تبدیل ^{131}I را به صورت زیر محاسبه کنیم

$$E_e(\gamma) = \sum_i E_{\gamma i} \times n_i \times \varphi_i \quad (۴۷.۶)$$

که در آن $E_e(\gamma)$ انرژی جذب شده پرتو گاما بر حسب MeV به ازای هر تبدیل، $E_{\gamma i}$ انرژی i امین فوتون گاما بر حسب MeV، n_i تعداد فوتونهای i امین انرژی در هر تبدیل، و φ_i کسر جذب شده انرژی i امین فوتون است.

انرژی جذب شده MeV/t	=	کسر جذب شده φ	تعداد فوتونها در هر تبدیل n_i	انرژی فوتون به $E_{\gamma i}$, MeV
0.0014		0.123	0.016	0.723
0.0055		0.124	0.069	0.637
0.0002		0.123	0.003	0.503
0.0001		0.120	0.002	0.326
0.0000		0.112	0.002	0.177
0.0380		0.122	0.853	0.365
0.0017		0.118	0.051	0.284
0.0005		0.111	0.051	0.080
0.0001		0.111	0.006	0.164

$$E_e(\gamma) = 0.0474 \text{ MeV/t}$$

میانگین انرژی پرتو بتا در هر تبدیل ^{131}I را که متناظر با انرژی مؤثر بتاهاست، می توان با قراردادن انرژیهای میانگین پرتو بتای ^{131}I از داده های خروجی جدول ۱۱.۶ در معادله (۴۸.۶) محاسبه کرد

$$\begin{aligned} E_e(\beta) &= \sum \bar{E}_{\beta i} \times n_{\beta i} \quad (۴۸.۶) \\ &= (0.00701 \times 0.0016) + (0.00955 \times 0.0069) + (0.01428 \times 0.0005) \\ &\quad + (0.01917 \times 0.0004) + (0.0285 \times 0.0006) = 0.0183 \text{ MeV/t} \end{aligned}$$

انرژی مؤثر به ازای هر تبدیل، E_e ، یا مقدار انرژی جذب شده به وسیله کره هم ارز kg ۰.۰۶ بافت به ازای هر تبدیل ^{131}I برابر است با

$$\begin{aligned} E_e &= E_e(\gamma) + E_e(\beta) \quad (۴۹.۶) \\ &= 0.047 + 0.0183 = 0.0653 \text{ MeV/t} \end{aligned}$$

آهنک دز m کیلوگرم جرم که E_e MeV انرژی به ازای هر تبدیل از Bq q فعالیت در داخل این جرم جذب می کند، برابر است با

$$\dot{D} = \frac{q \text{ Bq} \times 1 \text{ tps/Bq} \times E_e \text{ MeV/t} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \times 8.64 \times 10^4 \text{ s/d}}{m \text{ kg} \times 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \text{Gy}} \quad (50.6)$$

حال اگر مقادیر $q = 1 \times 10^6 \text{ Bq}$ ، $E_e = 0.230 \text{ MeV/t}$ ، و $m = 0.6 \text{ kg}$ را در معادله (50.6) قرار دهیم، آهنگ دز به دست می آید

$$\dot{D} = 5.30 \times 10^{-2} \text{ Gy/d} \quad (0.530 \text{ rad/d})$$

اکنون به محاسبه دز داخلی با روش MIRD باز می گردیم. دو اندام در بدن را در نظر می گیریم که یکی از آنها حاوی ایزوتوپ پرتوزای با توزیع یکنواخت است که چشمه نامیده می شود (S)، و دیگری هدف یا T است که تحت تابش دهی چشمه قرار می گیرد. S و T می توانند دو اندام همانند یا مختلف باشند که با یکی از روابط هندسی ممکن (شکل 10.6) به هم مربوط می شوند.

آهنگ گسیل انرژی توسط نوکلید پرتوزا در چشمه در هر لحظه از زمان که توسط i امین ذره حمل می شود، با رابطه زیر داده می شود

$$\chi_{ei} = A_i \text{ Bq} \times 1 \text{ tps/Bq} \times \bar{E}_i \text{ MeV/part} \times n_i \text{ part/t} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \quad (51.6)$$

$$= 1.6 \times 10^{-13} A_i \times \bar{E}_i \times n_i \text{ J/s} \quad (52.6)$$

که در آن χ_{ei} آهنگ گسیل انرژی بر حسب J/s، A_i فعالیت چشمه بر حسب Bq، $\bar{E}_i$ انرژی i امین ذره (بر حسب MeV)، و n_i تعداد ذرات از نوع i در هر واپاشی است. هر گاه کسری از این انرژی گسیل شده را که در هدف جذب می شود φ_i بنامیم، آنگاه مقدار انرژی جذب شده در هدف در اثر گسیل چشمه با رابطه زیر داده می شود

$$\chi_{ai} = \chi_{ei} \times \varphi_i = 1.6 \times 10^{-13} \times A_i \times \bar{E}_i \times n_i \times \varphi_i \text{ J/s} \quad (53.6)$$

چون هر گری با جذب 1 ژول بر کیلوگرم متناظر است، آهنگ دز ناشی از ذره i ام در هدفی به وزن m کیلوگرم را می توان به صورت زیر محاسبه کرد

$$\dot{D}_i = \frac{1.6 \times 10^{-13} \times A_i \times \bar{E}_i \times n_i \times \varphi_i \text{ J/s}}{1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \text{Gy} \times m \text{ kg}} \quad (54.6)$$

با در نظر گرفتن

داده‌های ورودی

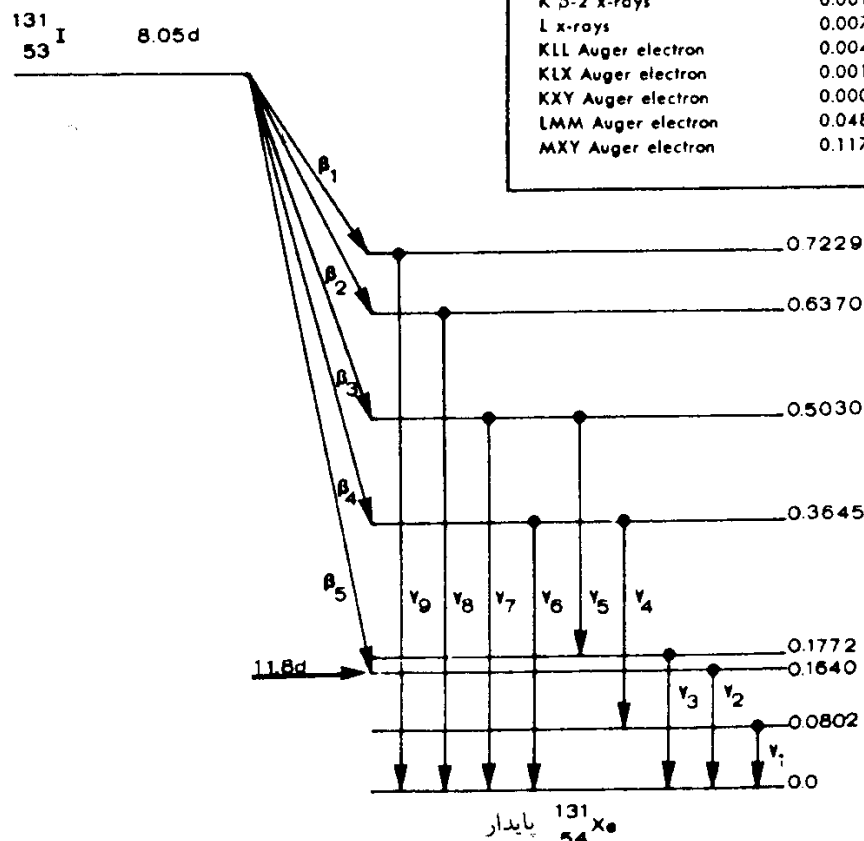
تابش	انرژی گذار (MeV)	انرژی سایر پارامترهای هسته‌ای
Beta-1	1.6	0.25 Allowed
Beta-2	6.9	0.33 Allowed
Beta-3	0.5	0.47 Allowed
Beta-4	90.4	0.606 Allowed
Beta-5	0.6	0.81 First forbidden unique
Gamma-1	5.06	0.0802 M1, $\alpha_K = 1.7$, $\alpha_L = 0.17$
Gamma-2	0.6	0.1640 M4, $\alpha_K = 29$, K/L = 2.3
Gamma-3	0.18	0.1772 E2, $\alpha_K = 0.189$ (T), K/L = 4.0
Gamma-4	5.06	0.2843 E2, $\alpha_K = 0.052$, K/(L + M) = 4.0
Gamma-5	0.18	0.3258 M1, $\alpha_K = 0.0285$ (T), K/L = 6.0
Gamma-6	85.3	0.3645 E2 + 2% M1, $\alpha_K = 0.02$, K/L = 6.0
Gamma-7	0.32	0.5030 E2, $\alpha_K = 0.00749$ (T), $\alpha_L = 0.0011$ (T)
Gamma-8	6.9	0.6370 E2, $\alpha_K = 0.0039$, $\alpha_L = 0.000563$ (T)
Gamma-9	1.6	0.7229 M1, $\alpha_K = 0.004$, $\alpha_L = 0.000515$ (T)

داده‌های خروجی

تابش (i)	تعداد میانگین در هر فروپاشی (n _i)	انرژی میانگین (E _i)	D _i (g-rad) (μCi·h)
Beta-1	0.016	0.0701	0.0024
Beta-2	0.069	0.0955	0.0140
Beta-3	0.005	0.1428	0.0015
Beta-4	0.904	0.1917	0.3691
Beta-5	0.006	0.2856	0.0037
Gamma-1	0.0173	0.0802	0.0030
K int. con. electron, gamma-1	0.0294	0.0456	0.0029
L int. con. electron, gamma-1	0.0029	0.0751	0.0005
M int. con. electron, gamma-1	0.0010	0.0792	0.0002
Gamma-2	0.0001	0.1640	0.0000
K int. con. electron, gamma-2	0.0037	0.1294	0.0010
L int. con. electron, gamma-2	0.0016	0.1589	0.0005
M int. con. electron, gamma-2	0.0005	0.1630	0.0002
Gamma-3	0.0014	0.1772	0.0005
K int. con. electron, gamma-3	0.0003	0.1427	0.0001
Gamma-4	0.0475	0.2843	0.0288
K int. con. electron, gamma-4	0.0025	0.2497	0.0013
L int. con. electron, gamma-4	0.0005	0.2793	0.0003
M int. con. electron, gamma-4	0.0002	0.2834	0.0001
Gamma-5	0.0017	0.3258	0.0012
Gamma-6	0.833	0.3645	0.6465
K int. con. electron, gamma-6	0.0167	0.3299	0.0117
L int. con. electron, gamma-6	0.0028	0.3594	0.0021
M int. con. electron, gamma-6	0.0009	0.3635	0.0006
Gamma-7	0.0032	0.5030	0.0034
Gamma-8	0.0687	0.6370	0.0932
K int. con. electron, gamma-8	0.0003	0.6024	0.0004
Gamma-9	0.0159	0.7229	0.0245
K α-1 x-rays	0.0252	0.0298	0.0016
K α-2 x-rays	0.0130	0.0295	0.0008
K β-1 x-rays	0.0070	0.0336	0.0005
K β-2 x-rays	0.0015	0.0346	0.0001
L x-rays	0.0078	0.0041	0.0001
KLL Auger electron	0.0042	0.0245	0.0002
KLX Auger electron	0.0018	0.0296	0.0001
KXY Auger electron	0.0003	0.0327	0.0000
LMM Auger electron	0.0486	0.0032	0.0003
MXY Auger electron	0.117	0.0009	0.0002

ید ۱۳۱

واباشی بتای منفی



شکل ۱۱.۶ طرح تبدیل و داده‌های ورودی و خروجی مربوط به دزسنجی ^{131}I .

$$\Delta_i = 1.6 \times 10^{-13} \times n_i \times \bar{E}_i \frac{\text{kg} \cdot \text{Gy}}{\text{Bq} \cdot \text{s}} \quad (55.6)$$

معادله (۵۴.۶) به صورت زیر درمی آید

$$\dot{D}_i = \frac{A_s}{m} \times \varphi_i \times \Delta_i \text{ Gy/s} \quad (56.6)$$

که در آن Δ_i آهنگ دز در جرم همگن بی نهایت بزرگ از بافتی است که حاوی توزیع یکنواختی از ایزوتوپ پرتوزا با تراکم 1 Bq/kg است. مقادیر عددی Δ_i به ازای هر یک از تابشهای تولیدشده به وسیله ایزوتوپهای پرتوزا در جرمهای بی نهایت بزرگ بافت، در بخش داده های خروجی طرحهای واپاشی و پارامترهای هسته ای آمده است. این بخش را کمیته دز تابش داخلی درمانی (MIRD) انجمن پزشکی هسته ای به منظور برآورد دز تابش انتشار داده است. بنابراین با در نظر گرفتن کلیه انواع ذرات گسیل شده از چشمه می توان آهنگ دز اندام مورد نظر یا هدف را به شرح زیر به دست آورد

$$\dot{D} = \frac{A_s}{m} \sum \varphi_i \Delta_i \quad (57.6)$$

چون $\dot{D}$ تابع A_s و A_s نیز به نوبه خود تابع زمان است، لذا $\dot{D}$ نیز تابع زمان خواهد بود. با گرفتن انتگرال از آهنگ دز نسبت به زمان می توان دز انباشته یا دز کل حاصل از واپاشی کامل ایزوتوپ پرتوزای رسوب یافته را به دست آورد

$$D = \int_0^\infty \dot{D}(t) dt = \frac{\sum \varphi_i \Delta_i}{m} \int_0^\infty A_s(t) dt \quad (58.6)$$

اگر انتگرال زمانی پرتوزایی رسوب یافته را فعالیت انباشته، $\tilde{A}$ ، بنامیم داریم

$$\tilde{A} = \int_0^\infty A_s(t) dt \quad (59.6)$$

در این صورت دز کل مربوط به اندام مورد نظر یا «هدف» به صورت زیر به دست می آید

$$D = \frac{\tilde{A}}{m} \sum \varphi_i \Delta_i \quad (60.6)$$

مثال ۹.۶

به شخصی به وزن ۷۰ کیلوگرم و قد ۱۶۰ سانتی متر مقدار 1 MBq از $^{24}\text{NaCl}$ تزریق شده است. آهنگ دز اولیه و دز کل این شخص را حساب کنید.
حل: فرض می کنیم که $^{24}\text{NaCl}$ در مدت زمان کوتاهی به طور یکنواخت توزیع

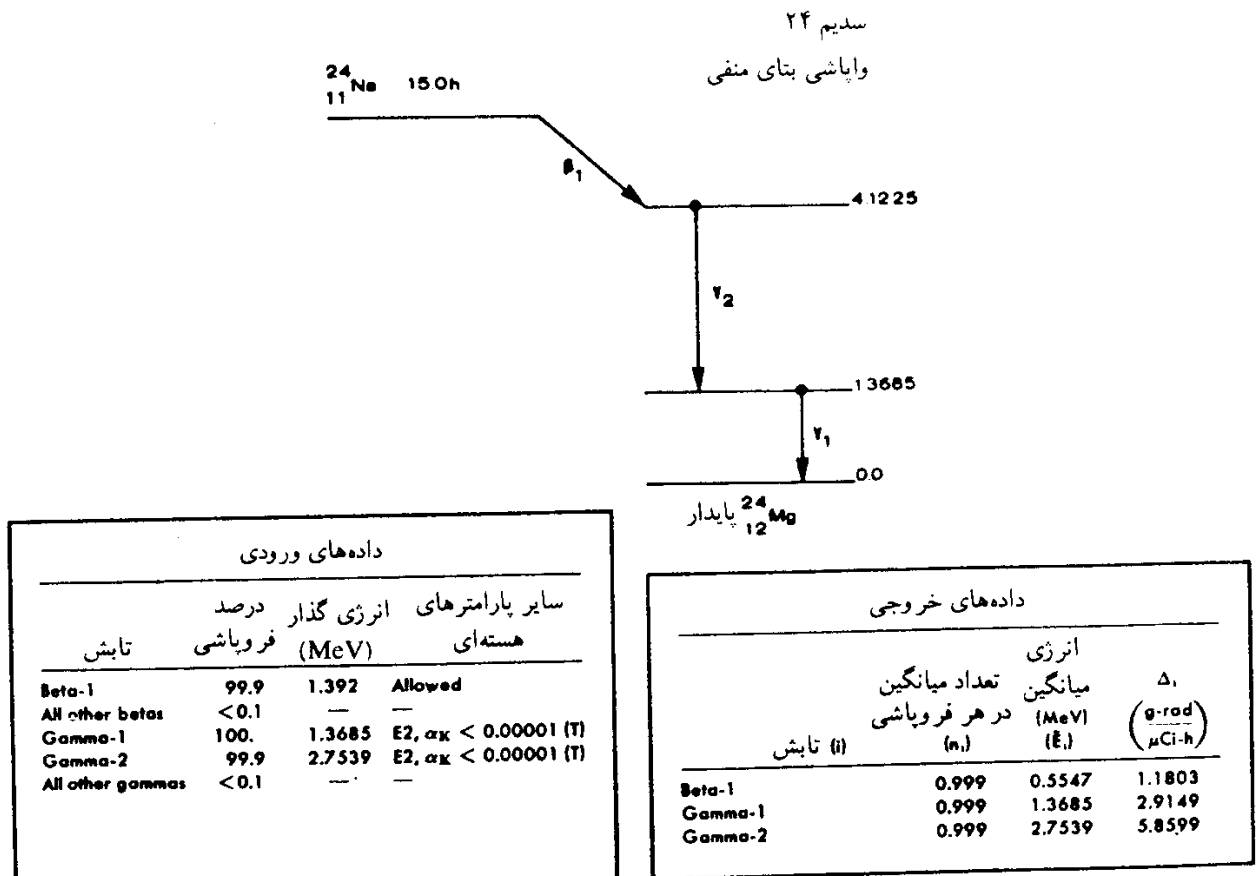
می‌شود، و نیمه‌عمر زیست‌شناختی آن ۱۱ روز (یا ۲۶۴ ساعت) است. اطلاعات مربوط به واپاشی ^{24}Na در جداول و نمودار مندرج در شکل ۱۲.۶ نشان می‌دهد که در بیش از ۹۹.۹٪ از موارد، واپاشی ^{24}Na به صورت گسیل یک ذره بتا با بیشینه انرژی 1.392 MeV و گسیل یک پرتو گاما با انرژی 2.7539 MeV است. در فهرست داده‌های خروجی، دزکل در یک محیط نامتناهی به ازای واحد فعالیت انباشته شده بر حسب یکاهای $\text{g}\cdot\text{rad}/\mu\text{Ci}\cdot\text{h}$ برای هر تابش تنظیم شده است. برای تبدیل دستگاه قدیمی یکاهای SI، یعنی تبدیل $\text{g}\cdot\text{rad}/\mu\text{Ci}\cdot\text{h}$ به $\text{kg}\cdot\text{Gy}/\text{Bq}\cdot\text{s}$ به صورت زیر عمل می‌کنیم

$$\frac{\text{kg}\cdot\text{Gy}}{\text{Bq}\cdot\text{s}} = \frac{\text{g}\cdot\text{rad}}{\mu\text{Ci}\cdot\text{h}} \times \frac{10^{-3}\text{kg/g} \times 10^{-2}\text{Gy/rad}}{3.7 \times 10^4 \text{Bq}/\mu\text{Ci} \times 3600 \times 10^3 \text{s/h}}$$

$$\frac{\text{kg}\cdot\text{Gy}}{\text{Bq}\cdot\text{s}} = \frac{\text{g}\cdot\text{rad}}{\mu\text{Ci}\cdot\text{h}} \times 7.51 \times 10^{-14} \quad (۶۱.۶)$$

چون هر 10^{15} فمتوگری برابر با ۱ گری است، ضریب تبدیل در معادله (۶۱.۶) به صورت زیر درمی‌آید

$$\frac{\text{kg}\cdot\text{fGy}}{\text{Bq}\cdot\text{s}} = \frac{\text{g}\cdot\text{rad}}{\mu\text{Ci}\cdot\text{h}} \times 7.51 \quad (۶۲.۶)$$



شکل ۱۲.۶ طرح تبدیل و داده‌های ورودی و خروجی دزسنجی ^{24}Na .

از طرف دیگر چون $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ و هر بکرل (Bq) معادل ۱ تبدیل در هر ثانیه است، ابعاد معادله (۶۲.۶) چنین خواهد شد

$$\frac{\text{g} \cdot \text{rad}}{\mu\text{Ci} \cdot \text{h}} \times ۷۵۱ = f \text{ J/تبدیل} \quad (۶۳.۶)$$

که مقدار انرژی جذب شده به ازای هر تبدیل هسته‌ای را به دست می‌دهد. اکنون به مسئله اصلی باز می‌گردیم. چون ^{24}Na به طور نمایی و با آهنگ مؤثر λ_E از بین می‌رود، مقدار فعالیت در اندام چشمه با رابطه زیر داده می‌شود

$$A_s(t) = A_s(0) e^{-\lambda_E t} \quad (۶۴.۶)$$

که در آن $A_s(0)$ فعالیت اولیه چشمه را نشان می‌دهد

$$\tilde{A} = \int_0^\infty A_s(t) dt = A_s(0) \int_0^\infty e^{-\lambda_E t} dt = \frac{A_s(0)}{\lambda_E} \quad (۶۵.۶)$$

چون

$$\lambda_E = \frac{0.693}{T_E} = \frac{0.693}{(T_R \times T_B) / (T_R + T_B)}$$

و نیمه عمر زیست شناختی T_B در نشریه شماره ۲ کمیسیون بین‌المللی حفاظت پرتو شناختی برابر ۲۶۴ ساعت و نیمه عمر پرتو زایی T_R برابر ۱۵ ساعت تعیین شده است، داریم

$$\therefore \tilde{A} = \frac{10^6 \text{ Bq}}{1.36 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}} = 7.35 \times 10^{10} \text{ Bq} \cdot \text{s}$$

اکنون باید $\sum \varphi_i \Delta_i$ را محاسبه کنیم.

اطلاعات مربوط به کسرهای جذب شده φ_i در تعدادی از اندامها و بافتهای هدف، برای فوتونهایی که در گستره انرژی از ۰.۱ MeV تا ۴ MeV قرار دارند و در تعدادی از اندامها و بافتهای چشمه‌ای مختلف تولید می‌شوند، منتشر شده است. جدول ۸.۶ کسرهای جذب شده ناشی از یک گسیلنده فوتون را که مانند ^{24}Na به طور یکنواخت در سرتاسر بدن توزیع شده است به دست می‌دهد. مقادیر φ_i مربوط به گاماها ۱.۳۶۹ MeV و ۲.۷۵۴ MeV را از طریق برونمایی مقادیر جدول ۸.۶ به دست می‌آوریم. این مقادیر همراه با Δ_i که از داده‌های خروجی شکل ۱۲.۶ به دست می‌آید و با استفاده از معادله

جدول ۸۰۶ کسرهای جذب شده (و ضرایب تغییرات)، برای گسیلنده گاما بسا توزیع یکنواخت در بدن.

انرژی فوتون بر حسب MeV

بافت هدف	0.010		0.015		0.020		0.030		0.050		0.100		بافت هدف
	ϕ	$\frac{100\phi}{\phi}$	ϕ	$\frac{100\phi}{\phi}$	ϕ	$\frac{100\phi}{\phi}$	ϕ	$\frac{100\phi}{\phi}$	ϕ	$\frac{100\phi}{\phi}$	ϕ	$\frac{100\phi}{\phi}$	
غده فوق کلیوی	0.270E-03	35.	0.228E-03	34.	0.175E-03	37.	0.209E-03	28.	0.131E-03	23.	0.101E-03	26.	غده فوق کلیوی
مغز	0.757E-02	6.6	0.762E-02	6.5	0.683E-02	6.6	0.625E-02	6.1	0.445E-02	5.6	0.352E-02	5.2	مغز
دستگاه گوارش (معدا)	0.570E-02	7.6	0.507E-02	8.0	0.573E-02	7.1	0.560E-02	6.4	0.391E-02	5.8	0.273E-02	5.9	دستگاه گوارش (معدا)
دستگاه گوارش (روده کوچک)	0.254E-01	3.6	0.236E-01	3.7	0.234E-01	3.6	0.209E-01	3.4	0.163E-01	3.1	0.120E-01	3.2	دستگاه گوارش (روده کوچک)
دستگاه گوارش (استون نوزاد)	0.541E-02	7.8	0.561E-02	7.5	0.647E-02	6.6	0.533E-02	5.9	0.374E-02	5.4	0.262E-02	5.7	دستگاه گوارش (استون نوزاد)
دستگاه گوارش (استون بزرگ)	0.350E-02	9.7	0.441E-02	8.5	0.457E-02	7.7	0.285E-02	7.9	0.256E-02	6.2	0.187E-02	6.3	دستگاه گوارش (استون بزرگ)
قلب	0.756E-02	6.6	0.804E-02	6.3	0.769E-02	6.2	0.635E-02	6.0	0.469E-02	5.4	0.420E-02	5.0	قلب
کلیه	0.410E-02	9.0	0.446E-02	8.5	0.412E-02	8.3	0.338E-02	7.4	0.233E-02	6.4	0.183E-02	6.6	کلیه
کبد	0.260E-01	3.5	0.244E-01	3.6	0.249E-01	3.5	0.221E-01	3.3	0.154E-01	3.2	0.120E-01	3.2	کبد
ریه (انسان)	0.127E-01	5.1	0.142E-01	4.7	0.138E-01	4.4	0.122E-01	3.8	0.808E-02	3.4	0.551E-02	3.6	ریه (انسان)
مغز استخوان	0.560E-01	1.4	0.594E-01	1.4	0.655E-01	1.3	0.740E-01	1.1	0.613E-01	1.1	0.329E-01	1.3	مغز استخوان
لوزالمعده	0.134E-02	16.	0.103E-02	18.	0.828E-03	17.	0.780E-03	14.	0.567E-03	12.	0.449E-03	12.	لوزالمعده
استون (انسان)	0.168E-01	4.4	0.206E-01	3.9	0.247E-01	3.4	0.263E-01	2.9	0.176E-01	2.9	0.764E-02	3.3	استون (انسان)
استون (گاو)	0.147E-01	4.7	0.160E-01	4.5	0.163E-01	4.3	0.224E-01	3.4	0.199E-01	3.0	0.103E-01	3.3	استون (گاو)
استون (سگ)	0.186E-01	4.2	0.190E-01	4.1	0.234E-01	3.7	0.253E-01	3.3	0.229E-01	3.0	0.144E-01	3.2	استون (سگ)
استون (میمه)	0.103E-01	5.6	0.115E-01	5.3	0.123E-01	5.	0.128E-01	4.6	0.722E-02	5.1	0.313E-02	6.0	استون (میمه)
استون (گاو)	0.144	1.4	0.153	1.3	0.167	1.2	0.188	1.1	0.153	1.1	0.810E-01	1.3	استون (گاو)
پستان	0.258E-01	3.5	0.227E-01	3.5	0.169E-01	3.7	0.116E-01	3.3	0.758E-02	2.9	0.585E-02	3.1	پستان
طحال	0.260E-02	11.	0.237E-02	12.	0.242E-02	11.	0.223E-02	9.1	0.149E-02	8.5	0.111E-02	8.7	طحال
غده درونی (انسان)	0.265E-03	35.	0.263E-03	34.	0.602E-04	48.	0.111E-03	36.	0.114E-03	27.	0.873E-04	29.	غده درونی (انسان)
دم	0.999E-03	18.	0.109E-02	17.	0.122E-02	15.	0.924E-03	13.	0.712E-03	12.	0.611E-03	11.	دم
تنه	0.604	0.47	0.589	0.48	0.566	0.50	0.500	0.55	0.358	0.67	0.245	0.79	تنه
پایه	0.309	0.86	0.299	0.88	0.285	0.90	0.242	0.97	0.171	1.1	0.113	1.3	پایه
سر	0.488E-01	2.5	0.474E-01	2.5	0.440E-01	2.6	0.342E-01	2.7	0.200E-01	3.1	0.127E-01	3.1	سر
تمام بدن	0.959	0.11	0.933	0.15	0.892	0.19	0.774	0.27	0.548	0.43	0.370	0.56	تمام بدن

جدول ۸.۶ (ادامه)

بافت هدف	0.200		0.500		1.000		1.500		2.000		4.000	
	ϕ	$\frac{100\sigma_p}{\phi}$	ϕ	$\frac{100\sigma_p}{\phi}$	ϕ	$\frac{100\sigma_p}{\phi}$	ϕ	$\frac{100\sigma_p}{\phi}$	ϕ	$\frac{100\sigma_p}{\phi}$	ϕ	$\frac{100\sigma_p}{\phi}$
غده فوق کلیوی	0.352E-04	36.	0.138E-03	35.	0.100E-03	42.	0.107E-03	43.	0.114E-03	43.	0.147E-02	12.
مثانه	0.327E-02	5.0	0.341E-02	6.6	0.274E-02	8.3	0.291E-02	8.4	0.231E-02	9.6	0.119E-02	14.
دستگاه گوارش (معد)	0.218E-02	7.0	0.258E-02	7.7	0.181E-02	9.8	0.199E-02	10.	0.212E-02	10.	0.409E-02	7.3
دستگاه گوارش (روده کوچک)	0.106E-01	3.4	0.114E-01	3.8	0.109E-01	4.2	0.915E-02	4.8	0.820E-02	5.2	0.160E-02	12.
دستگاه گوارش (انست نورتانی روده بزرگ)	0.256E-02	6.3	0.306E-02	7.0	0.228E-02	8.9	0.209E-02	9.4	0.197E-02	10.		
دستگاه گوارش (انست نورتانی روده بزرگ)	0.151E-02	7.6	0.184E-02	8.8	0.178E-02	9.7	0.181E-02	11.	0.157E-02	12.	0.673E-03	18.
قلب	0.337E-02	5.8	0.372E-02	6.6	0.301E-02	8.1	0.345E-02	7.8	0.312E-02	8.3	0.145E-02	13.
کلیهها	0.171E-02	7.4	0.142E-02	9.7	0.161E-02	10.	0.152E-02	11.	0.154E-02	12.	0.904E-03	16.
کبد	0.111E-01	3.4	0.101E-01	4.1	0.896E-02	4.7	0.912E-02	4.9	0.847E-02	5.1	0.560E-02	6.4
ریه (انستها)	0.507E-02	4.3	0.496E-02	5.2	0.466E-02	6.1	0.466E-02	6.5	0.427E-02	6.9	0.568E-02	6.4
مغز استخوان	0.221E-01	1.5	0.194E-01	1.0	0.182E-01	2.0	0.164E-01	2.2	0.156E-01	2.3	0.969E-02	3.0
لوزالمعده	0.444E-03	14.	0.382E-03	17.	0.534E-03	19.	0.348E-03	22.	0.358E-03	24.	0.142E-03	39.
اسکلت (انستها)	0.505E-02	4.1	0.435E-02	5.6	0.421E-02	6.3	0.405E-02	7.0	0.350E-02	7.7	0.338E-02	8.0
اسکلت (لگن خاصرو)	0.668E-02	3.9	0.569E-02	5.0	0.562E-02	5.7	0.511E-02	6.3	0.422E-02	7.0	0.256E-02	9.3
اسکلت (استون فقرات)	0.910E-02	3.6	0.763E-02	4.5	0.751E-02	5.1	0.610E-02	5.7	0.606E-02	5.9	0.341E-02	8.1
اسکلت (مجمه)	0.277E-02	6.3	0.304E-02	7.2	0.280E-02	8.0	0.254E-02	9.0	0.292E-02	8.8	0.224E-02	10.
اسکلت (اسکلت کامل)	0.550E-01	1.4	0.488E-01	1.7	0.456E-01	2.0	0.413E-01	2.2	0.396E-01	2.3	0.252E-01	3.0
پوست	0.677E-02	3.5	0.757E-02	4.2	0.745E-02	4.8	0.759E-02	5.0	0.664E-02	5.5	0.123E-01	4.3
طحال	0.798E-03	11.	0.116E-02	11.	0.914E-03	14.	0.903E-03	16.	0.740E-03	17.	0.368E-03	24.
غده درونی (تیروتید)	0.418E-04	42.							0.810E-04	46.		
رسم	0.408E-03	15.	0.473E-03	16.	0.517E-03	18.	0.323E-03	23.	0.364E-03	25.	0.238E-03	33.
تنه	0.223	0.81	0.225	0.84	0.210	0.92	0.198	0.99	0.186	1.0	0.156	1.2
پاها	0.102	1.3	0.101	1.4	0.965E-01	1.5	0.917E-01	1.6	0.846E-01	1.6	0.710E-01	1.8
سر	0.134E-01	3.2	0.147E-01	3.5	0.145E-01	3.8	0.130E-01	4.1	0.139E-01	4.1	0.127E-01	4.4
تمام بدن	0.338	0.57	0.340	0.60	0.321	0.67	0.302	0.73	0.284	0.77	0.240	0.90

ارقام بعد از نماد E توانهای ده را نشان می دهند که باید در هر عدد ضرب شود.

جای خالی در جدول نشان می دهد که ضریب تغییر بزرگتر از ۵۰٪ است.

تمام بدن = سر + تن + پاها

(۶۲.۶) به $\text{kg} \cdot \text{fGy}/\text{Bq}$ تبدیل می‌شود، در جدول زیر آمده است.

نوع تابش	E_i	φ_i	$\Delta_i \frac{\text{kg} \cdot \text{fGy}}{\text{Bq} \cdot \text{s}}$	$\varphi_i \Delta_i$
بتا ۱	۰.۵۵۵	۱.۰۰۰	۸۸.۶۴	۸۸.۶۴
گاما ۱	۱.۳۶۹	۰.۳۱	۲۱۸.۹۱	۶۷.۸۶
گاما ۲	۲.۷۵۴	۰.۲۶۵	۴۴۰.۰۸	۱۱۶.۶۲
			$\frac{\text{kg} \cdot \text{fGy}}{\text{Bq} \cdot \text{s}}$	۲۷۳.۱۲

با قراردادن مقادیر $\tilde{A} = 7735 \times 10^{10} \text{ Bq} \cdot \text{s}$ ، $\sum \varphi_i \Delta_i = 273.12 \text{ kg} \cdot \text{fGy}/\text{Bq} \cdot \text{s}$ و $m = 70 \text{ kg}$ در معادله (۶۰.۶) خواهیم داشت

$$D = \frac{7735 \times 10^{10} \text{ Bq} \cdot \text{s}}{70 \text{ kg}} \times 273.12 \frac{\text{kg} \cdot \text{fGy}}{\text{Bq} \cdot \text{s}}$$

$$= 2868 \times 10^{11} \text{ fGy} (29 \text{ mrad})$$

آهنک دز اولیه را می‌توان با قراردادن 10^6 Bq به جای A ، در معادله (۵۷.۶) به دست آورد

$$\dot{D} = \frac{10^6 \text{ Bq}}{70 \text{ kg}} \times 273.12 \frac{\text{kg} \cdot \text{fGy}}{\text{Bq} \cdot \text{s}}$$

$$= 39 \times 10^6 \text{ fGy/s} (194 \text{ mrad/h})$$

سینتیک فیزیولوژیکی که دز محاسبه شده از ایزوتوپهای پرتوزای رسوب یافته در داخل بدن بر آن مبتنی است، در رابطه فعالیت انباشته، $\tilde{A}$ ، گنجانده شده است، در حالی که جملات سمت راست معادله (۶۰.۶) به اندازه گیرها و داده های فیزیکی مربوط می شوند. کسر جذب شده φ_i نشان دهنده مقداری از انرژی است که در تمام اندام یا بافت جذب می شود. بنا بر معادله (۶۰.۶) باید مقدار کل انرژی جذب شده یا $\sum \varphi_i \Delta_i$ را بر جرم اندام هدف (m) تقسیم کنیم. به جای آنکه کسر انرژی جذب شده در اندام هدف را بر وزن اندام تقسیم کنیم، بهتر است از کسر جذب ویژه یا Φ_i استفاده کنیم. Φ_i ، کسر انرژی جذب شده در واحد جرم بافت هدف در اثر زامین ذره گسیل شده از اندام چشمه است. کسرهای جذب ویژه ناشی از فوتونهای با انرژیهای مختلف برای یک شخص مرجع را که با روش

مونت کارلو محاسبه شده است، در جدول پیوست این کتاب آورده ایم. به کمک این جدول، کسرهای جذب ویژه تابش آلفا و بتا را می توان به راحتی محاسبه کرد. در محیط بزرگی که در آن يك گسیلنده آلفا یا بتا به طور یکنواخت توزیع شده است، اساساً تمام انرژی گسیل شده جذب می شود. در موردی که هدف و چشمه دو اندام همانندند و برد تابش ایزوتوپهای پرتوزای رسوب یافته از کوچکترین بعد اندامی که در آن رسوب می کنند کمتر است، کسر جذب ویژه در اندامی به جرم m تقریباً برابر خواهد بود با

$$\Phi = \frac{\varphi}{m} = \frac{1}{m} \quad (۶۶.۶)$$

هنگامی که اندام هدف از اندام چشمه بسیار دور است یعنی فاصله بین آنها از برد ذرات آلفا و بتا بزرگتر است، هدف از چشمه انرژی جذب نمی کند و $\Phi = 0$ خواهد بود. اما وقتی بافت هدف در ناحیه ای است که به وسیله چشمه محاصره شده است، کسر جذب ویژه در هدف برابر است با

$$\Phi = \frac{1}{m (\text{چشمه})} \quad (۶۷.۶)$$

برای مثال اگر گسیلنده بتا به طور یکنواخت در تمام بدن توزیع شده و وزن کبد 1.8 kg و وزن شخص 70 kg باشد، کسر جذب ویژه کبد از پرتو زایی بیرون از آن چنین خواهد بود

$$\Phi = \frac{1}{70 - 1.8} = 1.47 \times 10^{-2} \text{ kg}^{-1}$$

هنگامی که از کسر جذب ویژه استفاده می شود، دز جذب شده را می توان از رابطه زیر به دست آورد

$$D = \tilde{A} \sum \Delta_i \Phi_i \quad (۶۸.۶)$$

چون هر اندامی در بدن برای اندام چشمه به مثابه يك هدف است، ارتباط دقیق هدف - چشمه به صورت زیر مشخص می شود

$$(r_k \leftarrow r_h)$$

که در آن r_k نشان دهنده اندام هدف و r_h نماینده اندام چشمه است. از این رو، دز اندام هدف r_k در اثر فعالیت $\tilde{A}_h$ در اندام چشمه r_h به صورت زیر نوشته می شود

$$D(r_k \leftarrow r_h) = \tilde{A}_h \sum \Delta_i \Phi_i(r_k \leftarrow r_h) \quad (۶۹.۶)$$

در اینجا با استفاده از کسر جذب ویژه می توان نوشت

$$S(r_k \leftarrow r_h) = \sum \Delta_i \Phi_i(r_k \leftarrow r_h) \quad (70.6)$$

چون S فقط به عوامل فیزیکی، مثل ارتباط هندسی میان چشمه و هدف بستگی دارد، می توانیم مقدار S را برای تمام ارتباطهای چشمه - هدف مورد نظر و نیز برای هر نوع ایزوتوپ پرتوزا در اندام چشمه حساب کنیم. در این صورت، دز هر یک از اندامهای هدف یعنی r_k در اثر اندام چشمه r_h به صورت زیر به دست می آید

$$D(r_k \leftarrow r_h) = \tilde{A}_h \times S(r_k \leftarrow r_h) \quad (71.6)$$

وانگهی چون معمولاً پرتوزایی داخلی بدن در همه جا پخش می شود، اندام هدف ممکن است تحت تابش دهی چندین اندام چشمه مختلف قرار بگیرد. بنا بر این، دز هدف به صورت زیر خواهد بود

$$D(r_k) = \sum_h D(r_k \leftarrow r_h) \quad (72.6)$$

جداول $S(r_k \leftarrow r_h)$ به ازای فعالیت انباشته واحد برای تعداد زیادی از اندامهای هدف و چشمه و برای تعداد زیادی از ایزوتوپهای پرتوزای مورد نظر، در جزوه شماره ۱۱ MIRD آمده است. در جدول ۹.۶ که در واقع گزیده ای از این جزوه است، می توان مقادیر S را برای ^{203}Hg استخراج کرد. اکنون به منظور آشنایی با طرز استفاده از جداول S برای محاسبات دز داخلی، مثال زیر را بررسی می کنیم.

مثال ۹.۶

بر اثر استنشاق اتفاقی جیوه معلوم شده است که بازماند آن در کلیه به صورت یک تابع منفردنمایی با آهنگ تحول مؤثر ۲۶٪ در روز است. اگر بر اثر استنشاق حاد بخارجیوه مقدار ۵ MBq از ^{203}Hg در کلیه ها رسوب کرده باشد، دز انباشته کلیه ها در این استنشاق چقدر است؟ به منظور سهولت در محاسبه، فرض کنید که جیوه در کلیه ها به طور یکنواخت توزیع می شود و ۵۰٪ بار جیوه در کلیه ها، ۲۰٪ در کبد و بقیه به طور یکنواخت در سایر قسمتهای بدن توزیع شده است.

حل: شکل ۱۳.۶ طرح واپاشی ^{203}Hg نشان می دهد که جیوه یک گروه منفرد ذره بتا با انرژی بیشینه ۲۱۲ MeV گسیل می کند که انرژی میانگین آن در داده های خروجی برابر ۵۷۷ MeV ثبت شده است. بعد از هر تبدیل بتا، یک پرتو گاما ۲۷۹ MeV گسیل می شود. اما پرتو گاما، در ۱۸٫۳٪ از تبدیلات از طریق فرایند تبدیل داخلی به گسیل الکترونها تبدیل از ترازهای انرژی K، L، یا M منجر می شود و عملاً فقط در ۸۱٫۷٪ از تبدیلات پرتو گاما گسیل می شود.

جدول ۹.۶ میزبان دز جذب شده به ازای واحد فعالیت انباشته ^{203}Hg را نشان می دهد. اگر کلیه ها را چشمه در نظر بگیریم، داریم

جدول ۹.۶، دز جذب شده به‌ازای واحد فعالیت انباشته ($\text{rad}/\mu\text{Ci}\cdot\text{h}$) برای جیوه ^{203}h (نیمه‌عمر 10^{-3})

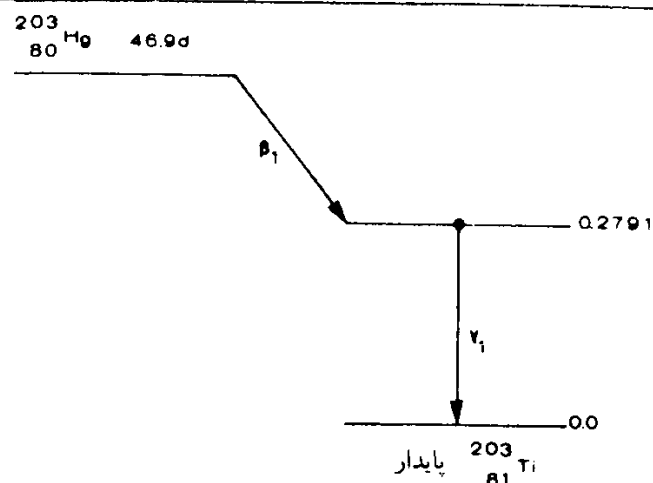
اندامهای چشمه

روده‌ها

اندامهای هدف	غدد فوق کلیوی	محتویات مثانه	محتویات معده	محتویات روده کوچک	محتویات قسمت فوقانی روده بزرگ	محتویات قسمت تحتانی روده بزرگ	کلیه	کبد	ریه‌ها	سایر بافتها (ماهیچه‌ای)
غدد فوق کلیوی	1.6E-02	3.6E-07	4.2E-06	2.7E-06	1.7E-06	8.4E-07	1.9E-05	9.0E-06	4.4E-06	2.7E-06
جدار مثانه	2.1E-07	6.6E-04	5.0E-07	5.0E-06	3.8E-06	1.1E-05	5.9E-07	3.6E-07	1.0E-07	3.2E-06
استخوان (کلیه استخوانها)	2.9E-06	1.3E-06	1.3E-06	1.8E-06	1.6E-06	2.3E-06	2.1E-06	1.6E-06	2.1E-06	1.9E-06
دستگاه گوارش (جدار معده)	5.3E-06	5.2E-07	5.1E-04	6.5E-06	6.7E-06	3.2E-06	6.1E-06	3.5E-06	3.3E-06	2.5E-06
دستگاه گوارش (روده کوچک)	1.6E-06	5.1E-06	4.7E-06	3.2E-04	3.0E-05	1.7E-05	5.1E-06	3.0E-06	3.9E-07	2.8E-06
دستگاه گوارش (جدار قسمت فوقانی روده بزرگ)	1.7E-06	4.2E-06	6.3E-06	4.2E-05	5.5E-04	7.7E-06	5.2E-06	4.5E-06	4.9E-07	2.9E-06
دستگاه گوارش (جدار قسمت تحتانی روده بزرگ)	4.6E-07	1.3E-05	2.3E-06	1.3E-05	5.4E-06	8.7E-04	1.5E-06	4.6E-07	1.8E-07	3.1E-06
کلیه‌ها	2.1E-05	5.5E-07	6.3E-06	5.5E-06	5.0E-06	1.7E-06	8.1E-04	6.9E-06	1.7E-06	2.5E-06
کبد	8.9E-06	4.1E-07	3.6E-06	3.3E-06	4.6E-06	5.3E-07	7.0E-06	1.6E-04	4.4E-06	2.0E-06
ریه‌ها	4.4E-06	5.6E-08	3.1E-06	4.8E-07	5.2E-07	1.6E-07	1.6E-06	4.5E-06	2.4E-04	2.4E-06
مغز استخوان (آرمز)	5.2E-06	3.0E-06	2.3E-06	5.8E-06	5.0E-06	6.9E-06	5.3E-06	2.3E-06	2.7E-06	2.9E-06
سایر بافتها (ماهیچه)	2.7E-06	3.2E-06	2.5E-06	2.8E-06	2.7E-06	3.1E-06	2.5E-06	2.0E-06	2.4E-06	1.0E-05
تغذیه‌ها	1.0E-06	1.3E-05	8.1E-07	1.8E-05	2.1E-05	3.4E-05	2.2E-06	7.6E-07	2.3E-07	3.6E-06
لوزالمعده	1.5E-05	5.2E-07	3.2E-05	3.7E-06	4.1E-06	1.3E-06	1.2E-05	7.4E-06	4.7E-06	3.2E-06
پوست	1.1E-06	1.1E-06	9.0E-07	8.5E-07	8.6E-07	9.8E-07	1.1E-06	9.8E-07	1.1E-06	1.5E-06
طحال (سپرز)	1.2E-05	3.3E-07	1.8E-05	2.8E-06	2.5E-06	1.5E-06	1.6E-05	1.7E-06	4.1E-06	2.6E-06
بجسه‌ها	9.2E-08	8.4E-06	9.9E-08	6.3E-07	6.5E-07	3.7E-06	2.2E-07	1.6E-07	2.8E-08	2.1E-06
غده درونی (تیروئید)	3.0E-07	9.0E-09	2.3E-07	4.8E-08	5.2E-08	2.0E-08	1.3E-07	3.8E-07	1.7E-06	2.4E-06
رحم (آب‌استن)	3.3E-06	2.8E-05	1.5E-06	1.7E-05	8.5E-06	1.2E-05	1.8E-06	7.2E-07	1.7E-07	4.0E-06
تمام بدن	6.0E-06	3.7E-06	4.1E-06	6.0E-06	4.9E-06	5.2E-06	6.0E-06	6.1E-06	5.6E-06	5.5E-06

اندامهای چشمه

اندامهای هدف	تخمینها	لوزالمعدده	میز استخوان قوز				پوست	طحال	پیضهها	غده درونی	تمام بدن
			اسکلت								
غده فوق کلیوی جدار مثانه استخوان (کلیه استخوانها) دستگاه گوارش (جدار معدله) دستگاه گوارش (زوده کوچک)	7.7E-07	1.5E-05	4.4E-06	2.5E-06	2.5E-06	1.4E-06	1.2E-05	9.2E-08	3.0E-07	6.5E-06	
	1.2E-05	3.0E-07	1.4E-06	9.3E-07	9.3E-07	1.0E-06	2.9E-07	8.8E-06	9.1E-09	6.2E-06	
	2.1E-06	2.0E-06	1.0E-05	4.9E-05	4.0E-05	1.6E-06	1.6E-06	1.4E-06	1.5E-06	6.0E-06	
	1.4E-06	3.3E-05	1.9E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.7E-05	1.2E-07	1.1E-07	6.4E-06	
دستگاه گوارش (زوده بزرگ) دستگاه گوارش (جدار قسمت فوقانی زوده بزرگ) دستگاه گوارش (جدار قسمت تحتانی زوده بزرگ) کلیهها کبد ریبهها	2.1E-05	3.3E-06	4.7E-06	1.4E-06	1.4E-06	9.0E-07	2.5E-06	8.0E-07	2.4E-08	6.6E-06	
	2.0E-05	4.0E-06	3.8E-06	1.3E-06	1.3E-06	8.9E-07	2.3E-06	6.4E-07	2.0E-08	6.3E-06	
	2.6E-05	1.0E-06	5.3E-06	1.9E-06	1.9E-06	9.4E-07	1.2E-06	5.1E-06	1.6E-08	6.2E-06	
	1.8E-06	1.1E-05	4.1E-06	1.6E-06	1.6E-06	1.2E-06	1.6E-05	1.2E-07	7.3E-08	6.1E-06	
میز استخوان (قوز) سایر بافتها (ماهیچهها) تخمینها لوزالمعدده پوست	1.1E-06	7.8E-06	1.8E-06	1.2E-06	1.2E-06	1.1E-06	1.9E-06	7.7E-08	2.3E-07	6.0E-06	
	1.4E-07	4.5E-06	2.2E-06	1.8E-06	1.8E-06	1.2E-06	4.0E-06	2.2E-08	1.8E-06	5.6E-06	
	7.2E-06	3.8E-06	1.3E-04	6.5E-06	3.5E-05	1.5E-06	2.5E-06	1.1E-06	1.7E-06	6.4E-06	
	3.6E-06	3.2E-06	2.3E-06	1.9E-06	1.9E-06	1.5E-06	2.6E-06	2.1E-06	2.4E-06	5.5E-06	
طحال (سپروز) پیضهها غده درونی (تیروئید) رسم (تاآیستین) تمام بدن	2.1E-02	6.0E-07	4.7E-06	1.4E-06	1.4E-06	8.0E-07	1.2E-06	0.0	1.9E-08	6.3E-06	
	9.1E-07	2.5E-03	3.0E-06	1.9E-06	1.9E-06	1.0E-06	3.4E-05	1.2E-07	1.8E-07	6.7E-06	
	1.5E-07	8.1E-07	1.2E-06	1.4E-06	1.4E-06	8.4E-05	9.6E-07	2.7E-06	1.5E-06	4.5E-06	
	1.0E-06	3.5E-05	1.6E-06	1.3E-06	1.3E-06	1.1E-06	1.4E-03	8.6E-08	2.2E-07	6.2E-06	
	0.0	1.3E-07	6.1E-07	1.1E-06	1.1E-06	1.8E-06	1.3E-07	6.6E-03	2.8E-09	5.3E-06	
	1.9E-08	2.9E-07	1.4E-06	1.7E-06	1.7E-06	1.4E-06	2.2E-07	2.8E-09	1.1E-02	5.3E-06	
	3.7E-05	1.1E-06	4.0E-06	1.1E-06	1.1E-06	7.8E-07	7.4E-07	1.8E-08	1.8E-08	6.7E-06	
	6.7E-06	6.6E-06	5.9E-06	5.6E-06	5.6E-06	4.5E-06	6.1E-06	5.5E-06	5.3E-06	5.6E-06	



جیوه ۲۰۳

وایشی بتای منفی

داده‌های ورودی			
تابش	درصد فروپاشی	انرژی گذار (MeV)	دیگر پارامترهای هسته‌ای
Beta-1	100.	0.213	Allowed
Gamma-1	100.	0.2791	E2 + 38% M1, $\alpha_K = 0.162$, K/L = 3.39, K/M = 11.3

داده‌های خروجی			
تابش (i)	تعداد میانگین در هر فروپاشی (n _i)	انرژی میانگین (MeV) (E _i)	Δ_i (μCi·h) (a-rad)
Beta-1	1.00	0.0580	0.1235
Gamma-1	0.817	0.2791	0.4857
K int. con. electron, gamma-1	0.132	0.1936	0.0544
L int. con. electron, gamma-1	0.0390	0.2648	0.0220
M int. con. electron, gamma-1	0.0117	0.2761	0.0069
K α-1 x-rays	0.0634	0.0729	0.0098
K α-2 x-rays	0.0350	0.0708	0.0053
K β-1 x-rays	0.0223	0.0826	0.0039
K β-2 x-rays	0.0063	0.0855	0.0011
L α x-rays	0.0273	0.0103	0.0006
L β x-rays	0.0256	0.0122	0.0007
L γ x-rays	0.0035	0.0143	0.0001
KLL Auger electron	0.0032	0.0570	0.0004
KLX Auger electron	0.0018	0.0683	0.0003
KXY Auger electron	0.0003	0.0796	0.0001
LMM Auger electron	0.0893	0.0084	0.0016
MXV Auger electron	0.271	0.0030	0.0017

شکل ۱۳.۶ طرح تبدیل و داده‌های ورودی و خروجی دزسنجی ^{203}Hg .

$$S(\text{کلیه‌ها} \leftarrow) = ۸۱ \times ۱۰^{-۴} \text{ rad}/\mu\text{Ci}\cdot\text{h}$$

و اگر کبد چشمه باشد، دز کبد به کلیه عبارت است از

$$S(\text{کبد} \leftarrow \text{کلیه‌ها}) = ۶۹ \times ۱۰^{-۶} \text{ rad}/\mu\text{Ci}\cdot\text{h}$$

در جزوه شماره ۲ ICRP نیمه‌عمر مؤثر ^{203}Hg در کبد ۱۰۴ روز و نیمه‌عمر مؤثر ^{203}Hg در تمام بدن ۸۲ روز تعیین شده است (جدول ۱۰.۶). دز کل کلیه‌ها برابر است با مجموع دزهایی که از ^{203}Hg رسوب شده در کلیه‌ها و در کبد و در بقیه بدن حاصل می‌شود. اگر به فرض نصف بار Hg در کلیه‌ها و ۲۰٪ آن در کبد باشد، آنگاه این پرتوگیری اتفاقی به رسوب ۰.۲ MBq در کبد و ۰.۳ MBq در بقیه بدن منجر می‌شود.

فعالیت انباشته در کلیه از معادله (۶.۵.۶) به دست می‌آید

$$\tilde{A} = \frac{A_i(0)}{\lambda_E} = \frac{۵ \times ۱۰^۵ \text{ Bq}}{۲۲۶ \times ۱۰^{-۲} \text{ d}^{-1} \times ۱ \text{ d} / ۸۶۴۰۰ \text{ s}} = ۱۶۶ \times ۱۰^{۱۲} \text{ Bq}\cdot\text{s}$$

با استفاده از جدول ۹.۶ متوجه می‌شویم که

جدول ۱۵۰۶ داده‌های مربوط به سینتیک فیز یولوژیکی حیو.

ماده مرجع	عنصر و نوکلیدهای پرتوزا	میانگین بلع روزانه (g/d)	اندام، جرم (g)، شعاع مؤثر (cm)	میانگین تراکم (بافت تر (g/g)	نیمه عمر (روز)			کسر ورودی به خون از طریق روده‌ها f_1	نسبت موجودی اندام مرجع به تمام بدن Z_k		کسر ورودی به اندام مرجع از طریق خون Z_k	کسر ورودی به اندام مرجع	
					فیزیکی T_f	زیست شناختی T_b	مؤثر T		عنصر	نوکلید پرتوزا		از بلع f_s	از تنفس f_i
$z \setminus$			Ch-1		eq. 44, 45	eq. 49				eq. 41, 42		eq. 47	eq. 46
80	Hg	2×10^{-3} (SI-1)	تمام بدن 7×10^4 g 30 cm	10 (Ha-85)	0.91	2.1	8.2	0.75 (SI-1)	1.0 (D)	1.0 (D) 1.0 (D) 1.0 (D) 1.0 (D)	1.0 (D)	0.75	0.63
	Hg ^{197m}												
	Hg ¹⁹⁷												
	Hg ²⁰³												
	Hg												
	کبد 300 g 7 cm	5×10^{-7} (Stk-1)	1 2.7 45.8	14.5	0.94 2.3 11.0	0.5 (Ha-85)	0.36 0.38 0.47	0.35 (Ha-85)	0.26	0.22			
											Hg ^{197m}		
											Hg ¹⁹⁷		
											Hg ²⁰³		
											Hg		
	کبد 1.7×10^3 g 10 cm	2.0×10^{-7} (Stk-1)	1 2.7 45.8	13.5	0.93 2.3 10.4	0.2 (Ha-85)	0.15 0.16 0.19	0.15 (Ha-85)	0.11	0.09			
											Hg ^{197m}		
											Hg ¹⁹⁷		
											Hg ²⁰³		
											Hg		
	طحال 150 g 7 cm	1.3×10^{-7} (Stk-1)	1 2.7 45.8	10 (Ha-85)	0.9 2.1 8.2	0.02 (Ha-85)	0.02 0.02 0.02	0.02 (Ha-85)	0.02	0.01			
											Hg ^{197m}		
											Hg ¹⁹⁷		
											Hg ²⁰³		
											Hg		

$$S(\text{کلیه ها} \leftarrow \text{کلیه ها}) = 8.1 \times 10^{-4} \text{ rad}/\mu\text{Ci}\cdot\text{h}$$

برای تبدیل $\text{rad}/(\mu\text{Ci}\cdot\text{h})$ به $\text{Gy}/(\text{Bq}\cdot\text{s})$ به صورت زیر عمل می کنیم

$$\begin{aligned} \frac{\text{Gy}}{\text{Bq}\cdot\text{s}} &= \frac{\text{rad}}{\mu\text{Ci}\cdot\text{h}} \times \frac{1 \text{ Gy}}{100 \text{ rad}} \times \frac{1 \mu\text{Ci}}{3.7 \times 10^4 \text{ Bq}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \times 10^3 \text{ s}} \\ &= \frac{\text{rad}}{\mu\text{Ci}\cdot\text{h}} \times 7.51 \times 10^{-11} \end{aligned} \quad (73.6)$$

با استفاده از ضریب تبدیل در معادله (۷۳.۶) نتیجه می گیریم که

$$S(\text{کلیه} \leftarrow \text{کلیه}) = 6.08 \times 10^{-14} \text{ Gy}/\text{Bq}\cdot\text{s}$$

دز کلیه در اثر جیوه داخل کلیه از معادله (۷۱.۶) محاسبه می شود

$$\begin{aligned} D(\text{کلیه} \leftarrow \text{کلیه}) &= \tilde{A}(\text{کلیه}) \times S(\text{کلیه} \leftarrow \text{کلیه}) \\ &= 1.66 \times 10^{12} \text{ Bq}\cdot\text{s} \times 6.08 \times 10^{-14} \text{ Gy}/\text{Bq}\cdot\text{s} \\ &= 0.1010 \text{ Gy} (10.10 \text{ rad}) \end{aligned}$$

سهم ^{203}Hg موجود در کبد به دز کلیه از معادلات (۶۵.۶) و (۷۱.۶) محاسبه می شود

$$\begin{aligned} D(\text{کبد} \leftarrow \text{کبد}) &= \frac{A_s(^{\circ})}{\lambda_E} (\text{کبد}) \times S(\text{کبد} \leftarrow \text{کبد}) \\ &= \frac{2 \times 10^5 \text{ Bq}}{7.71 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}} \times 5.18 \times 10^{-16} \text{ Gy}/\text{Bq}\cdot\text{s} \\ &= 1.344 \times 10^{-4} \text{ Gy} (1.344 \times 10^{-2} \text{ rad}) \end{aligned}$$

نیمه عمر دفع مؤثر ^{203}Hg از کبد برابر ۸۲ روز است که با ثابت دفع مؤثر $7.91 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ متناظر است، و S به کمک جدول ۹.۶ تبدیل می شود. با همین روش می توان دز تابشی به کلیه را از باقیمانده ^{203}Hg که در بقیه بدن توزیع شده است، حساب کرد

$$\begin{aligned} D(\text{بدن} \leftarrow \text{بدن}) &= \frac{A_s(^{\circ})}{\lambda_E} (\text{بدن}) \times S(\text{کلیه} \leftarrow \text{بدن}) \\ &= \frac{3 \times 10^5 \text{ Bq}}{9.78 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}} \times 4.58 \times 10^{-16} \text{ Gy}/\text{Bq}\cdot\text{s} \\ &= 1.406 \times 10^{-4} \text{ Gy} (1.406 \times 10^{-2} \text{ rad}) \end{aligned}$$

بنابراین، دز کل کلیه‌ها طبق معادله (۷۰.۶) برابر است با

$$D(\text{کلیه‌ها}) = 1.010 \times 10^{-1} + 1.344 \times 10^{-4} + 1.406 \times 10^{-4} \\ = 0.1012 \text{ Gy} (10.12 \text{ rad})$$

نوترونها

دز جذب شده از باریکه‌ای از نوترونها را می‌توان با بررسی انرژی جذب شده در هر کدام از عناصر بافت که با نوترونها واکنش می‌کند، حساب کرد. البته نوع واکنش، به انرژی نوترون بستگی دارد. سازوکار اصلی انتقال انرژی برای نوترونهای تند (تا حدود ۲۰ MeV) برخورد کشسان است، در صورتی که نوترونهای گرمایی ممکن است گیراندازی شوند و واکنشهای هسته‌ای راه بیندازند. در موارد پراکندگی کشسان، هسته‌های پراکنده شده انرژیهایشان را در مجاورت محل برهم‌کنش اولیه نوترون از دست می‌دهند. دز تابشی را که به‌طور موضعی جذب می‌شود دز برخورد اول می‌گویند و آن را به کمک شار اولیه نوترون به‌طور کامل تعیین می‌کنند، نوترون پراکنده شده را پس از این برهم‌کنش اولیه در نظر می‌گیرند. آهنگ دز برخورد اول برای نوترونهای تند با انرژی E عبارت است از

$$\dot{D}_n(E) = \frac{\phi(E) E \sum N_i \sigma_i f_i}{1 \text{ J/kg.Gy}} \quad (74.6)$$

که در آن $\phi(E)$ شار نوترونهای با انرژی E (بر حسب $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$)، E انرژی نوترون (بر حسب ژول)، N_i تعداد اتم در هر کیلوگرم عنصر i ام، σ_i سطح مقطع پراکندگی عنصر i ام برای نوترونهای با انرژی E (بر حسب $\text{cm}^2 \times 10^{-24}$ بارن)، f میانگین کسر انرژی منتقل شده از نوترون به اتم پراکنده در خلال برخورد با نوترون است. کسر میانگین انتقال انرژی نوترون برای پراکندگی همسانگرد در برخورد کشسان با یک هسته به عدد جرمی M برابر است با

$$f = \frac{2M}{(M+1)^2} \quad (75.6)$$

ترکیب بافت نرم برای دزسنجی تابش در جدول ۱۱.۶ آمده است. در این جدول کسر میانگین انتقال انرژی نوترون برای هر یک از عناصر بافت نیز ذکر شده است.

جدول ۱۱.۶ ترکیب مصنوعی بافت.

عنصر	درصد جرم	$N, \text{atom/kg}$	f
اکسیژن	۷۱٫۳۹	$۲٫۶۹ \times ۱۰^{۲۵}$	۰٫۱۱۱
کربن	۱۴٫۸۹	$۶٫۴۱ \times ۱۰^{۲۴}$	۰٫۱۴۲
هیدروژن	۱۰٫۰۰	$۵٫۹۸ \times ۱۰^{۲۵}$	۰٫۵۰۰
نیتروژن	۳٫۴۷	$۱٫۴۹ \times ۱۰^{۲۴}$	۰٫۱۲۴
سدیم	۰٫۱۵	$۳٫۹۳ \times ۱۰^{۲۲}$	۰٫۰۸۰
کلر	۰٫۱۰	$۱٫۷۰ \times ۱۰^{۲۲}$	۰٫۰۵۳

مثال ۱۱.۶

باریکه‌ای از نوترونهای ۵ MeV با شدت ۲۰۰۰ نوترون بر سانتی‌متر مربع بر ثانیه به بافت نرمی می‌تابد. آهنک دز جذب شده چقدر است؟
 سطح مقطع پراکندگی هر یک از عناصر بافت برای نوترونهای ۵ MeV به شرح زیر است

عنصر	σ بر حسب cm^2	$N_i \sigma_i f_i$
O	$۱٫۵۵ \times ۱۰^{-۲۴}$	$۴٫۶۲۸ \times ۱۰^۰$
C	$۱٫۶۵ \times ۱۰^{-۲۴}$	$۱٫۵۰۲ \times ۱۰^۰$
H	$۱٫۵۰ \times ۱۰^{-۲۴}$	$۴٫۴۸۵ \times ۱۰^۱$
N	$۱٫۰۰ \times ۱۰^{-۲۴}$	$۱٫۸۴۸ \times ۱۰^{-۱}$
Na	$۲٫۳ \times ۱۰^{-۲۴}$	$۷٫۲۳۱ \times ۱۰^{-۳}$
Cl	$۲٫۸ \times ۱۰^{-۲۴}$	$۲٫۵۲۳ \times ۱۰^{-۳}$

$$\Sigma N_i \sigma_i f_i = ۵٫۱۱۷ \times ۱۰^۱ \text{ cm}^2/\text{kg}$$

حل: با قراردادن مقادیر مناسب در معادله (۶۳.۶) داریم

$$\dot{D}_n = \frac{2 \times 10^3 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s} \times 5 \text{ MeV/n} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \times 5117 \text{ cm}^2/\text{kg}}{1 \text{ J/kg} \cdot \text{Gy}}$$

$$= 8.19 \times 10^{-8} \text{ Gy/s} (8.19 \times 10^{-6} \text{ rad/s})$$

یا

$$\begin{aligned} & 8.19 \times 10^{-8} \text{ Gy/s} \times 10^6 \mu\text{Gy/Gy} \times 3600 \times 10^3 \text{ s/h} \\ &= 295 \mu\text{Gy/h} (295 \text{ mrad/h}) \end{aligned}$$

در مثال بالا، باریکه نوترون تک انرژی فرض شده بود، و از این رو فقط یک انرژی را در نظر گرفتیم. اما اگر باریکه متشکل از نوترونها با انرژیهای متفاوت باشد، برای هر انرژی باید محاسبه جداگانه ای انجام شود.

در مورد نوترونها گرمایی باید ۲ واکنش، یکی واکنش $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ و دیگری واکنش $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$ در نظر گرفته شود. آهنگ دز واکنش اول را از معادله زیر می توان حساب کرد

$$\dot{D}_{np} = \frac{\phi N \sigma Q \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}}{1 \text{ J/kg} \cdot \text{Gy}} \quad (76.6)$$

که در آن ϕ شار گرمایی بر حسب نوترون بر سانتی متر مربع بر ثانیه، N تعداد اتمهای نیتروژن در هر کیلوگرم بافت (1.49×10^{24}) ، σ سطح مقطع جذب نیتروژن $(1.75 \times 10^{-24} \text{ cm}^2)$ ، و Q انرژی آزاد شده در واکنش (0.63 MeV) است. واکنش دیگر یعنی $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$ معادل این است که ایزوتوپ گسیلنده گاما به طور یکنواخت در سراسر بدن توزیع شده باشد که در این صورت با دز پرتوگامای سراسری روبه رو می شویم. فعالیت ویژه این گسیل کننده گامای توزیع شده (یعنی تعداد واکنشها بر ثانیه بر گرم) را که از شار نوترون نتیجه می شود به کمک معادله زیر به دست می آوریم

$$A = \phi N \sigma \text{ "Bq"/kg} \quad (77.6)$$

که در آن ϕ شار گرمایی بر حسب نوترون بر cm^2 بر ثانیه، N تعداد اتمهای هیدروژن در هر کیلوگرم بافت (5.98×10^{25}) ، و σ سطح مقطع جذب هیدروژن $(0.33 \times 10^{-24} \text{ cm}^2)$ است.

مثال ۱۲.۶

شخصی به وزن ۷۰ کیلوگرم در معرض تابش شار گرمایی میانگین ۱۰۰۰۰ نوترون بر سانتی متر مربع بر ثانیه قرار می گیرد. آهنگ دز جذب شده چقدر است؟

حل: دز ناشی از واکنش (n, p) از معادله (۷۶.۶) محاسبه می‌شود

$$\dot{D}_{np} = 1 \times 10^4 \times 1.749 \times 10^{24} \times 1.775 \times 10^{-24} \times 0.063 \times 1.6 \times 10^{-13} \\ = 2.7628 \times 10^{-9} \text{ Gy/s} \quad (2.7628 \times 10^{-7} \text{ rad/s})$$

یا

$$\dot{D}_{np} = 9.9461 \mu\text{Gy/h} \quad (0.995 \text{ mrad/h})$$

آهنگ دز پرتوگامای سراسری از معادلات (۶۸.۶) و (۵۶.۶) به دست می‌آید و «فعالیت» پرتوگاما را می‌توان از معادله (۷۷.۶) محاسبه کرد

$$A = 10^4 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \times 5.98 \times 10^{25} \text{ atom/kg} \times 3.3 \times 10^{-25} \text{ cm}^2/\text{atom} \\ = 1.973 \times 10^5 \text{ "Bq"/kg}$$

آهنگ دز حاصل از این فعالیت پرتوگاما که به طور یکنواخت توزیع شده است، از معادله (۵۶.۶) به دست می‌آید

$$\dot{D}_\gamma = \frac{A_s}{m} \times \varphi \times \Delta$$

کسر جذب شده φ مربوط به پرتوگامای 2.23 MeV با برونمایی جدول ۸.۶ بین مقادیر 2000 MeV و 4000 MeV برابر 0.278 به دست می‌آید، و آهنگ دز Δ در یک جرم بی نهایت بزرگ که فعالیت ویژه آن برابر 1 Bq/kg است از معادله (۵۵.۶) محاسبه می‌شود

$$\Delta = 1.6 \times 10^{-13} \times 2.23 = 3.57 \times 10^{-13} \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1} / \text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$$

بنابراین آهنگ دز پرتوگامای سراسری برابر است با

$$\dot{D}_\gamma = 1.973 \times 10^5 \text{ Bq/kg} \times 0.278 \times 3.57 \times 10^{-13} \text{ kg} \cdot \text{Gy} / \text{Bq} \cdot \text{s} \\ = 1.96 \times 10^{-8} \text{ Gy/s} \quad (1.96 \times 10^{-6} \text{ rad/s})$$

یا

$$70.6 \mu\text{Gy/h} \quad (7.06 \text{ mrad/h})$$

در این مورد ما نمی‌توانیم آهنگ دز پرتوگامای سراسری را با دز مربوط به واکنش (n, p) جمع کنیم زیرا دز جذب شده 1 Gy تابش گاما از لحاظ زیست‌شناختی معادل 1 Gy تابش پروتون نیست. در فصل بعد، این نکته را که به تأثیر نسبی زیست‌شناختی تابشهای مختلف مربوط می‌شود بررسی می‌کنیم.

مسائل

۱. حجم حساس يك دزسنج جیبی ($\sim 200 \text{ mR}$) با دیواره‌های هم‌ارز هوا، در فشار جو از هوا پر شده است. قطر حجم حساس برابر 5 in و طول آن 2.5 in است. اگر ظرفیت این دزسنج 10 pF و اختلاف پتانسیل لازم برای باردار کردن آن 200 V باشد، ولتاژ دوسر آن را هنگامی که $50 \mu\text{C/kg}$ ($\sim 200 \text{ mR}$) را نشان می‌دهد حساب کنید.

۲. اتاقک یونش هوایی با حجم ۱ لیتر، در دمای 27°C و فشار 700 تور به‌عنوان دیدبان محیط به‌کار می‌رود. اگر جریان اشباع 10^{-13} آمپر باشد، آهنگ پرتوگیری بر حسب $\mu\text{C/kg}\cdot\text{h}$ و mR/h چقدر است؟

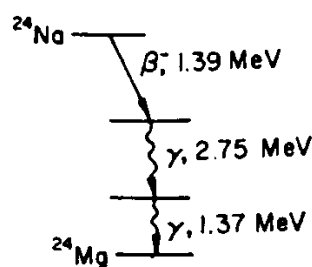
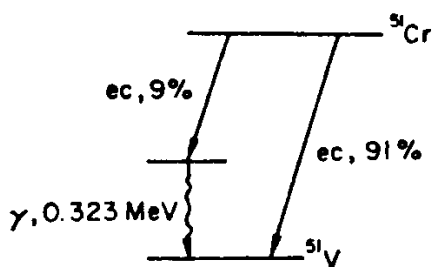
۳. دو باریکه پرتوگاما یکی به انرژی 1 MeV و دیگری 1 MeV ، چگالی یونش یکسانی در هوا تولید می‌کنند. نسبت شار فوتون 1 MeV به 1 MeV چقدر است؟

۴. اگر گرمای ویژه بدن انسان 1 cal/g باشد، افزایش دمای ناشی از دز تمام بدن به میزان ۵ گری چقدر است؟

۵. آهنگ پرتوگیری را در فاصله ۵۰ سانتی‌متر از يك شیشه كوچك دارو كه محتوی 10 ml محلول مایع زیر است، بر حسب mGy/h و بر اساس طرحهای تبدیل زیر حساب کنید.

(الف) ${}^{51}\text{Cr}$ (541 mCi) 2 GBq

(ب) ${}^{24}\text{Na}$ (541 mCi) 2 GBq



طرحهای تبدیل

۶. آهنگ دز دریافتی يك عضله را در خلال پرتوگیری (100 mR/h) $2504 \mu\text{C/h}$ از تابش گامای 5 MeV به‌دست آورید.

۷. در يك آزمایش، به موشی به وزن ۲۵۰ گرم $10 \mu\text{Ci}$ جیوه 203 به صورت $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ تزریق می‌شود. موش به‌طور روزانه در يك شمارگر تمام بدنی شمارش می‌شود، و معادله زیر اطلاعات شمارش تمام بدن را به‌دست می‌دهد

$$Y = 0.55e^{-0.00345t} + 0.45e^{-0.00346t}$$

که در آن Y نشاندهنده کسر در تزریق شده باقیمانده در بدن پس از گذشت زمان t است.

اگر مؤلفه دراز - عمر تابع نشاندهنده دفع از کلیه ها و بخش کوتاه - عمر نشاندهنده دفع از بقیه بدن و وزن هر کلیه $7g$ ره باشد، دز جذب شده تابش تمام بدن و کلیه ها را حساب کنید. فرض کنید که جیوه به طور یکنواخت در تمام بدن و کلیه ها توزیع شده است، و محاسبه را بر مبنای طرح تبدیل شکل ۱۳.۶ انجام دهید.

۸. ید در غده تیروئید با آهنگ 139 ره بر ساعت رسوب می کند. اگر نیمه عمر پرتوزایی $123I$ برابر 13 ساعت باشد، نیمه عمر مؤثر رسوب چقدر خواهد بود؟

۹. در بیماری مبتلا به سرطان تیروئید، جذب ید در تیروئید 50% است. چقدر $131I$ باید تزریق شود تا در طی 3 روز، دزی معادل 15 گری (1500 rad) در تیروئید که 30 گرم وزن دارد جذب شود؟

۱۰. میانگین غلظت پتاسیم در آب دریا 380 mg/kg است. آهنگ دز ناشی از $40K$ حل شده را در اعماق اقیانوس بر حسب میلی گری بر سال و میلی راد بر سال محاسبه کنید.

۱۱. دز تابش سالانه شخصی را که $40K$ و $14C$ در بدنش رسوب کرده است حساب کنید. فعالیت ویژه کربن (69 pCi) 476 Bq ره بر گرم است. فرض کنید که هر دو ایزوتوپ پرتوزا به طور یکنواخت در بدن توزیع شده است.

۱۲. اتاقک یونش نازک دیواری با دیواره کربنی به حجم 2 cm^3 با هوای استاندارد در $0^\circ C$ و فشار 760 تور پر شده، و به منظور سنجش دز عمقی در داخل مخزن آبی قرار گرفته است. اگر باریکه ای از بتاترون 24 MeV در این اتاقک یک جریان $2 \mu A$ ره تولید کند، آهنگ دز جذب شده چقدر است؟

۱۳. اتاقک یونشی از جنس آلومینیم حاوی 10 cm^3 هوا در $20^\circ C$ و 760 تور، در شرایط براگت - گری کار می کند. پس از 1 ساعت پرتوگیری از پرتوهای گامای $60Co$ ، $10^{-9} \times 36$ بار در آن جمع می شود. اگر توان نسبی ایستاندگی جرمی Al برای الکترونها بی که پرتوهای $60Co$ تولید کرده اند برابر 875 ره باشد، دز آلومینیم را حساب کنید.

۱۴. اتاقک یونشی که با 50 گرم مس ساخته شده است، محفظه ای به حجم 10 cm^3 دارد که در شرایط متعارفی با هوا پر شده است. دمای مس پس از پرتوگیری پرتوهای گامای $60Co$ ، به اندازه $200^\circ C$ افزایش می یابد. اگر توان ایستاندگی جرمی Cu نسبت به هوا برابر 753 ره، و گرمای ویژه مس 92 ره کالری بر گرم بر درجه سلسیوس باشد، مطلوب است

(الف) دز جذب شده در مس.

(ب) مقدار بار جمع شده در محفظه (بر حسب کولن) در اثر یونش در طی مدت

پرتوگیری.

۱۵. مایعی محتوی ویروس معلق تحت تابش پرتوهای ایکس با ضخامت نیم - مقدار 2 mm Cu قرار می گیرد. اگر پرتودهی برابر $(10^6 R \times 10^3)$ 335 C/kg و عمق

مایع برابر ۵ mm باشد، مقدار دز جذب شده و چگالی میانگین یونش آن را تعیین کنید.
 ۱۶. کودکی برای مدت ۳۰ روز در هر روز ۱ لیتر شیر که حاوی ^{131}I با غلظت $3333 \text{ Bq} (900 \text{ pCi})$ بر لیتر است می نوشد. با فرض اینکه این کودک هیچ ^{131}I دیگری نخورد، دز تیروئید او را در پایان دوره تغذیه ۳۰ روزه و دز انباشته او را حساب کنید.
 ۱۷. به بیماری که وزنش ۵۰ کیلوگرم است دارویی از ماده آلی خورانده اند که با $4 \text{ MBq} (108 \mu\text{Ci})$ کربن ۱۴ نشاندار شده است. اندازه گیریهای مبتنی بر غلظت سنجی زیستی، اطلاعات بازماند تمام بدن را به صورت زیر به دست داده است

روز	۰	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴
MBq	۴	۲۹۴	۲۳۲	۱۹۹	۱۶۶	۱۴۴	۱۲۲	۱۰۹	۹۸	۸۶	۷۵

(الف) نمودار اطلاعات بازماند این بیمار را رسم کنید، و معادله ای بنویسید که منحنی بازماند را به صورت تابعی از زمان به دست دهد.

(ب) با فرض اینکه ^{14}C در بدن این بیمار به طور یکنواخت توزیع شده باشد، دز جذب شده را پس از ۷ روز و ۱۴ روز از مصرف دارو محاسبه کنید.

(ج) مقدار دز انباشته در این معالجه چقدر است؟

۱۸. يك باریکه الکترونی 2 MeV بر نمونه ای پلاستیکی به ضخامت 5 g/cm^2 تابانده شده است. با فرض اینکه يك باریکه 250 میکروآمپری از روزنه ای به قطر ۱ سانتی متر گذشته و بر پلاستیک تابیده شده باشد، آهنگ دز جذب شده را محاسبه کنید.

۱۹. چگالی توان میانگین (بر حسب وات بر کیلوگرم) يك محلول مایع از ^{60}Co با غلظت 10 MBq بر لیتر را در حالت های زیر حساب کنید:

(الف) يك محیط بی نهایت بزرگ.

(ب) يك مخزن کروی به گنجایش ۶ لیتر.

۲۰. يك استوانه سر بسته ۲۰ لیتری از جنس پلی اتیلن حاوی $3700 \text{ MBq} (100 \text{ mCi})$ ^{137}Cs است که به طور یکنواخت در بتون توزیع شده است. با فرض اینکه جذب در پوشش ناچیز باشد، آهنگ دز را در بالای مخزن و در فاصله ۱ متری مرکز مقطع فوقانی آن برآورد کنید.

۲۱. يك بمب هسته ای در ارتفاع ۲۰۰ متری از سطح دریا منفجر می شود. با فرض اینکه در این انفجار تعداد 10^{18} شکافت روی دهد و از هر يك از شکافتها تعداد ۶ گاما هر کدام با انرژی 1 MeV و ۳ نوترون آنی هر کدام با انرژی 2 MeV تولید شده باشد، و با چشمپوشی از اثر حفاظتی هوا، دز ناشی از گاماها و نوترون ها را در ارتفاع ۱۵۰۰ متری حساب کنید.

۲۲. يك شیشه کوچک دارو که بدون حفاظ و بدون علامتگذاری است، با محتوای $370 \text{ MBq} (10 \text{ mCi})$ ایزوتوپ ^{24}Na در داخل يك محفظه به جا مانده است. آزمایشگری

بدون اطلاع از وجود این ظرف، ۸ ساعت پشت میز کارش که به فاصله ۲ متر از ظرف محتوی ^{24}Na قرار دارد می‌نشیند. با توجه به طرح تبدیل ^{24}Na در مسئله ۵.۶، مطلوب است:

(الف) آهنگ دز در فاصله ۲ متری از این چشمه.

(ب) دز انباشته در مدت ۸ ساعت پرتوگیری.

۰.۲۳. برای پژوهش درباره طرز کار کلیه از نوعی کلرمرودرپن که با ^{197}Hg یا ^{203}Hg نشاندار شده است استفاده می‌شود. دز کلیه‌ها را برای حالت جذب معمولی، در اثر تزریق $(100\mu\text{Ci})$ 37MBq از هر ایزوتوپ پرتوزا حساب کنید. فرض کنید که رسوب در کلیه‌ها خیلی فوری است و به دنبال آن دفع با نیمه عمر زیست شناختی ۵ و ۶ ساعت صورت می‌گیرد.

اثرات زیست شناختی تابش

تابش یکی از آن عواملی است که بیشترین تحقیقات درمورد اثر بیماری زایی آن به عمل آمده است. اگرچه هنوز نکات زیادی درمورد برهم کنش میان تابش یوننده و ماده زنده وجود دارد که باید روشن شوند، ولی سازوکاری که از طریق آن تابش بر سلولها، مولکولها، و یا اندامهای بدن آسیب می رساند بیشتر از سایر عوامل آسیب رسان محیط شناخته شده است. در واقع، متخصصان فیزیک بهداشت به کمک اطلاعات فراوانی که درباره پاسخ دز در دسترس است توانسته اند سطوح مجاز تابش محیطی را به صورتی تعیین کنند که هم اکنون خطر استفاده از تکنولوژی هسته ای در صنعت، علم، و پزشکی در حد خطر استفاده از سایر تکنولوژیهاست و یا در بسیاری از موارد کمتر از آنهاست.

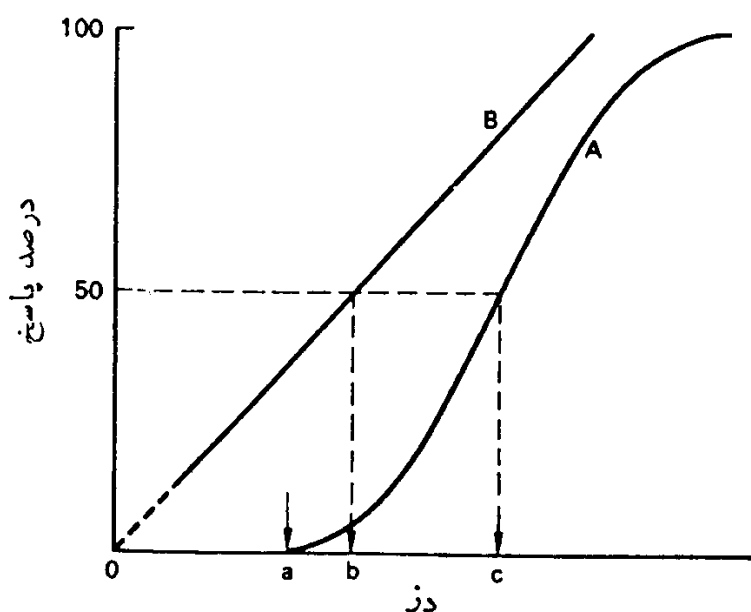
مشخصه های پاسخ دز

اثرات مشاهده شده تابش (یا سایر انواع عوامل زیان آور) را می توان به طور کلی به دو دسته تصادفی و غیر تصادفی تقسیم کرد. اثرات زیست شناختی اغلب در دسته اثرات غیر تصادفی قرار می گیرند. آثار غیر تصادفی با سه ویژگی مشخص می شوند: (۱) قبل از آنکه يك اثر مشخص ظاهر شود، باید مقدار دز از يك مقدار کمینه معین تجاوز کند. (۲) هرچه مقدار دز بیشتر باشد، اثر آن بیشتر و نمایانتر است. (۳) میان عامل زیان آور و اثر مشاهده شده، يك رابطه علی مشخص وجود دارد. به عنوان مثال، برای اینکه در کسی آثار باده گساری ظاهر شود باید بیشتر از حد معینی الکل بیاشامد، و پس از آن اثر الکل به مقداری که فرد

مصرف می‌کند بستگی خواهد داشت. سرانجام اگر رفتار مستانه از او سرزند، می‌توان گفت که بی‌تردید این رفتار ناشی از استعمال الککل است. در این قبیل اثرات غیر تصادفی، هرگاه بزرگی اثر یا فراوانی کسانی که در دز معینی واکنش نشان می‌دهند به صورت تابعی از دز رسم شود، منحنی پاسخ دز A (شکل ۱۰۷) که داپطه کمی میان دز و اثر آن را مشخص می‌کند به دست می‌آید. چون قبل از اینکه هر فرد اثری از خود نشان دهد باید مقدار دز از يك مقدار حداقل بیشتر شود، اثرات غیر تصادفی را اثرات آستانه‌ای نیز می‌گویند.

در هر آزمایشی که برای تعیین منحنی پاسخ دز انجام می‌شود، دز ۵۰٪ که ۵۰٪ حیوانات در مقابل آن واکنش نشان می‌دهند، از لحاظ آماری قابل اعتمادترین دز است. به همین دلیل، غالباً دز ۵۰٪ را به عنوان شاخص تأثیر نسبی يك عامل در بروز يك واکنش خاص به کار می‌برند. هرگاه این واکنش را مرگ زیستی حیوان مورد آزمایش بگیریم، دز ۵۰٪ را دز LD-۵۰ می‌نامند. زمان لازم برای آشکار شدن اثر ماده سمی نیز مهم است که آن را همواره همراه با دز مشخص می‌کنند. از این رو، هرگاه ۵۰٪ از حیوانات در ظرف مدت ۳۰ روز بمیرند، برای تعیین میزان سمی بودن ماده سمی، می‌توانیم مقدار دز را به صورت (روز) LD-۵۰/۳۰ مشخص کنیم. سم‌شناسان از این شاخص دز (روز) LD-۵۰/۳۰ به طور وسیعی استفاده می‌کنند.

اثرات تصادفی همچنانکه از نامشان بر می‌آید، اثراتی هستند که به طور تصادفی و اعم از اینکه شاخص در معرض تابش قرار گرفته باشد یا نباشد، پدیدار می‌شوند. از این رو



شکل ۱۰۷ منحنیهای پاسخ دز. منحنی A شکل مشخصه يك اثر زیست‌شناختی است که دز آستانه را (در نقطه a) نشان می‌دهد. گستردگی منحنی از آستانه نقطه a تا واکنش ۱۰۰٪ را ناشی از تغییر پذیری زیست‌شناختی، حول دز میانگین (نقطه c) که به دز ۵۰٪ معروف است می‌دانند. منحنی B پاسخ خطی با آستانه صفر را نشان می‌دهد و نقطه b نشان‌دهنده دز ۵۰٪ مربوط برای اثر زیست‌شناختی با آستانه صفر است.

این اثرات را، مثل رابطه مستی بالکل یا آفتاب‌زدگی با خورشید، نمی‌توان بدون تردید ناشی از عامل زیان‌آور دانست. از لحاظ حفاظت تابشی، اثرات تصادفی عمده عبارت‌اند از سرطان و اثرات ژنتیکی. نتیجه پرتوگیری یک عامل سرطانی یا یک عامل مولد جهش، افزایش احتمال وقوع آنهاست، که این افزایش احتمال مستقیماً با مقدار دز متناسب است. از این رو، مردم اعم از اینکه در معرض عوامل سرطان‌زا قرار گرفته باشند یا نباشند، مبتلا به آن می‌شوند. اما پرتوگیری یک عامل سرطان‌زا احتمال وقوع آن را افزایش می‌دهد، و هرچه پرتوگیری بیشتر باشد احتمال وقوع هم به نسبت بیشتر می‌شود. با وجود این، مقدار دز پرتوگیری هرچه باشد، به یقین نمی‌توان گفت که سرطان نتیجه پرتوگیری یک عامل سرطان‌زا است. اگر بعد از پرتوگیری یک عامل سرطان‌زا بیماری سرطان بروز کند، ما همچون مورد آفتاب سوختگی و خورشید نمی‌توانیم با قطع و یقین ادعا کنیم که بروز سرطان نتیجه حتمی پرتوگیری عامل سرطان‌زا است. بهترین کاری که ما می‌توانیم بکنیم این است که آن را نتیجه احتمالی پرتوگیری بدانیم. برای مثال، می‌توان به رابطه سرطان ریه و سیگار اشاره کرد، زیرا این نوع سرطان بیشتر در میان کسانی مشاهده می‌شود که سیگار می‌کشند و در میان سیگاریها نیز آنها که بیشتر می‌کشند بیشتر از دیگران مبتلا به این بیماری می‌شوند. با وجود این، بیشتر سیگاریها مبتلا به این بیماری نمی‌شوند. سیگار کشیدن، حتی به صورت افراطی، نمی‌تواند به طور قطع و یقین به سرطان ریه منجر شود، بلکه صرفاً احتمال وقوع آن را بیشتر می‌کند.

هرگاه نمودار فراوانی وقوع یک اثر تصادفی بر حسب مقدار دز رسم شود (منحنی B در شکل ۱۰۷)، به جای منحنی S شکل که مشخصه عوامل وابسته به هر پاسخ آستانه‌ای است، یک رابطه پاسخ‌دز خطی مشاهده می‌شود. هر مدل زیست‌شناختی که با رابطه خطی پاسخ‌دز و با شناخت ما از زیست‌شناسی مولکولی سازگار باشد، پیشگویی می‌کند که با دستکاری اطلاعات ژنتیکی مستقر در یک تک‌مولکول می‌توان بیماری سرطان و یا تحولات ژنتیکی را باعث شد. از این رو، سرطان‌زایی و تولید جهش صرفاً تجلیهای مختلف یک پدیده اساسی مولکولی هستند. بنابراین، با آسیب‌رساندن به اطلاعات انباشته در کروموزومهای یک سلول بدنی، بیماری سرطان تولید می‌شود، و با آسیب‌رساندن به اطلاعات انباشته در کروموزومهای یک سلول زایشی (اسپرم یا تخمک) تحولات ژنتیکی حاصل می‌شود. بر اساس این مدل، هیچگونه آستانه‌ای در آثار تصادفی وجود ندارد و حتی کمترین مقدار عامل سرطان‌زا یا عامل مولد جهش (یعنی یک تک‌مولکول در مورد مواد شیمیایی و یک تک فوتون در مورد پرتوهای X) می‌تواند این اثر را تولید کند. به این دلایل، اثرات تصادفی را اغلب اثرات خطی پاسخ‌دز با آستانه صفر می‌نامند. بر طبق مدل خطی با آستانه صفر، هر نوع افزایش تابش، ولو بسیار اندک، به همان نسبت خطر اثر تصادفی را افزایش می‌دهد.

تأثیر مستقیم

اثرات کلی زیست‌شناختی حاصل از بیش‌پرتوگیری عبارت‌اند از عوارض يك سلسله رویدادهای طولانی و پیچیده که بایونش یا برانگیختگی تعداد نسبتاً کمی از مولکولهای بدن شروع می‌شود. برای مثال دز (روز) LD-۵۰/۳۰ پرتوهای گاما برای انسان تقریباً برابر (۴۰۰ rad) ۴Gy است. چون هر گری با جذب ۱J/kg یا $1.6 \times 10^{18} \text{ eV/g}$ انرژی متناظر است، و چون در حدود ۳۴ eV انرژی برای تولید يك تك یونش مصرف می‌شود، دز کشته‌تعداد

$$\frac{4 \text{ Gy} \times 1.6 \times 10^{18} \text{ eV kg}^{-1} \text{ Gy}^{-1}}{34 \text{ eV/يون}} = 7.35 \times 10^{17}$$

اتم یونیده در هر گرم بافت تولید می‌کند. اگر برآورد کنیم که با یونیده شدن هراتم در حدود ۹ اتم دیگر برانگیخته می‌شوند، آنگاه معلوم می‌شود که هر دز تابشی کشته‌تعداد در حدود 7.35×10^{18} اتم بر کیلوگرم بافت را مستقیماً تحت تأثیر قرار می‌دهد. در بافت نرم در حدود 9.5×10^{25} اتم بر کیلوگرم وجود دارد. بنابراین، کسری از اتمها که مستقیماً تحت تأثیر قرار می‌گیرند برابر است با

$$\frac{7.35 \times 10^{18}}{9.5 \times 10^{25}} \approx 1 \times 10^{-7}$$

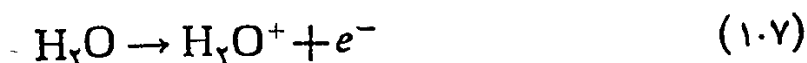
یا تقریباً يك اتم از هر ۱۰ میلیون اتم.

اثرات تابشی که برای آن دز با آستانه صفر در نظر گرفته می‌شود، به صورت تأثیر مستقیم یونشی و برانگیزشی مولکول و تجزیه متعاقب آن است. جهشهای نقطه‌ای که در آن تغییری در محل خاص يك ژن روی می‌دهد، نمونه‌ای از این اثر است. تجزیه شیمیایی ناشی از یونیدگی یا برانگیختگی اتم در مولکول DNA از انتقال اطلاعات اصلی موجود در ژن به نسل بعد جلوگیری می‌کند. این جهشهای نقطه‌ای ممکن است در سلولهای زایشی روی دهند و در نتیجه جهش نقطه‌ای به نسل بعد منتقل شود و یا در سلولهای بدنی ایجاد شوند و جهش نقطه‌ای به سلول بعدی برسد. چون این جهشهای نقطه‌ای به سلولهای نسلهای متوالی انتقال می‌یابند (به استثنای مورد بسیار بعیدی که در آن ژن جهش کرده یکبار دیگر جهش می‌کند)، واضح است که برای آن دسته از اثرات زیست‌شناختی تابش که از جهشهای نقطه‌ای حاصل می‌شوند، دز تابش جمع‌پذیر است، یعنی هر دز کوچکی ممکن است تغییری در بار ژن ایجاد کند که این تغییرات به‌طور پیوسته منتقل می‌شوند. اما هنگامی که این پدیده‌ها را از لحاظ کمی بررسی می‌کنیم، باید احتمال مشاهده تحولات ژنی را در میان فرزندان فرد تابش دیده از نظر دور نداریم. در دزهای تابشی تا حدود 250 mGy (۲۵ rad)، بزرگی اثر که با فراوانی جهشهای ژنی اندازه‌گیری می‌شود، با مقدار دز متناسب است. برای دزهای کمتر از حدود ۲۵۰ MGy، احتمال جهش به قدری کم است که برای آشکارسازی جهشی

که بتوان آن‌را به تابش نسبت داد باید تعداد بسیار زیادی حیوان را مورد آزمایش قرارداد. به همین دلیل است که درباره تغییرات ژنی در گستره از صفر تا حدود ۲۵۰ mGy داده‌های تجربی معتبری وجود ندارد.

تأثیر غیرمستقیم

آثار مستقیم تابش که به صورت یونش و برانگیختگی است شکل خاصی ندارد و در هر نقطه‌ای از بدن می‌تواند ظاهر شود. وقتی اتم مستقیماً تحت تأثیر تابش قرار گرفته متعلق به مولکول پروتئین یا اسید نوکلئیک باشد، در اثر آسیب دیدگی مولکول ممکن است عوارض خاصی بروز کند. اما قسمت عمده بدن آب است و بنا بر این قسمت اعظم تأثیر مستقیم تابش بر آب خواهد بود. نتیجه این جذب انرژی توسط آب تولید رادیکال‌های آزاد کاملاً واکنش پذیر است که از لحاظ شیمیایی سمی هستند، و ممکن است سمیت خود را به مولکول‌های دیگر منتقل کنند. هنگامی که آب خالص تحت تابش قرار می‌گیرد، خواهیم داشت



که یون مثبت بلافاصله طبق معادله زیر تجزیه می‌شود



ولی الکترون را یکی از مولکول‌های خنثای آب جذب می‌کند



و رادیکال حاصل مستقیماً به صورت زیر تجزیه خواهد شد



یون‌های H^+ و OH^- نتیجه‌ای را به دنبال ندارند، زیرا تمامی مایعات بدن از پیش حاوی مقادیر زیادی از این دو یون هستند. رادیکال‌های آزاد H و OH ممکن است با رادیکال‌های مشابه خود ترکیب شوند و یا با سایر مولکول‌های موجود در محلول ایجاد واکنش کنند. محتمل‌ترین سرنوشت این رادیکال‌ها را عمدتاً مقدار LET تابش تعیین می‌کند. در حالتی که آهنگ انتقال خطی انرژی (LET) زیاد باشد، نظیر آنچه هنگام عبور ذره آلفا یا ذره دیگری که یونش ویژه آن زیاد است پیش می‌آید، رادیکال‌های آزاد OH به قدری نزدیک به هم تشکیل می‌شوند که قبل از باز ترکیب با رادیکال‌های آزاد H می‌توانند با یکدیگر ترکیب شوند و پراکسید هیدروژن تولید کنند



۱. رادیکال آزاد بخشی از یک مولکول یا یک عنصر است که دارای الکترون تزیوچ نشده است.

ولی از ترکیب رادیکالهای آزاد H گاز هیدروژن تشکیل می‌شود. در حالی که محصولات واکنشهای اولیه معادله‌های (۱۰۷) تا (۴۰۷) طول عمر کوتاهی، از مرتبه میکروثانیه، دارند، پراکسید هیدروژن ترکیب نسبتاً پایداری است و طول عمر آن به قدری زیاد است که می‌تواند تا نقطاتی به فاصله کاملاً دور از چشمه پخش شود. از این رو پراکسید هیدروژن که يك عامل اکسنده خيلي قوي است مستقیماً می‌تواند به مولکولها یا سلولهایی که در معرض تابش نبوده‌اند آسیب برساند. هرگاه آب تابش دیده اکسیژن محلول داشته باشد، رادیکالهای هیدروژن آزاد می‌توانند پس از ترکیب با اکسیژن، رادیکال هیدروپراکسید تشکیل دهند که واکنش پذیر نیست و بنا بر این طول عمر آن از رادیکال OH بلندتر است



این پایداری بیشتر به رادیکال هیدروپراکسید امکان می‌دهد که با رادیکال آزاد هیدروژن ترکیب شود و پراکسید هیدروژن تشکیل دهد که در نتیجه آن خاصیت سمی بودن تابش افزایش می‌یابد.

از این رو، تابش بادوسازوکار متفاوت اثرات زیست‌شناختی تولید می‌کند: یکی به طور مستقیم با تجزیه شیمیایی مولکولها در اثر یونش و برانگیختگی آنها، و دیگری به طور غیر مستقیم با تولید رادیکالهای آزاد و پراکسید هیدروژن در آب موجود در شاره‌های بدن. اما، ماهوز در باره سلسله رویدادهایی که بین اثرات اولیه تابش که در بالا توصیف شد، و اثرات کلی زیست‌شناختی که ممکن است مدتها بعد از پرتوگیری روی دهند اطلاع چندانی نداریم.

اثرات تابش

در فیزیک بهداشت، مانند سایر رشته‌های کنترل محیط و عوامل زیان آور، دو نوع پرتوگیری مورد نظر است: (۱) پرتوگیری تصادفی با دز تابش زیاد و در مدت زمان بسیار کوتاه که معمولاً پرتوگیری حاد نامیده می‌شود و می‌تواند به فاصله خیلی کوتاهی پس از پرتوگیری آثار زیست‌شناختی تولید کند. (۲) بیش پرتوگیری در از مدت با دز کم که اغلب آن را پرتوگیری پیوسته یا مزمن می‌نامند. نتایج این بیش پرتوگیری که ممکن است در اثر اقدامات حفاظتی غیر صحیح و یا ناکافی باشد، ممکن است سالها پس از پرتوگیری ظاهر شود.

اثرات حاد

بیش پرتوگیری تابش حاد تمام بدن بر تمام اندامها و دستگاههای بدن اثر می‌گذارد. اما چون همه اندامها و دستگاههای بدن حساسیت یکسانی در برابر تابش ندارند، نحوه واکنش یا سندروم بیماری در هر بیش پرتوگیری به مقدار دز دریافتی بستگی دارد. به منظور ساده شدن طبقه‌بندی، سندروم تابش حاد را بر حسب شدت و ضعف آن به سه دسته تقسیم می‌کنند

که عبارت‌اند از (۱) سندروم خونسازی، (۲) سندروم معده‌ای - روده‌ای، (۳) سندروم دستگاه عصبی مرکزی. بعضی اثرات مشترك در تمام این سه گروه عبارت‌اند از:

(الف) تهوع و استفراغ

(ب) کسالت و خستگی

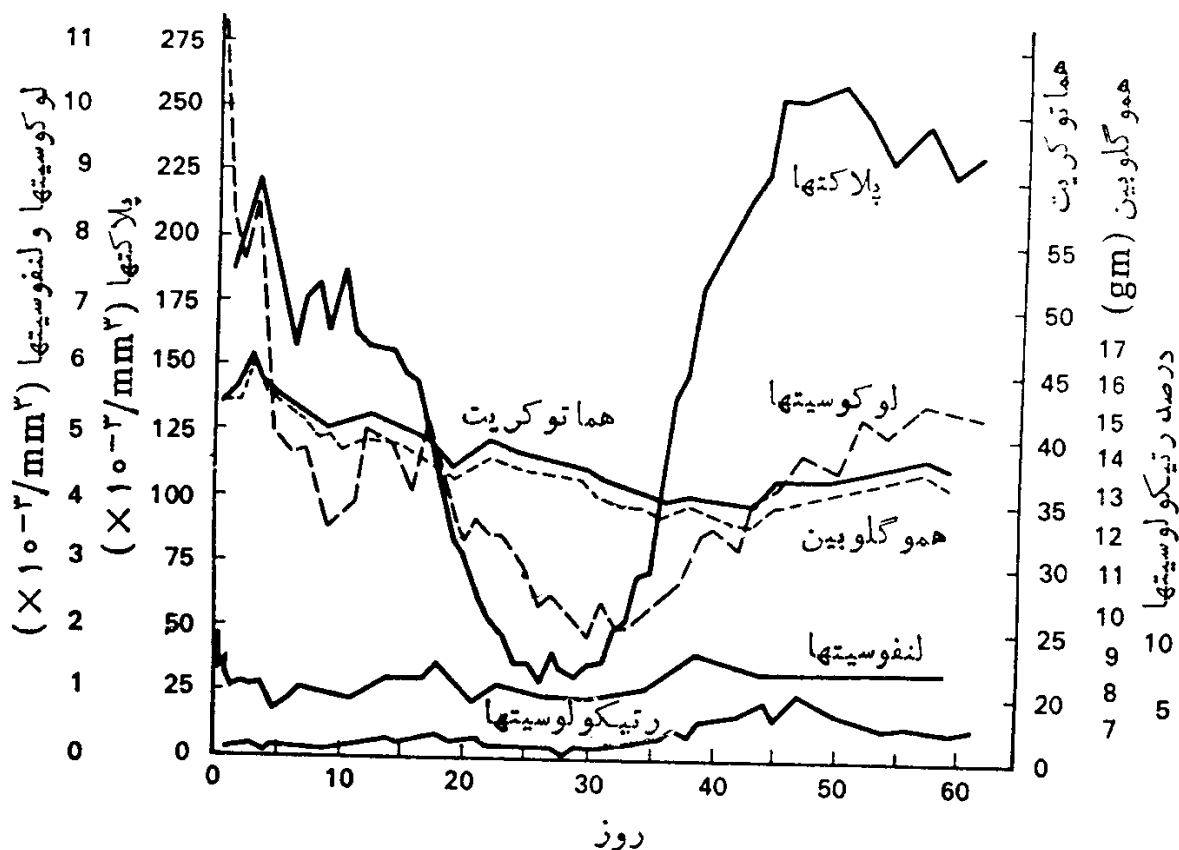
(ج) بالا رفتن دمای بدن

(د) تغییرات درخون

تغییرات درخون

در میان اثرات مشترك چهار گانه‌ای که در بالا ذکر شد، تغییرات تعداد گلبول‌های خون را می‌توان حساسترین شاخصهای زیست‌شناختی بیش‌پرتوگیری حاد دانست. این تغییرات حتی در موارد پرتوگیری ملایم نیز که به هیپچیک از سندرومهای بالا منجر نمی‌شود دیده می‌شود. هر چند تغییرات خون در دزهای کمتر از 14 rad (14 mGy) پرتوگاما نیز در افراد مشاهده شده است، ولی این تغییرات معمولاً دزهای 250 تا 500 mGy (25 تا 50 rad) پدیدار نمی‌شوند. در دزهای بیشتر از 500 mGy ایجاد تغییرات درخون حتمی است.

در حدود 55% از حجم خون را شاره‌ای به نام پلاسمای خون و در حدود 45% دیگر را گلبول‌های سفید، به نام لوکوسیت، و گلبول‌های سرخ، به نام اریتروسیت، و پلاکتها یا ترومبوسیت تشکیل می‌دهند. گلبول‌های سفید خون که تعدادشان در هر میلی‌متر مکعب خون اشخاص بالغ در حدود 7000 است، دفاع اصلی بدن را در برابر تهاجم باکتریها بر عهده دارند. هر عفونتی در هر نقطه‌ای از بدن باعث تولید لوکوسیتها می‌شود تا با موجودات عامل عفونت مبارزه کنند. انواع عمده لوکوسیتها عبارت‌اند از گرانولوسیت و لنفوسیت، که هر کدام در مبارزه علیه عفونت نقش تخصصی معینی دارند. در شرایط عادی نسبت این اجزاء تقریباً ثابت می‌ماند، یعنی 70 تا 75 درصد گلبول‌های سفید را گرانولوسیتها 25 تا 30 درصد دیگر را لنفوسیتها تشکیل می‌دهند. گرانولوسیتها که در مغز استخوان ساخته می‌شوند تا 3 روز درخون جریان دارد و سپس می‌میرند و منهدم می‌شوند، ولی لنفوسیتها که در غده‌های لنفی و طحال تولید می‌شوند 24 ساعت درخون زنده می‌مانند. تعداد گلبول‌های سرخ که در واقع فراوانترین عنصر خون است در هر میلی‌متر مکعب خون به حدود 5 میلیون می‌رسد. وظیفه اصلی این گلبولها انتقال اکسیژن از ریه‌ها به سلولهای بدن و نیز حمل پسماند دی‌اکسید کربن از سلولهای بدن به ریه است. اریتروسیتها در مغز استخوان ساخته می‌شوند و تقریباً 90 تا 120 روز در گردش خون زنده می‌مانند، ولی وظیفه پلاکتها یا ترومبوسیتها که تعدادشان در هر میلی‌متر مکعب خون تقریباً بین 200000 تا 400000 است انعقاد خون است. پلاکتها در مغز استخوان تولید می‌شوند و عمر مؤثر آنها در حدود 8 تا 12 روز است. بعد از پرتوگیری حاد تابش در گستره زیر حد مهلك، يك افزایش موقتی خیلی زیاد در تعداد گرانولوسیتها مشاهده می‌شود. این افزایش تند در ظرف يك روز کاهش می‌یابد و



شکل ۲.۷ نمودار خون‌شناسی بیش‌پرتوگیری تابش. مقادیر متوسط مربوط به ۵ بیمار که طی يك حادثهٔ بحرانیت درنیر و گاه ۱۲-۷ در اوك ریج در ژوئن ۱۹۵۸ تخمیناً در معرض ۲۳۶ تا ۳۶۵ راد دز قرار گرفته‌اند.

چند هفته بعد از پرتوگیری به يك حداقل می‌رسد. سپس طی يك دورهٔ چند هفته‌ای یا چند ماهه به حالت عادی باز می‌گردد. تعداد لنفوسيتها پس از پرتوگیری بسرعت کم می‌شود و چندین ماه در همین حالت باقی می‌ماند. برعکس گلبولهای سفید که خیلی سریع در مقابل بیش‌پرتوگیری تابش واکنش نشان می‌دهند، تعداد گلبولهای سرخ تا حدود يك هفته بعد از بیش‌پرتوگیری تغییر نمی‌کند. سپس تعداد گلبولهای سرخ کاهش می‌یابد و در فاصلهٔ ۱ تا ۲ ماه پس از پرتوگیری به يك حد کمینه می‌رسد و بعد از آن طی يك دورهٔ چند هفته‌ای به تدریج به حالت عادی باز می‌گردد. تعداد پلاكتها به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد و در حدود يك ماه پس از پرتوگیری به يك حد کمینه می‌رسد، و سپس به‌کندی و طی چندین ماه به حالت عادی باز می‌گردد. در تمام این موارد، میزان تغییرات خون و نیز آهنگ تغییرات، تابع دز تابش است. شکل ۲.۷ نمودار آهنگ و میزان تغییرات خون را برای مقادیر مختلف دز پرتوگیری نشان می‌دهد.

سندروم خونسازی

سندروم مربوط به خونسازی بعد از يك دز گاما به مقدار تقریبی ۲ Gy (با ۲۰۰ rad) پدیدار می‌شود. این بیماری با کاهش یا قطع فعالیت مغز استخوان، و پیامدهای زیست‌شناختی

آن مشخص می‌شود. بروز بیماری تا حدی ناساگهانی است و اغلب چندساعت پس از بیش‌پرتوگیری با تهوع و استفراغ پدیدار می‌شود. بیمار احساس کسالت و خستگی می‌کند اما ظاهراً شدت آن به مقدار دز مصرفی بستگی ندارد. ریزش مو که اغلب اتفاق می‌افتد، در هفته دوم و سوم پس از پرتوگیری مشاهده می‌شود. مرگ بیمار ممکن است یکی دو ماه بعد از پرتوگیری اتفاق بیفتد. البته عوارض و ضایعات عمده‌ای که در این مورد مشاهده شده است به مغز استخوان و خون مربوط می‌شود: در دز 2Gy کاهش مغز استخوان؛ و در دز حدود $4\text{ تا }6\text{Gy}$ گری (۴۰۰ تا ۶۰۰ راد) قطع کامل آن گزارش شده است. اما در این موارد اگر بیمار بتواند از عوارض فیزیولوژیک نبود مغز استخوان جان سالم به‌در ببرد، مغز استخوان مجدداً به‌طور خود به‌خود رشد خواهد کرد. پرتوگیری در حدود 7Gy یا بیشتر منجر به قطع برگشت‌ناپذیر مغز استخوان می‌شود. دز (روز) $LD_{50}/30$ در بیشتر پستانداران و از جمله انسان در این گستره قرار می‌گیرد. با بررسی وضعیت خون می‌توان تغییرات ایجاد شده در خون را، که در بالا به آنها اشاره شد، مشاهده کرد و میزان تغییر را به‌طور تقریبی به دز نسبت داد. شمارش بسیار کم لنفوسیتها، مثلاً ۵۰۰ عدد در میلی‌متر مکعب یا کمتر، در یکی دو روز بعد از پرتوگیری حاکی از وقوع احتمالی مرگ است.

سندروم معده‌ای-روده‌ای

این بیماری به دنبال یک دریافت دز تمام بدن تقریباً به میزان 10Gy یا بیشتر عارض می‌شود و ناشی از ریزش اپتیلوم یا بافت پوششی روده است. کلیه علائم و نشانه‌های بیماری خونسازی به‌اضافه تهوع، استفراغ، واسهال شدید، خیلی زود و یا بلافاصله پس از پرتوگیری در بیمار ظاهر می‌شود و به احتمال زیاد مرگ او در فاصله ۱ تا ۲ هفته روی خواهد داد.

سندروم دستگاه عصبی مرکزی

هرگاه دز گامای تمام بدن از حدود 20Gy (2000rad) تجاوز کند، به دستگاه عصبی مرکزی و تمامی دیگر دستگاه‌های بدن آسیب می‌رسد. در چنین مواردی چند دقیقه پس از پرتوگیری بیمار بیهوش می‌شود و چند ساعت یا چند روز بعد می‌میرد. سرعت و شدت بیهوشی مستقیماً به دز بستگی دارد. در یک مورد، تپی ۲۰۰ میکروثانیه‌ای از پرتوهای گاما و نوترون، یک دزمیانگین تمام بدن در حدود 44Gy (4400rad) تولید کرد. قربانی حادثه ظرف مدت ۳۰ ثانیه دچار عدم تعادل اختلال شد و بعد از ۱۰ دقیقه به حالت بیهوشی و شوک فرو رفت. سی و پنج دقیقه بعد از حادثه، آزمایش مدفوع از وضعیت اسهال شدیداً آبکی نشان داد که جریان شدیدی از سیال در جهاز هاضمه او به وجود آمده است. بیمار، به کمک معالجات شدید، فقط تا ۳۴٫۵ ساعت بعد از حادثه زنده ماند.

سایر اثرات حاد

در اینجا لازم است به چند اثر متوسط دیگر از بیش‌پرتوگیری حاد اشاره کنیم. پوست به

دلیل موقعیت پوششی، بیشتر از اکثر بافتهای دیگر در معرض پرتوگیری (مخصوصاً پرتوهای کم انرژی x و پرتوهای بتا) قرار می گیرد. پرتوگیری حدود $(300 R)$ 77 mC/kg از پرتوهای کم انرژی x (در آزمایشهای تشخیص پزشکی) منجر به التهاب پوست می شود و دزهای بیشتر از آن ممکن است موجب اختلال در رنگدانه های پوست، ریزش مو، تاول زدگی، نکروز، و جراحت شود. به همین دلیل در سالهای اولیه قرن بیستم، رادیولوژیست هایی که با این قبیل پرتوها سرو کار داشتند به عوارضی نظیر ورم دست و صورت مبتلا شدند.

غدد تناسلی نسبت به پرتوها حساسیت خاصی دارند، به گونه ای که فقط يك دز (30 rad) 300 mGy کافی است که بیضه های مردان را به طور موقت عقیم کند، و همین طور دزی برابر با (300 rad) 3 Gy موجب عقیمی موقت تخمدانهای بانوان می شود. بدیهی است دزهای بیشتر، زمان عقیمی موقت را افزایش می دهد. مثلاً مردی که غده هایش کمتر از (440 rad) 44 Gy پرتوگیری کرده بود، برای يك دوره چندین ساله عقیم شده بود. عقیمی موقت ناشی از پرتوگیری در بانوان به صورت توقف قاعدگی ظاهر می شود که بسته به مقدار دز برای يك دوره يك یا چند ماهه طول می کشد. اختلال در دوره قاعدگی که نشانه تغییر کارکرد غدد تناسلی است، ممکن است در اثر پرتوگیری موضعی تخمدانها با دزهایی کمتر از دز لازم برای عقیمی موقت نیز حاصل شود.

چشم نیز در مقابل پرتو حساس است، به گونه ای که دز موضعی حدود چند گری ممکن است ورم ملتحمه و التهاب قرنیه ایجاد کند.

اثرات تأخیری

آثار تأخیری تابش ممکن است ناشی از يك بیش پرتوگیری منفرد خیلی زیاد یا بیش پرتوگیریهای در حد کم و مداوم باشد.

بیش پرتوگیری مداوم می تواند ناشی از پرتوگیری از میدانهای تابشی خارجی باشد یا در نتیجه تنفس یا بلع ایزوتوپ پرتوزایی باشد که از طریق واکنش با پروتئین بافت در بدن تثبیت می شود، یا به دلیل همانندی شیمیایی ایزوتوپ با محصولات سوخت و ساز (متابولیت) معمولی به طور منظم در بعضی بافتها و اندامها جذب می شوند. در هر حال، ایزوتوپ پرتوزای رسوب یافته در بدن ممکن است برای يك مدت زمان طولانی به تابش دهی به بافت ادامه دهد. در اینجا باید خاطر نشان کرد که صفات «حاد» و «مزمن» که سم شناسان معمولاً آنها را به ترتیب برای توصیف پرتوگیری منفرد و پرتوگیری مداوم به کار می برند، مستقیماً برای ایزوتوپهای پرتوزای تنفس شده یا بلعیده شده به کار نمی روند، زیرا هر پرتوگیری منفرد یا «حاد»ی ممکن است به پرتوگیری مداوم یا «مزمن» بافتی منجر شود که ماده پرتوزا در آن رسوب کرده است. در میان اثرات تأخیری بیش پرتوگیری بیش از همه سرطان، اثرات ژنتیکی، کوتاهی طول عمر، و آب مروارید مورد نظر ماست.

سرطان

دلایل مستند و قطعی در دست است که دریافت دز تابش گاما به میزان 1 Gy (100 rad) یا بیشتر، وقتی با سرعت زیاد به بدن برسد، اثرات سرطان‌زایی دارد. هر چند هر بافت یا اندامی ممکن است بعد از بیش‌تر پرتوگیری به‌طور غیرعادی رشد کند، اما ظاهراً بعضی بافتها و اندامها از این لحاظ حساستر از بافتها یا اندامهای دیگر هستند. سرطان ناشی از تابش اغلب در دستگاه تولید خون، تیروئید، استخوان، و پوست مشاهده شده‌است. در تمام این موارد زمان تولید غده سرطان در انسان نسبتاً طولانی است و به ۵ تا ۲۰ سال پس از پرتوگیری می‌رسد. سرطان پوست اولین نوع بدخیم سرطانی بود که در تابش پرتو x ظاهر شد. اولین کسانی که با پرتوهای x کار می‌کردند، از جمله پزشکان و فیزیكدانان، خیلی بیشتر از آنچه بتوان حمل بر تصادف کرد به سرطان پوست مبتلا می‌شدند. بیشتر از ۱۰۰ مورد سرطان پوست ناشی از تابش در میان این افراد گزارش شده‌است. پزشکی که در اوایل سالهای ۱۹۰۰ میلادی با پرتوهای ایکس سروکار داشته اثر تحریک‌کننده این پرتوها را توصیف کرده‌است. وی در تحقیقات خود گزارش کرده‌است که التهاب و خارش پوست رفته رفته به‌لک و سپس شدید، زخم، رشد غیرعادی بافتها، و سرانجام مرگ در اثر پیشرفت سرطان منجر شده‌است، و تمام این فرایندها از ابتدا تا به انتها در حدود ۹ سال طول کشیده‌است. از طرف دیگر قبل از اینکه خواص سرطان‌زایی پرتوهای ایکس به‌خوبی شناخته شود، اغلب دندانپزشکان به سرطان انگشت مبتلا می‌شدند، زیرا برای عکسبرداری با پرتو x از دندان بیماران، غالباً فیلمهای کوچک را با انگشت روی دندان بیمار نگه می‌داشتند. اطلاعات مربوط به سرطان‌زایی دزهای کم تابش، ضدونقیض و غیرقطعی است. بنا بر این در مواردی که تعیین استانداردهای ایمنی تابش مورد نظر است، صحیحتر این است که با برونمایی از موارد با دز بالا خطرات احتمالی ناشی از تابش با دز کم را تخمین بزنیم. در مدل خطی با آستانه صفری که این برونمایی بر آن مبتنی است، فرض می‌شود که حداکثر در حدود ۱۲۵ مورد اضافی مرگ ناشی از سرطان در میان هر یک میلیون نفری که دز معادل تمام بدن ۱۰ میلی‌سیورت (1 rem) دریافت می‌کنند اتفاق می‌افتد. (میلی‌سیورت و رم را در همین فصل توضیح می‌دهیم.) برای اینکه موارد مرگ اضافی را که مبنای برونمایی است خوب حس کنیم، باید در نظر داشته باشیم که معمولاً از هر یک میلیون نفر ۲۰۶۰۰۰ نفر در اثر ابتلا به سرطان تلف می‌شوند.

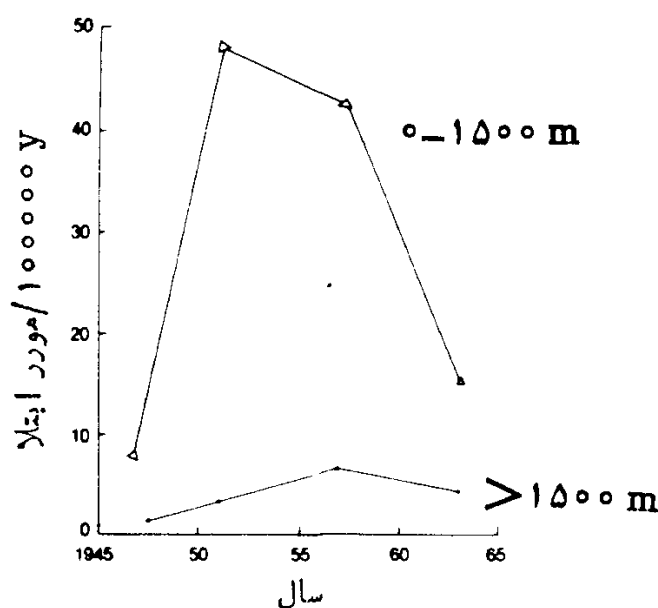
سرطان خون

سرطان خون، مخصوصاً لوسمی میلوئید حاد، و تا حد کمتری لوسمی میلوئید مزمن یا لوسمی لنفوسیت حاد، از محتملترین اشکال بدخیمی ناشی از بیش‌تر پرتوگیری تابش تمام بدن هستند. ظاهراً لوسمی لنفوسیت مزمن ناشی از پرتوگیری تابش نیست. قبل از اینکه روشهای ایمنی فیزیك بهداشت متداول شود، آهنگ ابتلا به سرطان خون در میان متخصصان پرتوشناسی و پزشکانی که با پرتوهای ایکس کار می‌کردند خیلی بیشتر از دیگر همکاران آنها

بود که با این پرتوها سروکاری نداشتند. در میان متخصصان پرتوشناسی امریکا، دزهای وابسته به آهنگ افزایش سرطان خون در سال در حدود 1Gy (100 rad) بود. بر اثر اتخاذ تدابیر بهداشتی، تفاوت آهنگ ابتلا به لوسمی در میان رادیولوژیستها و سایر پزشکان به طور پیوسته کاهش یافته است. در میان بیماران مبتلا به اسپوندیلیت آنکیلوز (یا آرتريت روماتوئید مفاصل کوچک استخوان) که با پرتوهای x مداوم می شدند نیز ابتلا به سرطان خون زیاد مشاهده می شد.

پس از بمباران هسته ای ژاپن، معلوم شد که ابتلا به سرطان خون در بین کسانی که در محدوده ۱۵۰۰ متری مرکز انفجار بودند بیشتر از کسانی است که دورتر از ۱۵۰۰ متر قرار داشتند (شکل ۳۰۷). نخستین موارد ابتلا به سرطان خون سه سال پس از بمباران در میان بازماندگان مشاهده شد و آهنگ آن تا ۴ سال بعد به طور پیوسته افزایش یافت. از آن زمان به بعد این آهنگ به طور یکنواخت روبه کاهش است. در ناکازاکی، در اوایل دهه ۱۹۷۰ آهنگ ابتلا به سرطان خون به حد معمولی رسید، ولی در هیروشیما هنوز هم این آهنگ در میان بازماندگان پرتودیده اندکسی بیشتر از بقیه جمعیت ژاپن است.

پرسشهای مربوط به لوسمی زایی دزهای کم تابش و وجود يك دز آستانه غیر صفر برای ابتلا به لوسمی هنوز بدون پاسخ مانده و موضوع بحث و جدل است. در هیروشیما و ناکازاکی يك رابطه مشخص بین دز و پاسخ مشاهده شده است. کمترین دز ابتلا به لوسمی در هیروشیما در گستره از ۲ رده تا ۴ رده گری (۲۰ تا ۴۰ راد) بوده است، و در ناکازاکی افزایش ابتلا به این بیماری در میان افرادی که تحت تأثیر کمتر از 1Gy (100 rad) قرار گرفته بودند مشاهده نشده است. اختلاف بارزی که در این دو شهر دیده می شود



شکل ۳۰۷ نمودار آهنگ ابتلا به سرطان خون در میان بازماندگان بمباران هسته ای هیروشیما و ناکازاکی.

ناشی از مقدار نسبتاً زیاد نوترون موجود در دز تابش هیروشیما، و نبود تابش نوترون (کمتر از ۲٪ دز کل) در ناکازاکی است. هیچ نشانه‌ای از ابتلا به لوسمی در میان کسانی که در دحم مادر در معرض تابش حاصل از بمبها قرار گرفته بودند دیده نشده است. اما تحقیقاتی که در این زمینه در انگلستان انجام شد نشان می‌دهد کودکانی که هنگام عکسبرداری در دحم مادر در معرض پرتو ایکس قرار می‌گیرند بیشتر از آنهایی که در معرض پرتو ایکس قرار نمی‌گیرند به سرطان خون مبتلا می‌شوند. براساس این تحقیقات چنین استنباط شد که پرتوگیری به میزان اندک ($1-5 \text{ rad}$) $10-50 \text{ mGy}$ پرتو ایکس هم ممکن است باعث تولید سرطان خون شود. چون برآورد می‌شود که جنین درون رحم در برابر تابش در حدود ۲ تا ۱۰ بار حساستر از نوزاد متولد شده است، می‌توان گفت که براساس این داده‌ها دز آستانه ابتلا به سرطان خون در گستره $(0.1-2.5 \text{ rad})$ $1-25 \text{ mGy}$ قرار دارد. از سوی دیگر، در مواردی که پرتو دهی به دحم به خاطر اندازه‌گیری ابعاد لگن خاصره انجام شده بود و به منظور تشخیص پزشکی، هیچ اثر سوئی از تابش مشاهده نشده است. تصور می‌رود که اختلاف بین این دو نوع مشاهده متباین مربوط به عوامل پزشکی باشد که استفاده از پرتوهای ایکس تشخیصی را ایجاب می‌کنند. این نتیجه‌گیری با نتایج سایر مطالعاتی که بنا بر آنها يك دز آستانه برای ابتلا به لوسمی وجود دارد، و مقدار آن برای پرتوگیری دحم در گستره $(10-50 \text{ rad})$ $10-50 \text{ Gy}$ قرار می‌گیرد، سازگار است. از این رو، با آنکه بر اساس اطلاعات موجود تابش یوننده در دزهای زیاد باعث ابتلا به سرطان خون می‌شود، نتایج حاصل از تحقیقات درباره سرطان‌زایی دزهای کم هنوز هم قطعی نیست و موضوع بحث و جدل است. اما چون نتایج به دست آمده در مورد دزهای کم تابش ضد و نقیض‌اند، معقول این است که قبول کنیم دزهای سطح پایین بسیاری از عملیات تشخیص پزشکی پرتوهای x و دزهای ناشی از پرتوگیری حرفه‌ای در محدوده توصیه شده و تابشهای طبیعی، اثر سرطان‌زایی اندکی دارند، و احتمال ابتلا به بیماری در اثر تابشهای حد پایین خیلی ضعیف است.

سرطان استخوان

از دیدگاه تاریخی، سرطان استخوان و ریه در اشخاصی که حرفه آنها کار با تابش بوده است از این لحاظ که بر سرطان‌زایی ایزوتوپهای رسوب یافته در داخل بدن تأکید می‌کنند بسیار مهم‌اند. اگرچه خواص سرطان‌زایی رادیم ظرف چند سال بعد از کشف آن توسط پیر و ماری کوری معلوم شد، ولی کوششهای انجام شده برای محافظت مردم از اثرات زیانبخش آن اندک یا ناچیز بود. یکی از نخستین کاربردهای صنعتی رادیم استفاده از آن در تهیه شبرنگها بود، زیرا هنگامی که پودر رادیم با بلور ZnS مخلوط می‌شود، بلورها بر اثر جذب انرژی از ذرات آلفای گسیل شده از رادیم تابش می‌شوند. بزودی از این خاصیت برای ساختن بعضی ابزارها و صفحه‌های ساعت‌های مچی استفاده کردند. بعد از اینکه جنگ جهانی دوم آغاز شد این کاربرد رادیم گسترش وسیعی پیدا کرد. دختران،

برای زدن رنگ شبنما به روی صفحات ساعت، غالباً قلم موها را میان لبهایشان می گرفتند. در نتیجه هر بار که قلم مو را بین دو لب می گرفتند مقدار رادیم و مزوتوریم (که محصولی از واپاشی توریم است) را به طور ناخودآگاه می بلعیدند. در اوایل دهه ۱۹۲۰ میلادی چند تن از دوشیزگانی که برای رنگ زدن صفحات ساعت استخدام شده بودند، در اثر کم خونی همراه با فساد استخوانهای فك جان سپردند. دندانپزشکی که یکی دیگر از این دوشیزگان را مداوا می کرد حدس زد که احتمالاً بیماری او باید ناشی از عوارض شغلش باشد. پس از بررسی موارد بیشتری از آسیب استخوانی، از جمله سارکوم استخوانی، به طور قطع و یقین معلوم شد که رادیم عامل اصلی این عوارض بوده است. تحقیقات بعدی در مورد کسانی که کار رنگ زنی روی صفحات ساعت انجام داده بودند و بیمارانی که بدانها رادیم تزریق شده بود این نتیجه گیری به طور کامل تأیید شد. در این تحقیقات همچنین معلوم شد که رادیم قویاً میل به ماندن در استخوان را دارد، به طوری که ۲۵ تا ۳۵ سال بعد از پرتوگیری هنوز مقادیر قابل توجهی رسوب رادیم در استخوان یافت می شد. در طی آزمایشهای دیگری که روی حیوانات آزمایشگاهی انجام شد، تعدادی ایزوتوپ پرتوزای «استخوان-خواه» کشف شد که ضایعاتی شبیه به رادیم تولید می کردند. استرونیسم و باریم پرتوزا و همچنین رادیم از لحاظ شیمیایی شبیه به کلسیم هستند و بنا بر این با ساختار معدنی استخوان و اپی فیز ترکیب می شوند. محصولات شکافت استخوان-خواه از نوع عناصر خاکی کمیاب نظیر ^{144}Ce - ^{144}Pr نیز تمایل به انباشتگی در ساختار معدنی دارند. معلوم شده است که عنصر فوق العاده سمی پلوتونیم در ضریع، ضریع داخلی، و ترابکول استخوان انباشته می شود. کلیه مواد استخوان-خواه را خیلی سمی می دانند، زیرا این مواد می توانند به بافت خونساز مغز استخوان که در برابر پرتوها حساسیت دارد آسیب وارد کنند. تمام مواد استخوان-خواه، در صورتی که به مقدار کافی به حیوانات آزمایشگاهی تزریق شوند، سرطان استخوان تولید می کنند.

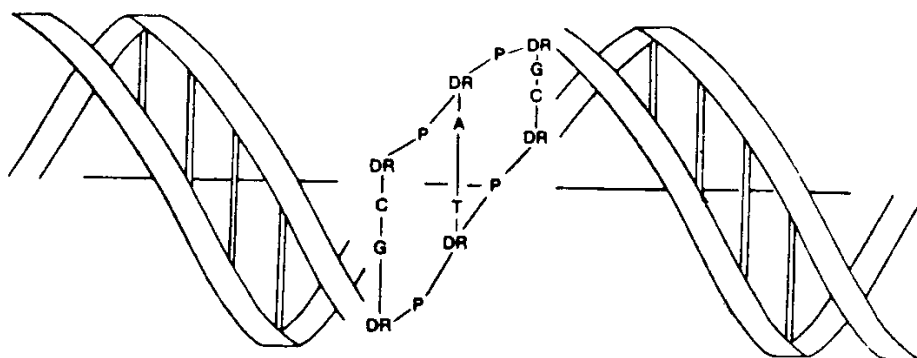
سرطان ریه

استعداد ریه برای ابتلا به سرطان در اثر تابش از مدت‌ها پیش شناخته شده است. در معادن نواحی جوشیمشال و شنیرگ که از لحاظ وجود پچبلند (سنگ معدن حاوی رادیم) و همچنین سایر سنگهای معدن مشکوک به سرطان زایی بسیار غنی هستند، به دلیل وجود رادیم در زمین، گاز رادون (که دخترهسته پرتوزای رادیم است) تولید می شود و پس از متصاعد شدن از زمین در هوای مناطق معدنی پخش می شود. چون رادون به نوبه خود پرتوزاست، نوادگان پرتوزای دیگری تولید می کند (جدول ۳.۴) و در نتیجه مقدار زیادی پرتوزایی ناشی از محصولات دختر رادون نیز اضافه می شود. تراکم جوی رادون در هوای این دومرکز معدنی اروپا در حدود $(3 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/ml})$ یا $1 \times 10^5 \text{Bq/m}^3$ تشخیص داده شده است که باید به این مقدار فعالیتهای دخترهسته‌ها را، که عمدتاً RaA و RaC هستند، نیز افزود. بسیاری از کارگران این معادن در طی ۱۵ سال پس از شروع

کار به سرطان نایژه مبتلا شدند. در آزمایشگاه با استفاده از موشهایی که روزانه در معرض تراکم جوی $(10^{-3} \mu\text{Ci/ml})$ 37MBq/m^3 قرار می‌گرفتند، سرطان‌زایی ناشی از استنشاق رادون مورد تأیید واقع شد. سپس در مطالعات آزمایشگاهی دیگر در مورد رسوب مواد پرتوزا در ریه که از طریق تزریق داخلی در نای، یا از راه استنشاق، یا وارد کردن مهره‌های شیشه‌ای محتوی ^{90}Sr به داخل پرده ریه، یا کاشتن استوانه کوچکی از ^{106}Ru به کمک عمل جراحی در نایژه، صورت می‌گرفت سرطان‌زایی تابش در ریه به اثبات رسید. از روی این تحقیقات همچنین معلوم شد که برای تولید سرطان در ریه، مواد معدنی پرتوزا باید برای مدتی در ریه باقی بمانند و در آنجا پرتوایی کنند. در بیشتر موارد، فاصله میان پرتوگیری و مشاهده سرطان ریه بیشتر از ۱۰۰ روز بود. ولی در یک مورد فقط ۴۸ روز پس از تزریق ^{144}Ce به مقدار $15 \mu\text{Ci}$ ، به صورت ذرات معلق CeF_3 در داخل نای، سرطان سلولهای پوست مشاهده شده است. پرتوگیری ریه با پرتوهای ایکس ممکن است فیروز و التهاب بافت‌ریوی تولید کند ولی باعث رشد غیرعادی نسوج نمی‌شود.

اثرات ژنتیکی

اطلاعات ژنتیکی لازم برای تولید و کارکرد یک اندام زنده جدید در کروموزومهای سلولهای زایشی، یعنی در اسپرم و تخمک، نهفته است. سلولهای بدنی هر انسان معمولاً ۴۶ کروموزوم دارند، ولی اسپرم کامل و تخمک کامل هر یک ۲۳ کروموزوم دارند. هنگامی که تخمکی به وسیله اسپرمی بارور می‌شود یاخته‌ای به نام سلول تخم حاصل می‌شود که ۴۶ کروموزوم دارد. در دوران نه‌ماهه آبستنی تخم بارور شده با تقسیم یاخته‌ای پی‌درپی و تنوع شکل به فرد جدید تبدیل می‌شود. کروموزومها در جریان تقسیم یاخته‌ای به دو نسخه دقیقاً یکسان تبدیل می‌شوند و در نتیجه تمام یاخته‌های بدن انسان حاوی اطلاعات ژنتیکی یکسان هستند. واحدهای اطلاعاتی کروموزومها را ژن می‌نامند. هر ژن یک ماکرومولکول فوق‌العاده پیچیده به نام اسید دیوکسی ریبونوکلئیک (DNA) است که در آن اطلاعات ژنتیکی طبق سلسله مراتب مجموعه‌های مولکولی معین و زیرمجموعه‌هایی که باز نامیده می‌شوند رمزگذاری شده است. مولکول DNA که وزنش از مرتبه 10^7 است، دو زنجیره طویل دارد که از قندهای پنتوز (دیوکسی ریبوز) و فسفات‌ها تشکیل می‌شود و به صورت مارپیچ مضاعفی دور یکدیگر می‌پیچد. این دو رشته بلند به هم پیچیده را بازها به هم نگه می‌دارند. بازها، درست مثل جای پاها در نردبانهای چوبی، دو رشته طویل DNA را به هم وصل می‌کنند (شکل ۴.۷). بازها از چهار نوع مختلف تشکیل شده‌اند: ۲ نوع پورین که عبارت‌اند از آدنین (A) و گوانین (G) و ۲ نوع پیریمیدین که عبارت‌اند از: سیتوزین (C) و تیمین (T). وقتی دو تا از این بازها که هر کدام به یک رشته بلند چسبیده‌اند به هم می‌پیوندند، حلقه‌های اتصال بازی تشکیل می‌شود. این حلقه‌های اتصال ترتیب مشخصی دارد، زیرا



شکل ۴.۷ ساختار مولکولی DNA. نوکلئوتیدها، یارشته‌های مارپیچ دوگانه، به‌طور یک‌درمیان از واحدهای دیوکسی ریبوز (DR) و فسفات (P) تشکیل شده‌اند. دو زوج باز مکمل، آدنین (A) و تیمین (T)، و گوانین (G) و سیتوزین (C)، دو زنجیر نوکلئوتید را به‌هم وصل می‌کنند.

در آن آدنین فقط با تیمین (A-T) و سیتوزین فقط با گوانین (C-G) جفت می‌شود. اطلاعات موجود در ژنها به‌صورت رمز در سه‌تایه‌های ترکیبات مختلف حلقه‌های اتصال A-T و C-G نهفته است، و ترتیب این سه‌تایه‌ها اطلاعات ژنتیکی موجود در هر مولکول DNA را تعیین می‌کند.

اطلاعات ژنتیکی ممکن است بر اثر عوامل شیمیایی و فیزیکی مختلفی موسوم به عوامل جهش‌زا که ترتیب بازها را در مولکول DNA بر هم می‌زنند، تغییر کند. اگر در محتوای اطلاعاتی سلولهای بدنی بی‌نظمی ایجاد شود، آنگاه ممکن است در اخلاف آن نوعی بی‌هنجاری پدید آید. اگر بی‌نظمی اطلاعات در سلول زایشی که بارور می‌شود صورت گیرد، آنگاه در موجود آینده نارسایی ژنتیکی یا جهش ایجاد خواهد شد. این جهش را جهش نقطه‌ای می‌نامند زیرا از آسیب وارد بر یک نقطه از ژن ناشی می‌شود. اکثر متخصصان ژنتیک عقیده دارند که بیشتر این جهشها در انسان ناسامطلوب و زیان‌آور است.

انحرافات کروموزومی، علاوه بر جهشهای نقطه‌ای ممکن است به آسیب ژنتیکی هم منجر شود. بعضی عوامل فیزیکی یا شیمیایی می‌توانند کروموزومها را بشکنند. در اغلب این شکستنها، پاره‌های حاصل از شکست دوباره به‌هم می‌پیوندند، و تنها نتیجه آن ممکن است ایجاد جهش نقطه‌ای در محل شکستگی اصلی باشد. اما در موارد اندکی، پاره‌های حاصل از شکست دوباره به‌هم نمی‌پیوندند و ممکن است ضمن تقسیم سلولی یکی از این پاره‌ها ناپدید شود. در نتیجه سلول دختر اطلاعات ژنتیکی موجود در آن پاره گمشده را دریافت نمی‌کند. احتمال دیگری که از شکست کروموزوم، بویژه وقتی دو یا چند کروموزوم می‌شکنند، نتیجه می‌شود این است که در اثر تبادل پاره‌ها میان کروموزومهای شکسته شده کروموزومهای غیرعادی تولید شود. سلولهایی که کروموزومهای غیرعادی دارند، معمولاً علاوه بر سایر ناهنجاریها از لحاظ قدرت تکثیر هم آسیب می‌بینند.

هرمان مولر، خواص جهش‌زایی تابش یوننده را در سال ۱۹۲۷ میلادی کشف کرد (و به خاطر آن جایزه نوبل در پزشکی گرفت). وی اثرات ژنتیکی پرتوهای ایکس را بر روی حشرات تحقیق کرد. از آن زمان به بعد، تحقیقاتی بر روی تعداد بسیار زیادی از موجودات زنده با تمامی تابشهای یوننده انجام شده و جهش‌زایی تمام این تابشها تأیید شده است. جهشهای نقطه‌ای تغییراتی در سطح مولکولها هستند، اما بسیاری از رویدادهای زیست‌شیمیایی مؤثر بر رابطه پاسخ‌دهی بین تغییرات مولکولی ژن و آثار بدنی حاصل از آن رخ می‌دهد. برای مثال، اگر آسیب ژنتیکی سلول زایشی یا تخم باروری را غیرقابل زیست کند، هیچ موجود زنده‌ای که حامل چنین جهشی باشد به دنیا نخواهد آمد. بنابراین، از لحاظ تجربی هیچ اثر زیان‌آوری مشاهده نخواهد شد. با وجود این، تحقیقات نشان می‌دهد که وجود يك دز آستانه برای اثرات ژنتیکی تابش نامحتمل است. اما این تحقیقات همچنین نشان می‌دهند که اثرات ژنتیکی تابش در گستره دز 8 mGy/min (800 mrad/min) تا 9 Gy/min (90 rad/min) به‌طور معکوس با آهنگ دز متناسب است. این بستگی با آهنگ دز به‌وضوح حاکی از وجود يك سازوکار ترمیمی است که در آهنگهای دز بالا از بین می‌رود.

چه رابطه‌ای میان دز تابشی و احتمال جهش وجود دارد؟ متخصصان ژنتیک احتمال می‌دهند که در گستره $50-250 \text{ Gy}$ ($50-250 \text{ rad}$) دوبرابر کردن دز تابش در نهایت منجر به دوبرابر شدن آهنگ جهش می‌شود. به عقیده این متخصصان در حدود ۸ درصد مردم با صفات ژنی مسلط جهش‌یافته به دنیا می‌آیند، و تخمین می‌زنند که تقریباً ۴ درصد از این افراد نتیجه جهشهای جدیدی هستند که در یکی از والدین آنها سابقه نداشته است. در نتیجه می‌توان گفت که نسبت ژنهای مسلط جهشی جدید برابر است با $0.000032 = 0.0004 \times 0.0008$. اگر فرض کنیم که رابطه پاسخ دز يك رابطه خطی و دز دوبرابر شدن برابر 5 Gy باشد، و همچنین اگر فرض کنیم که دز تابش دریافتی تمام افرادی که زاد و ولد می‌کنند 1 mGy (1 rad) باشد، در این صورت کسر جهشهای مسلط جدید بر اثر تابش برابر $(1/50) \times 0.000032 = 0.0000064$ یا تقریباً 0.0000064 خواهد بود. در صورتی که فقط یکی از والدین این دز تابشی را دریافت کند، مقدار بالا نصف می‌شود (0.0000032). از این رو می‌توان احتمال داد که نسبت ژن مسلط جهش‌یافته در پدر یا مادری که پیش از آبستنی تابش دیده‌اند در حدود ۳ در میلیون به‌ازای هر راد است. اما این احتمال، علاوه بر احتمال ۳۲۰ در میلیون جهش «خود به‌خود» در نسبت ژن مسلط است.

سمیت و خطر

بدیهی است آنچه در بالا به‌عنوان کار تجربی بدان اشاره شد، و در آن تومورهای ریه از مواد پرتوزایی حاصل می‌شد که با تزریق یا عمل جراحی وارد ریه شده بود، نمی‌تواند به‌عنوان معیار خطر حاصل از گردوغبار پرتوزا مورد استفاده قرار گیرد، بلکه فقط برای نشان دادن سمیت ماده پرتوزا پس از استقرار آن در محل مورد نظر به‌کار می‌رود. در مورد

خطر ناشی از گرد و غبارهای پرتوزای استنشاق شده (یا در واقع، خطر ناشی از هر ماده سمی دیگر) باید احتمال رسیدن ماده سمی به محل تأثیر آن در نظر گرفته شود. در مورد گرد و غبار استنشاق شده، این محل را اپی تلیوم برونشی، اپی تلیوم کیسه‌های هوا، و گره‌های لنفی ریه می‌دانند. دو عامل عمده‌ای که بر میزان خطر ناشی از گرد و غبارهای سمی معلق در هوا اثر می‌گذارند عبارت‌اند از: (۱) رسوب ذرات گرد و غبار در ریه، و (۲) احتباس ذرات گرد و غبار در ریه.

رسوب ذرات گرد و غبار در ریه عمدتاً به ابعاد ذرات، و احتباس در ریه به خواص فیزیکی و شیمیایی ذرات گرد و غبار و وضعیت فیزیولوژیکی ریه بستگی دارد. گرد و غبارهای تولید شده در هر فرایندی بر حسب اندازه یا «قطر» به طور کتیره‌ای در اطراف یک مقدار میانگین توزیع می‌شوند. این توزیع اندازه‌ها در مقیاس لگاریتمی، بهنجار است. یعنی این لگاریتم اندازه ذره است که به طور بهنجار توزیع می‌شود، نه مستقیماً اندازه ذره. در این مورد میانگین اندازه که به میانگین هندسی معروف است به صورت زیر تعریف می‌شود

$$m_g = \text{antilog} \left(\frac{\sum \log d_n}{n} \right) \quad (7.7)$$

که در آن d_n قطر هر یک از ذرات مختلفی است که اندازه گیری می‌شود (غالباً بر حسب میکرون، $1 \mu = 10^{-4} \text{ cm}$)، و n تعداد ذرات اندازه گیری شده است. انحراف معیار توزیع اندازه به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\sigma_g = \text{antilog} \sqrt{\left(\frac{\sum (\log d_n)^2}{n} - \left(\frac{\sum \log d_n}{n} \right)^2 \right)} \quad (8.7)$$

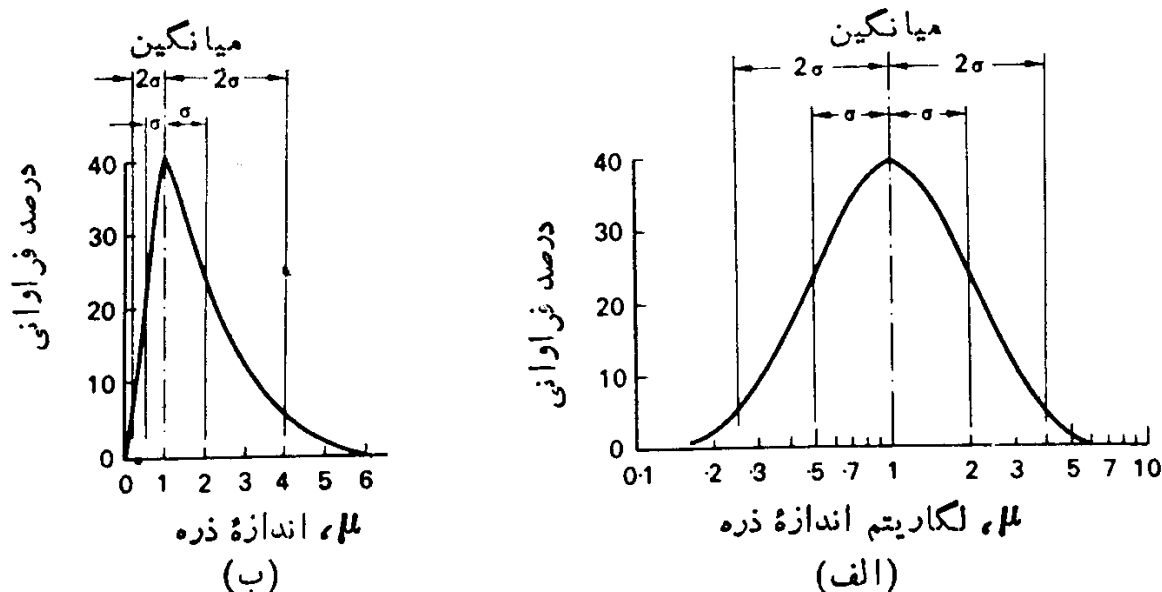
این مقدار، همان طور که در شکل ۵.۷ (الف) دیده می‌شود، با نقطه عطف منحنی توزیع گاوس متناظر است. در هر توزیع بهنجاری ۶۸٫۲٪ جمعیت در محدوده بعلاوه و منهای یک انحراف معیار از مقدار میانگین، ۹۵٫۴٪ جمعیت در محدوده بعلاوه و منهای ۲ انحراف معیار از مقدار میانگین قرار می‌گیرند. توزیع اندازه به دلیل ماهیت لگاریتمی توزیع باید به صورت زیر داده شود

$$m_g \times \sigma_g \quad (9.7)$$

نه مثل مورد میانگین حسابی که به صورت زیر داده می‌شود

$$m_a \pm \sigma_a \quad (10.7)$$

به عنوان مثال اگر توزیع اندازه نیمه لگاریتمی ذرات گرد و غباری به صورت 2×1.2



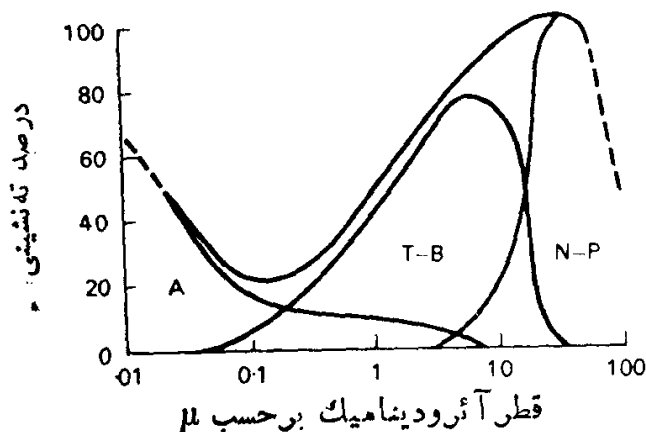
شکل ۵.۷ (الف) توزیع بهنجار لگاریتم اندازه ذرات گرد و غبار. لگاریتم قطر به صورت بهنجار توزیع شده است و از این رو، در صورتی که لگاریتم اندازه ذره بر حسب فراوانی رسم شود، یک توزیع گاوس به دست می‌آید. در این منحنی اندازه میانگین 1μ و انحراف معیار هندسی برابر ۲ است. **(ب)** منحنی توزیع اندازه به ازای داده‌های منحنی (الف). در این منحنی، پس از رسم تغییرات فراوانی بر حسب قطر، یک منحنی توزیع اریب به دست آمده است.

داده شود، آنگاه معلوم می‌شود که ۶۸٪ از تمام ذرات قطری بین ۰.۷ (یا ۰.۲-۱.۴) میکرون و ۲.۸ (یا ۰.۲ × ۱.۴) میکرون و در حدود ۹۶٪ ذرات قطری بین ۰.۳۵ و ۵.۶ μ خواهند داشت.

دستگاه تنفسی انسان را می‌توان بر اساس وظیفه فیزیولوژیک آن تقریباً به دو بخش مجرای تنفسی فوقانی و مجرای تنفسی تحتانی تقسیم کرد. قسمت فعال ریه، که در آن میان هوای دم و گاز محلول در خون تبادل گازی صورت می‌گیرد مجرای تنفسی تحتانی است. بقیه دستگاه تنفسی یا مجرای فوقانی که شامل مجاری بینی، گلو، نای، نایژه‌ها و نایزکهای پایانی است، در واقع فقط حکم گذرگاههایی را دارند که گاز از طریق آنها از جو به کیسه‌های هوای ریه (یا همان مجرای تنفسی تحتانی) و برعکس رفت و آمد می‌کند. حجم مجرای تنفسی که در واقع از لحاظ تبادل گاز یک فضای مرده محسوب می‌شود برای یک شخص بالغ متوسط در حدود ۱۵۰ ml است، ولی حجم هوای دم و بازدم در یک دوره تنفسی در حدود ۵۰۰ ml است. ظرفیت فعال باقیمانده یا حجم هوایی که پس از هر بازدم در ریه باقی می‌ماند برابر ۲.۴ لیتر است. بنابراین ملاحظه می‌شود که معمولاً بخش نسبتاً کوچکی، یعنی فقط در حدود ۱۳٪ هوای موجود در ریه، در هر دوره تنفسی مبادله می‌شود. از طرف دیگر مجرای بینی از موهای پوشیده شده است که مثل صافی ذرات درشت را می‌گیرند اما مجرای تنفسی فوقانی از حدود نای تا نایزکهای پایانی را زبانه‌های موم‌مانند بسیار ریزی

پوشانیده است که به طور منظم در تپش اند و از این طریق ذرات گرد و غباری را که بر سطح آنها می نشینند به سمت گلو پس می رانند. عمق نفوذ ذرات گرد و غبار به درون مجرای تنفسی به اندازه آنها بستگی دارد. ذرات بزرگ غبار که بزرگتر از حدود $5\text{ }\mu\text{m}$ باشند احتمالاً یا به وسیله موهای بینی و یا در اثر برخورد با سطح گلو-بینی متوقف می شوند. در اینجا باید توجه داشت که برای اینکه حرکت ذرات مستقل از حرکت هوا باشد باید، به استثنای جاذبه گرانشی، انرژی جنبشی خیلی زیادی داشته باشند. هر چه اندازه ذره کوچکتر باشد، اثر جاذبه گرانشی کمتر است. سرعت ته نشینی ذره‌ای به قطر $20\text{ }\mu\text{m}$ و با چگالی واحد در اثر جاذبه گرانشی برابر 1 cm/s است، در صورتی که اگر قطر همین ذره برابر $1\text{ }\mu\text{m}$ باشد تنها با آهنگ 3 cm/s ته می نشیند. بنابراین در عمل، می توان فرض کرد که ذرات کوچک در هوا معلق می مانند و همه آنها، به استثنای ذرات خیلی بزرگ، با جریان هوا حرکت می کنند. در دستگاه تنفس چون مساحت سطح مقطع اکثر گذرگاههای هوا نسبتاً کوچک است، هوای دم ممکن است با سرعت نسبتاً زیادی به داخل کشیده شود. بنا بر این، ذرات بزرگی که از صافی موهای بینی رد می شوند هنگام عبور از این گذرگاهها انرژی جنبشی قابل توجهی دارند. در نتیجه، این ذرات بزرگ، به دلیل تکانه‌ای که دارند، با هوای دم نمی توانند در مسیرهای خمیده به پیش بروند و بنا بر این با دیواره‌های مجرای تنفسی فوقانی برخورد می کنند. اما اگر قطر ذرات از $5\text{ }\mu\text{m}$ کمتر باشد، از شدت ضربه لختی ذره تا حد زیادی کاسته می شود و در نتیجه تعداد زیادی ذره به درون ریه راه پیدا می کند. هوا در کیسه‌های هوای ریه نسبتاً ساکن است، زیرا فقط بخش کوچکی از آن در هر دوره تنفس با هوای ورودی مبادله می شود. بنا بر این ذراتی که به درون مجرای تنفسی تحتانی رانده می شوند، این فرصت را پیدا می کنند که تحت تأثیر نیروی گرانشی ته نشین شوند. اما هر چه قطر ذره کوچکتر باشد کمتر ته نشین می شود، و اگر قطر ذره به حدود $(1/2)\text{ }\mu\text{m}$ برسد، میزان ته نشینی آن بر اثر گرانش برابر صفر خواهد شد. اگر قطر ذره کمتر از $1\text{ }\mu\text{m}$ باشد، حرکت براونی غالب می شود. ترکیب این سه اثر، یعنی ضربه لختی، ته نشینی بر اثر گرانش، و حرکت براونی، همان طور که در شکل ۶.۷ مشاهده می شود، احتمال ته نشینی ذراتی را که اندازه آنها در گستره $2-1\text{ }\mu\text{m}$ قرار دارد در مجرای تنفسی تحتانی به حداکثر، و ته نشینی ذراتی را که اندازه آنها در گستره $5-10\text{ }\mu\text{m}$ قرار دارد به حداقل می رساند.

عامل احتباس ذرات در ریه به مساحت مجرای تنفسی که در آن ذرات ته نشین می شوند، به خواص فیزیکی و شیمیایی ذرات، و به خواص فیزیولوژیکی ریه بستگی دارد. احتباس ذرات در هوای دم و یا برعکس دفع ذرات از طریق هوای بازدم، به دلیل نقش آنها در مدت زمان پرتوگیری بافت و ذکال، در تعیین میزان خطر از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. پژوهشهایی که در زمینه احتباس گرد و غبارهای مختلف در ریه انجام شده است، نشان می دهد که نمودار گرد و غبار باقیمانده در ریه پس از توقف پرتوگیری به صورت منحنی نمایی پیچیده‌ای در می آید که دستکم دو مؤلفه دارد: یکی مؤلفه نیمه عمر احتباس که از مرتبه چند ساعت است، و دیگری از مرتبه چند روز. در بسیاری موارد مؤلفه



شکل ۶.۲ ته‌نشینی ذرات گرد و غبار در مجرای تنفسی. ناحیه A عمدتاً ته‌نشینی در کیسه‌های هوا، ناحیه T-B عمدتاً در نای-نایژه، و ناحیه N-P در گلو و بینی است. ته‌نشینی کل برابر مجموع این سه ته‌نشینی است.

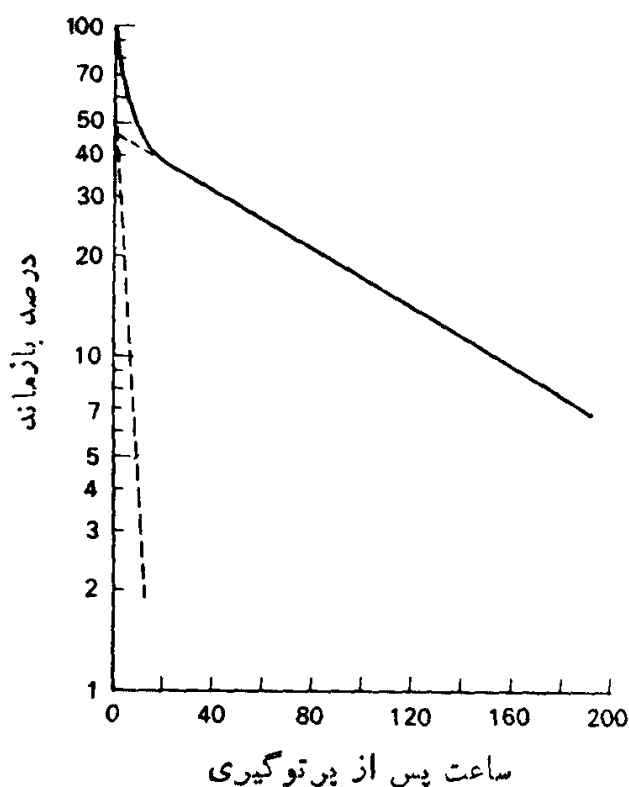
دوم نیز پیچیده است و می‌توان آن را به ۲ یا ۳ مؤلفه تجزیه کرد. معادله جبری این منحنی به صورت زیر است

$$D = D_1 e^{-k_1 t} + D_2 e^{-k_2 t} + \dots \quad (11.7)$$

شکل ۷.۲ يك منحنی احتباس دو مؤلفه ای نوعی را که با دو جمله اول معادله (۱۱.۷) توصیف می‌شود نشان می‌دهد.

نخستین مؤلفه این منحنی میزان گرد و غبار در مجرای تنفسی فوقانی، D_1 مقدار رسوب گرد و غبار در آنجا، و k_1 آهنگ دفع گرد و غبار از آنجا را نشان می‌دهد. D_2 نشان‌دهنده رسوب اولیه گرد و غبار در مجرای تنفسی تحتانی، و k_2 آهنگ دفع گرد و غبار از همان مجراست.

تصور می‌رود که برای دفع ذرات خارجی از ریه دستکم سه سازوکار متمایز باید همزمان عمل کنند: یکی دفع از طریق زبانه‌هاست که فقط در مجرای تنفس فوقانی عمل می‌کند. تپش موزون زبانه‌ها ذرات را با سرعت بسیار زیاد روبه بالا به طرف گلو می‌راند که در آنجا بلعیده می‌شوند. سرعت ذرات از حدود ۲ mm/min در نایژه‌ها تا ۳ cm/min در نای در تغییر است. دو سازوکار دیگر دفع که عمدتاً مربوط به ذرات معلق در مجرای تنفسی تحتانی می‌شوند عبارت‌اند از قابلیت انحلال و جذب در بستر مویرگ‌ها در غشای کیسه‌های هوا، و حذف از طریق فرایند بیگانه‌خواری. باید خاطر نشان کرد که قابلیت انحلال هر ماده معینی در آب لزوماً به معنای قابلیت انحلال در ریه نیست. برای مثال جیوه حاصل از ترکیب HgS^{203} که یکی از نامحلولترین مواد شیمیایی به شمار می‌رود، به مقدار قابل توجهی در کلیه‌ها و در ادرار موشهای صحرایی که در معرض ذرات HgS (به قطر ۱ μ) قرار گرفته بودند مشاهده شده است. از سوی دیگر، پس از تزریق $CeCl_3$ به صورت محلول ^{144}Ce به داخل نای معلوم شده است که ^{144}Ce مدت زمان مدیدی در ریه



شکل ۷.۲ منحنی احتباس ریوی مقدار ذرات BaSO_4 بازمانده در ریه را به صورت تابعی از زمان پس از دریافت نشان می‌دهد. در این منحنی، ۵۳٪ گرد و غبار درمجرای تنفسی فوقانی ته‌نشین می‌شود و آهنگ دفع از آن (URT) ۲۷٪ در ساعت است. مقدار ۴۷٪ گرد و غبار درمجرای تنفس تحتانی ته‌نشین می‌شود که آهنگ دفع آن ۱٪ در ساعت است.

باقی می‌ماند. در این مورد، Ce موجود در محلول به پروتئین بافت ریه می‌چسبد، و مقدار خیلی کمی سریم به داخل خون راه می‌یابد. ولی به نظر می‌رسد که این مورد سریم یک حالت استثنایی است. بیشتر ذرات استنشاق شده قابل حل وارد خون می‌شوند و اجزای متشکله شیمیایی آنها به بافتها و سایر اندامها انتقال می‌یابند و ممکن است به طور منظم در آنها جذب شوند. از این رو، ریه می‌تواند دروازه ورودی مناسبی برای ورود نوکلیدهای پرتوزای مختلف به داخل بدن باشد.

بیگانه‌خواری در واقع عبارت است از جذب ذرات بیگانه به وسیله یاخته‌های درشت‌خوار کیسه‌های هوای ریه و سپس دفع آنها از طریق «پلکان» زبانها و یا از طریق دستگاه لنفی که سازوکار عمده دفع ریه به شمار می‌رود. یاخته‌های بیگانه‌خواری که ذرات پرتوزا را جذب کرده‌اند ممکن است در سینوسهای گره لنفی نایی - نایزهای گیر بیفتند، و ممکن است برای مدتهای زیاد در همانجا باقی بمانند. این انباشت گرد و غبار پرتوزا در گره‌های لنفی ممکن است باعث شود که ذرات باش گره‌های لنفی از ریه‌ها بیشتر شود. آهنگ بیگانه‌خواری تا حد زیادی به نوع ذره گرد و غبار بستگی دارد، و از آن گذشته معلوم شده

است که آهنگک بیگانه‌خواری ذرات پرتوزا از ذرات ناپرتوزایی که ترکیب شیمیایی، خواص فیزیکی و توزیع اندازه آنها با ذرات پرتوزا یکسان است خیلی کندتر است. از روی گوناگونی عواملی که در تعیین اثرات زیست‌شناختی مواد پرتوزای استنشاق شده نقشی دارند، چنین برمی‌آید که میان تراکم جوی کل ایزوتوپهای پرتوزا و اثرات آنها در ریه یک رابطه کمی ساده وجود ندارد. بنا بر این بهتر است معیارهای مربوط به کنترل محیط زیستی گرد و غبارهای پرتوزا را با قید احتیاط به کار ببریم.

کوتاهی عمر

سرطان ناشی از بیش پرتوگیری به‌طور طبیعی موجب کوتاهی عمر می‌شود. علاوه بر این مرگ زودرس، دزهای زیاد تابش از طریق افزایش آهنگک پیری نیز باعث کوتاهی عمر می‌شود. این اثر کوتاهی عمر در میان حیوانات آزمایشگاهی دیده شده است. عامل اصلی مرگ این حیوانات را نمی‌توان به‌طور قطع و یقین به تابش نسبت داد. علل مرگ این حیوانات، همان عواملی است که در میان گروهی از آنها دیده می‌شود. فقط آهنگک این نوع مرگ از نظر سنی فرق می‌کند، به این معنی که مرگ حیواناتی که تحت تأثیر تابش قرار گرفته‌اند زودتر اتفاق می‌افتد. با آنکه پدیده کوتاهی عمر به وضوح در حیوانات دیده شده است، نظیر آن در انسان مشاهده نشده است. مقایسه طول عمر متخصصانی که در کارشان از پرتوهای ایکس استفاده می‌کنند با کسانی که با این پرتوها سروکاری ندارند، نتایج متضادی به دست می‌دهد. به عبارت دیگر در حالی که بعضی داده‌ها افزایش آهنگک مرگ به علل نامشخص را در میان استفاده‌کنندگان از پرتوهای ایکس تأیید می‌کند، داده‌های دیگر اختلاف قابل توجهی را از لحاظ آماری میان این دو گروه نشان نمی‌دهد. بنا بر این واضح است که پرتوگیری در سطوحی که معمولاً پرتوشناسان و سایر پزشکانی که از پرتو ایکس استفاده می‌کنند با آن سروکار دارند، آنقدر زیاد نیست که آهنگک فرایند پیری را تسریع کند و باعث کوتاهی عمر شود.

آب مروارید

پیدایش آب مروارید در بین فیزیکدانانی که به علت اشتغال در آزمایشگاههای سیکلوترونی، چشمهایشان برای مدت زمان نسبتاً مدیدی به‌طور متناوب در معرض میدانهای تابشی با شدت کم قرار می‌گرفت و در میان بازماندگان بمبهای اتمی که چشمهایشان در معرض یک دز منفرد تابش شدید قرار گرفته بود، نشان داد که بیش پرتوگیری حاد و مزمن ممکن است آب مروارید ایجاد کند. وانگهی تابش ممکن است به قرنیه، ملتحمه، عنبیه، و عدسی چشم نیز آسیب برساند. در مورد عدسی، محل اصلی آسیب سلولهای تکثیرشونده اپی تلیوم قدامی است. این امر در عدسی تارهای ناهنجاری تولید می‌کند که سرانجام، در اثر فرسودگی، ناحیه کدری که به آب مروارید معروف است تشکیل می‌شود و از رسیدن نور به شبکیه جلوگیری

می‌کند. دز لازم برای تولید آب‌مروارید در عدسی از مرتبه 500 rad تابش گاما یا بتا است، ولی نوترونهاى تند از پرتوهای ایکس یا بتا در تولید آب‌مروارید مؤثرتر هستند. گزارش شده‌است که در اثر تاباندن دزی معادل 200 rad از مخلوط نوترون و گاما به عدسی چشم، آب‌مروارید در عدسی تشکیل می‌شود.

تمام تابشها در تولید آب‌مروارید اثر یکسانی ندارند، مثلاً نوترونها از سایر انواع تابش مؤثرتر هستند. همچنین از آزمایش با حیوانات به این نتیجه رسیده‌اند که دز تولید آب‌مروارید تابع سن حیوان است، و حیوانات جوان از پیرها حساسترند. از طرف دیگر براساس داده‌های حاصل از پرتوگیری شغلی تخمین زده می‌شود که دز آستانه برای آب‌مروارید بین حدود ۱۵ تا ۴۵ راد نوترون است. هیچ نوع اثر آب‌مرواریدزایی تاکنون از پرتوگیری شغلی پرتوهای x گزارش نشده‌است. در میان بیمارانی که بر اثر پرتودرمانی با پرتوهای x آب‌مروارید در چشم آنها تولید شده‌است، آستانه آب‌مرواریدزایی در حدود 200 rad تخمین زده شده‌است. در آب‌مرواریدهای ناشی از تابش شغلی یا درمانی، معمولاً يك دوره کمون بسیار طولانی از مرتبه چندین سال بین پرتوگیری و پیدایش ناری در عدسی چشم وجود دارد.

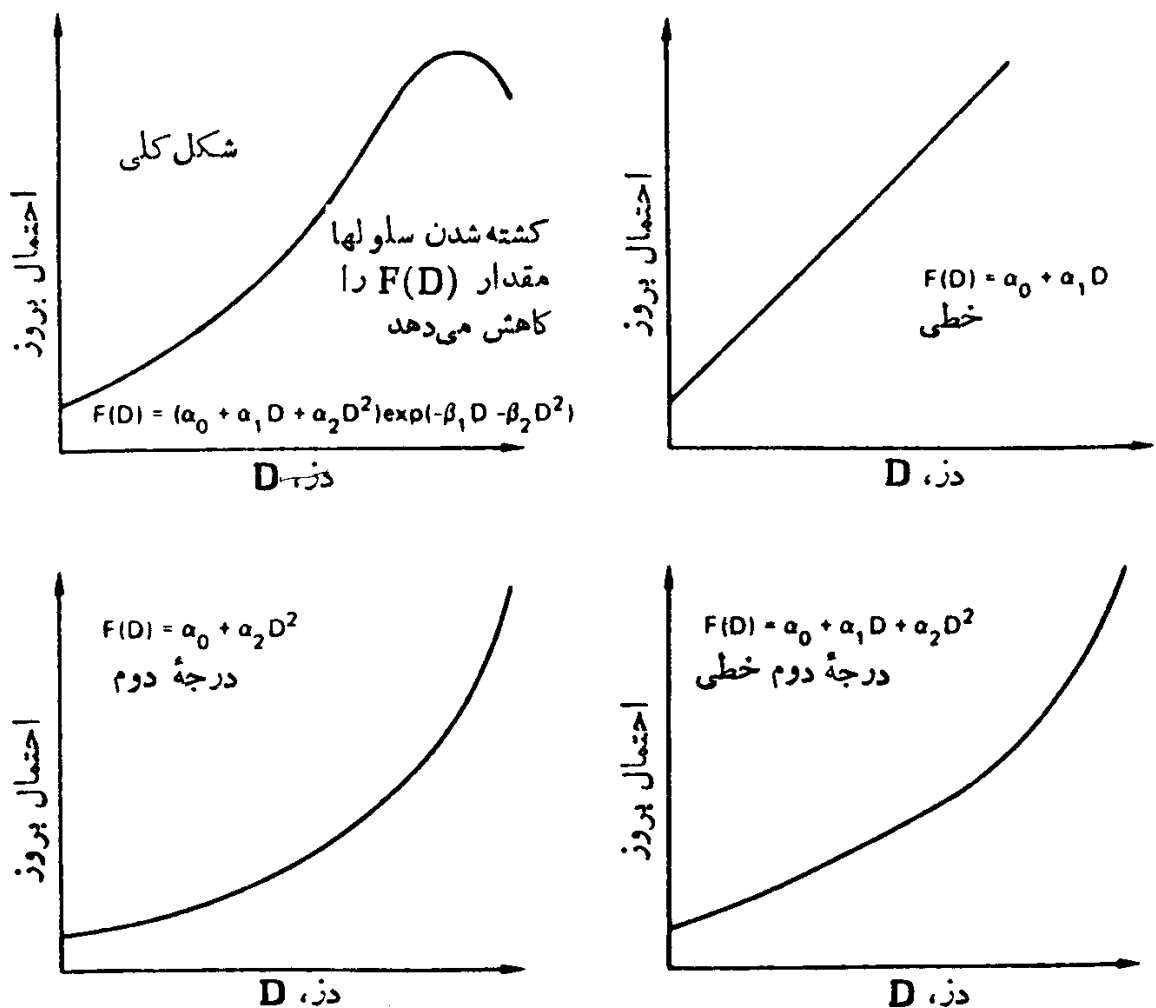
برآورد مخاطرات احتمالی: BEIR III

سیاست کلی در بررسی مخاطرات احتمالی ناشی از ابداعات تکنولوژی، به‌خطرات بالقوه و خطرات بالفعل بستگی دارد. در مورد خطرات ناشی از پرتوگیری با شدت کم از تابش یوننده، ماهیت تصادفی اثرات زیانبار پرتوگیری همراه با احتمال خیلی کم آن، ایجاب می‌کند که میزان خطر فقط از طریق مطالعه گروههای بزرگی از افراد برآورد شود. آخرین دستاوردهای این نوع مطالعات در باره اثرات زیست‌شناختی تابش یوننده (تا سال ۱۹۸۲ میلادی) را آکادمی ملی کمیته علوم امریکا در گزارش BEIR III تحت عنوان اثرات پرتوگیری تابشهای یوننده کم‌شدت بر اجتماعات (۱۹۸۵) منتشر کرده‌است. در این گزارش که اثرات بدنی (بویژه سرطان) و اثرات ارثی تابش را مورد بررسی قرار می‌دهد، اعضای کمیته روی روابط پاسخ دز در دزهای بالای حدود 1 Gy (100 rad) و بیشتر که با آهنگهای خیلی زیاد تحویل بدن می‌شوند توافق کرده‌اند. این اعضا همچنین به این نتیجه رسیده‌اند که هر نوع عوارض بدنی، که ممکن است ناشی از آهنگ دز زمینه یا 1 mGy (100 mrad) در سال باشد، تحت الشعاع عوامل دیگر قرار می‌گیرد. در مورد اثرات ژنتیکی، این کمیته نتیجه گرفته‌است که هیچ نوع عارضه ژنتیکی در اثر تابش به انسان منتقل نشده‌است و احتمال ندارد که منتقل شود. بنابراین خطرات ناشی از آسیبهای ژنتیکی باید بر آزمایشهای حیوانی متکی باشد. دوز نفر از اعضای این کمیته با رأی اکثریت مخالف بودند. یکی از آنها بر این عقیده بود که عوامل مخاطره تخمین زده شده برای تابش کم LET خیلی زیاد است، و دیگری عقیده داشت که برعکس این تخمین خیلی کم است.

این مخالفت حول این مسئله بود که آیا واقعاً اثرات فرضی دزهای از مرتبه ۱-۵۰۰ mSv تا ۱۰۰ mSv (۱۰ تا ۱۰۰ mrem) در سال بر دز زمینه طبیعی کل جمعیت افزوده می‌شود، و آیا اثرات فرضی دزهای از مرتبه ۵ تا ۵۰ mSv (۵۰۰ تا ۵۰۰۰ mrem) در سال حقیقتاً در میان کسانی که از طریق شغل در معرض پرتوگیری قرار می‌گیرند پدید می‌آید یا نه. اساس نظر این اقلیت تا حدود زیادی بر عدم قطعیتی مبتنی است که در شکل دقیق منحنی پاسخ‌دز در دزهای پایین وجود دارد. شکل تابعی منحنی تعمیم یافته پاسخ‌دز (شکل ۸.۷) به صورت زیر است

$$F(D) = (\alpha_0 + \alpha_1 D + \alpha_2 D^2) \exp(-\beta_1 D - \beta_2 D^2) \quad (12.7)$$

که در آن $F(D)$ احتمال بروز اثر مورد نظر (مثلاً سرطان) در دز D است، α_0 ، α_1 ، α_2 و β_1 ، β_2 مقادیر مثبت و α_0 نشاندهنده وقوع «خود به خودی» یا «طبیعی» همان اثر است. β_1 و β_2 فقط در دزهای زیاد مهم هستند. بسته به اینکه کدام یک از این ضرایب کم اهمیت یا قابل حذف باشند، منحنی تعمیم یافته به سه منحنی ساده که در شکل ۸.۷ نشان داده شده‌اند



شکل ۸.۷ منحنیهای مختلف پاسخ‌دز.

تبدیل می‌شود. این سه منحنی به ترتیب خطی، درجه دوم ساده، و درجه دوم خطی هستند. داده‌های تجربی موجود به ما اجازه نمی‌دهند که یکی از این سه منحنی را بر دو منحنی دیگر ترجیح بدهیم. اکثریت اعضای کمیته برای تخمین مخاطرات احتمالی دزهای کم، منحنی درجه دوم خطی، یکی از دو عضو مخالف منحنی خطی، و دیگری منحنی درجه دوم ساده را انتخاب کردند.

عمده‌ترین منابع داده‌هایی که بر اساس آنها مخاطرات احتمالی تخمین زده می‌شود، بازماندگان بمباران هسته‌ای هیروشیما و ناگازاکی و بیماران هسته‌ای برای درمان اسپوندیلیت آنکیلوز، یا سایر بیماریها در معرض دزهای تابش درمانی قرار می‌گیرند، و کسانی مثل نقاشان صفحه ساعت رادیم و کارگران معدن اورانیم هستند که به نسبت شغلشان در معرض تابش قرار می‌گیرند. گستره برآوردهای خطرات احتمالی، از گزارش BEIR III و چندین منبع دیگر در جدول ۱۰۷ آمده است.

چون هیچ‌نوع اثر ژنتیکی ناشی از تابش با شدت کم در انسان مشاهده نشده است، برآورد مخاطرات احتمالی ژنتیکی کاملاً مبتنی بر تحقیقات روی حیوانات است. این خطرات به دو صورت تخمین زده می‌شود: در یکی از این دو که به روش دضعاف شدن موسوم است آهنگهای جهش ناشی از تابش که در آزمایش با موشها به دست می‌آید با آهنگهای خود به خودی اختلال ارثی در انسان مقایسه می‌شود، و بر این اساس دز لازم برای دوبرابر شدن این آهنگ خود به خودی را در آزمایش با موشها تعیین می‌کنند. کمیته

جدول ۱۰۷ برآورد مخاطرات احتمالی سرطان بدخیم ناشی
از تابش کم شدت LET.

مرگهای ناشی از سرطان در هر میلیون نفر		منبع
نفر-رم		
BEIR III (۱۹۸۵)		
اکثریت اعضا		۶۷-۲۲۶
اقلیت الف (۱ عضو)		۱۵۸-۵۰۱
اقلیت ب (۱ عضو)		۱۰-۲۸
BEIR I (۱۹۷۲)		۱۱۵-۶۲۱
ICRP (۱۹۷۷)		۱۲۵
UNSCEAR (۱۹۷۷)		۱۰۰

BEIR III دز مضاعف شدن را از ۵ تا ۲۵۰ رم (۵۰ تا ۲۵ سیورت) برآورد کرده است که با خطر جهش نسبی از ۲۰۰ تا ۵۰۰۴ به ازای هر رم متناظر است. در آهنگی معادل دو برابر آهنگ جهش موجود، فقط پس از چندین نسل (شاید پس از ۱۰ نسل) تعادل جدیدی به وجود می‌آید. با این روش، BEIR III در حدود ۶۰ تا ۱۱۰۰ اختلال ژنتیکی اضافی را هنگام برقراری تعادل جدید پیش‌بینی می‌کند.

در روش دیگر، از داده‌های پاسخ‌دز حاصل از آزمایش با موشها مستقیماً برای تخمین خطرات ژنتیکی ناشی از تابش یوننده در انسان استفاده می‌شود. BEIR III براساس این روش فرض کرده است که دریافت دز (۱ rem) 1 Sv (۱۰۰ رم) توسط هر پدر یا مادری قبل از بارداری به ۵ تا ۶۵ اختلال ارثی اضافی در هر میلیون نوزاد در نخستین نسل منجر می‌شود. در حال حاضر آهنگ وقوع (خودبه‌خودی و به‌علتهای غیر از تابش) اختلالهای ارثی در انسان تقریباً ۱۰۷۰۰۰ در هر میلیون نوزاد است.

تأثیر نسبی زیست‌شناختی (RBE) و ضریب کیفیت (QF)

نه تنها نوترونها را در تولید آب‌مروارید از پرتوهای ایکس مؤثرتر یافته‌ایم، بلکه تابش آلفا نیز زیانبارتر از تابش گاما یا بتاست. هنگامی که سمیت نسبی یا آسیب ناشی از تابشهای مختلف باهم مقایسه می‌شود، با فرض اینکه این مقایسه براساس جذب مقادیر یکسان انرژی صورت بگیرد، معلوم می‌شود که هر چه آهنگ انتقال انرژی (LET) بیشتر باشد، آسیب‌رسانی تابش به‌وجود زنده نیز بیشتر است. بنا به تعریف، نسبت مقدار انرژی لازم از پرتوهای ایکس 200 keV برای تولید اثری مشخص به انرژی لازم از هر تابش دیگر برای تولید همین اثر را تأثیر نسبی زیست‌شناختی (با علامت اختصاری RBE) آن تابش می‌نامند. مقدار RBE هر تابش مخصوصی به‌اثر دقیق زیست‌شناختی آن تابش در نوع معینی از موجودات زنده تحت مجموعه معینی از شرایط آزمایشگاهی بستگی دارد. بنابراین

جدول ۲.۷ رابطه میان ضریب کیفیت (QF) و انتقال خطی انرژی (LET).

LET در آب ($\text{keV}/\mu\text{m}$)	QF
۳۰۵ یا کمتر	۱
۳۰۵-۷۰۰	۱-۲
۷۰۰-۲۳	۲-۵
۲۳-۵۳	۵-۱۰
۵۳-۱۷۵	۱۰-۲۰

اصطلاح RBE به کار برد زیست شناسی تابشها محدود می شود. در فیزیک بهداشت در جمع زنی دزهای مختلف یک حد بالای محتاطانه RBE برای مهمترین اثر ناشی از تابش غیر از تابش مرجع (پرتوهای ایکس 200keV) به عنوان عامل بهنجار کننده در نظر گرفته می شود. این عامل بهنجار کننده که ضریب کیفیت (و به طور خلاصه QF) خوانده می شود، همان گونه که در جدول ۲.۷ دیده می شود به LET بستگی دارد. برای سهولت در انجام آزمایشهای فیزیک بهداشت و مقاصد تجویزی، ضرایب کیفیت پیشنهادی تابشهای مختلفی که متخصصان فیزیک بهداشت بیشتر با آنها سروکار دارند در جدول ۳.۷ آمده است.

جدول ۳.۷ مقادیر ضریب کیفیت برای تابشهای گوناگون.

تابش	QF
پرتوهای گامای رادیوم در حال تعادل با فراورده های واپاشی آن (پس از عبور از ۵ mm صافی پلاتین)	۱
پرتوهای ایکس	۱
پرتوهای بتا و الکترونها با انرژی بیشتر از 0.03MeV	۱
پرتوهای بتا و الکترونها با انرژی کمتر از 0.03MeV	۱.۷
نوترونها گرمایی	۲
نوترونها تند	۱۰
پروتونها	۱۰
پرتوهای آلفا	۲۰
یونهای سنگین	۲۰

دز معادل: سیورت (ورم)

سیورت که با علامت اختصاری Sv نشان داده می شود یکای دز معادل تابشی، H ، است که در اندازه گیریهای مربوط به حفاظت تابشی، معیارهای طراحی مهندسی، و در موارد تجویزی و حقوقی به کار می رود. دز معادل (بر حسب سیورت)، علاوه بر دز جذب شده، QF تابش و همچنین عوامل دیگری چون ضریب توزیع نایکخواخت DF را که فقط در مورد استخوان-خواه ها به کار می رود و ممکن است بر اثر زیست شناختی دز جذب شده معین تأثیر بگذارد شامل می شود. (در فصل ۸ ضریب توزیع، در ارتباط با تراکم ایزوتوپهای پرتوزا

در آب آشامیدنی براساس مقایسه با رادیم، مورد بحث قرار گرفته است). دز معادل به صورت زیر تعریف می‌شود

$$H, Sv = D, Gy \times QF \times DF \quad (۱۳.۷)$$

طبق این معادله هر ۱ mGy دز جذب شده از پرتوهای ایکس یا بتا متناظر است با دز معادل ۱ mSv، در صورتی که هر ۱ mGy دز نوترون تند با دز معادل ۲۰ mSv متناظر است. باید توجه داشت که گری فقط به عوامل فیزیکی، و سیورت به هر دو عامل فیزیکی و زیست‌شناختی بستگی دارد. حدود دز یا بیشینه‌های دز مجاز تابش بر حسب یکای سیورت یا میلی‌سیورت داده می‌شود.

در مثال زیر، کاربرد یکای سیورت در بررسی‌های معمولی تابش آمده است. آهنگ دز در خارج از حفاظ یک سیکلوترون به صورت زیر است.

گاما: $۵ \mu Gy/h$ (۰.۵ mrad/h)

نوترونهای گرمایی: $۲ \mu Gy/h$ (۰.۲ mrad/h)

و نوترونهای تند: $۱ \mu Gy/h$ (۰.۱ mrad/h)

آهنگ دز معادل مجموعه این تابشها چقدر است؟

گاما $۵ \mu Gy/h \times ۱ = ۵ \mu Sv/h$ پرتوهای گاما

$۲ \mu Gy/h \times ۲ = ۴ \mu Sv/h$ نوترونهای گرمایی

$۱ \mu Gy/h \times ۲۰ = ۲۰ \mu Sv/h$ نوترونهای تند

$H = ۲۹ \mu Sv/h$ (دز معادل کل)

در دستگاه یکاهای cgs که در آن دز بر حسب rad است، یکای دز معادل رم است که به صورت زیر تعریف می‌شود

$$H, \text{ rem} = D, \text{ rad} \times QF \times DF \quad (۱۴.۷)$$

با استفاده از یکاهای cgs در مثال بالا دز معادل برابر ۲۹ mrem/h به دست می‌آید. دز معادل انباشته صرفاً همان دز انباشته ناشی از یک پرتوگیری یا عملیات خاص است که با استفاده از معادله (۱۳.۷) به سیورت یا با استفاده از معادله (۱۴.۷) به رم تبدیل شده است.

در مواردی که تعیین استاندارد مورد نظر است، از اصطلاح انباشت دز معادل H_{50} استفاده می‌کنیم که به صورت دز معادلی تعریف می‌شود که طی ۵۰ سال بعد از جذب ایزوتوپ پرتوزا انباشته می‌شود

$$H_{50} = \int_0^{50} H(t) dt \quad (۱۵.۷)$$

تابش پراانرژی

تابشهای پراانرژی نظیر تابش ناشی ازشتابدهنده‌های پراانژی که ذرات را تا حدود GeV شتاب می‌دهند، مسائل خاصی به وجود می‌آورند. در این موارد، دز جذب شده رامی‌توان با استفاده از اتاقک یونش معادل بافت اندازه‌گیری کرد. هرچند اندازه‌گیری توزیع طیفی این تابش دشوارتر است، اما می‌توان آن را با استفاده از تکنیک‌هایی چون تکنیک آشکارسازی رد در فیلمها، تحلیل ارتفاع تپ، آشکارسازهای آستانه‌ای، و روشهای جذب به‌طور تقریبی بر آورد کرد. اما آثار زیست‌شناختی این نوع تابشها که انرژی زیاد دارند آنقدر شناخته شده نیست که بتوانیم به کمک آنها مقدار عددی ضریب کیفیت را با دقت تعیین کنیم. از این لحاظ، آهنگ خیلی زیاد انتقال خطی انرژی (LET) به وسیله یونهای سنگین پراانرژی بیشتر مورد نظر است.



راهنمای حفاظت در برابر تابش

سازمانهای تدوین کننده استانداردها

کمیسیون بین المللی حفاظت پرتوشناختی

مسئولیت اصلی تهیه راهنمای ایمنی در برابر تابش بر عهده کمیسیون بین المللی حفاظت پرتوشناختی (ICRP) قرار دارد. این سازمان در سال ۱۹۲۸ در دومین کنگره بین المللی پرتوشناسی با عنوان «کمیسیون بین المللی حفاظت در برابر پرتو ایکس و رادیم» تأسیس شد. در آن زمان و چندین سال پس از آن نگرانی عمده این کمیسیون جنبه های ایمنی پرتوشناسی پزشکی بود. با کاربرد وسیع تابش در خارج از حوزه پزشکی، وظایف این کمیسیون نیز گسترش یافت و در سال ۱۹۵۰ نام آن به کمیسیون بین المللی حفاظت پرتوشناختی تغییر (ICRP) پیدا کرد تا حوزه فعالیت آن را دقیقتر دربر گیرد. ICRP هدف از تأسیس خود را به این صورت بیان کرده است: «این کمیسیون بر آن است که اصول بنیادی حفاظت در برابر تابش را تدوین کند و مسئولیت تهیه جزئیات آیین نامه ها و توصیه های فنی یا دستورالعملها را به کمیته های حفاظت کشورهای مختلف جهان واگذارد تا متناسب با نیازهای خاص کشورهای خود عمل کنند»^۱. ICRP گزارش کارهای خود را در نشریه های مخصوصی به چاپ می رساند. فهرست این گزارشها در کتاب شناسی این فصل در آخر کتاب آمده است.

1. ICRP Publication 6, p. 1, Pergamon Press, Oxford, 1964.

سازمان بین‌المللی انرژی اتمی

سازمان ملل متحد به منظور توسعه کاربردهای مسالمت آمیز انرژی هسته‌ای در سال ۱۹۵۶ یک نهاد تخصصی به نام سازمان بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) تأسیس کرد تا توصیه‌های ICRP را عملاً به اجرا در آورد. «وظیفه این سازمان رعایت استانداردهای ایمنی حفاظت پرتو شناختی در عملیاتی است که خود انجام می‌دهد یا به کمک آن انجام می‌شوند و یا مستقیماً به آن وابسته هستند. بنابراین مؤسسه‌ای که از کمک این سازمان برخوردار هستند باید معیارهای ایمنی و بهداشتی آن را رعایت کنند.»^۱ معیارهای ایمنی و بهداشتی IAEA بر حسب موضوع در مجموعه ضوابط ایمنی چاپ و منتشر می‌شوند.

سازمان بین‌المللی کار

سازمان بین‌المللی کار (ILO) در سال ۱۹۱۹ تأسیس شد و سپس به عضویت جامعه ملل درآمد، و پس از انحلال جامعه به اولین ارگان تخصصی ملل متحد تبدیل شد. وظیفه اصلی این سازمان رسیدگی به مسائل اجتماعی مربوط به کار است، ولی استانداردهای بین‌المللی کار را هم در ارتباط با ایمنی و بهداشت کارگران تعیین می‌کند. این استانداردها به صورت قواعد نمونه مقررات ایمنی تأسیسات صنعتی برای راهنمایی دولتها و صنایع، به عنوان توصیه‌های کمیته‌های تخصصی، و به صورت کتابچه‌های راهنمای فنی منتشر می‌شوند. قاعده نمونه توصیه‌های ICRP در مورد کنترل خطرات حرفه‌ای تابش را نیز شامل می‌شود، و سازمان بین‌المللی کار چندین کتابچه راهنما در مورد حفاظت کارگران در برابر خطرات تابشی منتشر کرده است.

کمیسیون بین‌المللی یکاها و اندازه‌گیریهای پرتو شناختی

کمیسیون بین‌المللی یکاها و اندازه‌گیریهای پرتو شناختی (ICRU) که با ICRP همکاری نزدیک دارد از همان بدو تأسیس (۱۹۲۵)، هدف اصلی خود را معرفی توصیه‌های مورد قبول بین‌المللی در موارد زیر قرار داده است:

۱. کمیته‌ها و یکاهای تابش و پرتو زایی.
۲. روشهای مناسب برای اندازه‌گیری و کاربرد این کمیته‌ها در پرتو شناسی و پرتو زیست‌شناسی کلینیکی.
۳. داده‌های فیزیکی مورد نیاز برای کاربرد این روشها، که استفاده از آنها باعث یکنواختی گزارشها می‌شود.

1. *Safe Handling of Radioisotopes*, Safety Series No. 1, IAEA, Vienna, 1962.

ICRU معتقد است که «سازمانهای ملی باید مسئول تهیه جزئیات روشهای فنی مربوط به معرفی و رعایت استانداردها باشند. اما همه کشورها باید تا حد ممکن مفاهیم اساسی کمیتهها و یکاهای تابش را که در سطح بینالمللی پذیرفته شدهاند به کار ببرند.»^۱

شورای ملی اندازه گیریها و حفاظت در برابر تابش

در بسیاری از کشورهای جهان، سازمانهای ملی رهنمودهای ICRP را با توجه به شرایط و نیازهای خاص محلی خود مورد استفاده قرار می دهند. در امریکا دو سازمان از این نوع وجود دارند که سازمان قدیمی تر «شورای ملی اندازه گیریها و حفاظت در برابر تابش (NCRP)» نام دارد. این سازمان که ابتدا «کمیته مشورتی حفاظت در برابر پرتو ایکس و رادیم» نام داشت در سال ۱۹۲۹ تأسیس شد، و در آن گروهی از متخصصان فنی حفاظت در برابر تابش و دانشمندانی که در این رشته صاحب نظر هستند همکاری دارند. NCRP فقط با جنبه های فنی و علمی حفاظت در برابر تابش سروکار دارد و از يك کمیته اصلی و ۲۵ کمیته فرعی تشکیل شده است. هر کدام از کمیته های فرعی مسئول تهیه توصیه های ویژه ای در زمینه های خاص خود هستند. توصیه های کمیته های فرعی قبل از انتشار باید به تصویب کمیته اصلی برسند. سرانجام، شورای ملی توصیه های تصویب شده کمیته اصلی را منتشر می کند. باید تأکید کرد که NCRP يك سازمان رسمی دولتی نیست، ولی غالباً نمایندگان دولتهای محلی، ایالتی، و فدرال توصیه های آن را در مورد خطرات تابش می پذیرند.

ضرورت حفاظت در برابر تابش

متخصصان بهداشت صنعتی و بهداشت همگانی معمولاً محیط زیست را، از لحاظ اثرات غیرتصادفی تابش، بر اساس مفهوم دز آستانه کنترل می کنند. اگر مقدار يك ماده سمی از حد دز آستانه بیشتر نباشد می توان فرض کرد که سازوکارهای فیزیولوژیکی معمولی برای مقاومت در برابر آثار زیانبار آن کافی هستند. دز آستانه معمولاً براساس ترکیبی از داده های آزمایشگاهی مربوط به جانوران و داده های کلینیکی انسانی تعیین، و سپس بایک ضریب ایمنی مناسب به بیشینه تراکم مجاز تبدیل می شود. سپس این مقدار بیشینه تراکم مجاز به عنوان معیار ایمنی کنترل محیط به کار می رود. سازمان بینالمللی بهداشت شغلی در سال ۱۹۵۹ بیشینه تراکم مجاز را به صورت زیر تعریف کرده است: «منظور از اصطلاح بیشینه تراکم مجاز هر ماده آن تراکم متوسط در هواست که براساس حساسترین آزمونهای پذیرفته شده بینالمللی در طول کار مداوم روزانه نتواند هیچگونه نشانی از آسیب بدنی

1. ICRU Report 32, 1979.

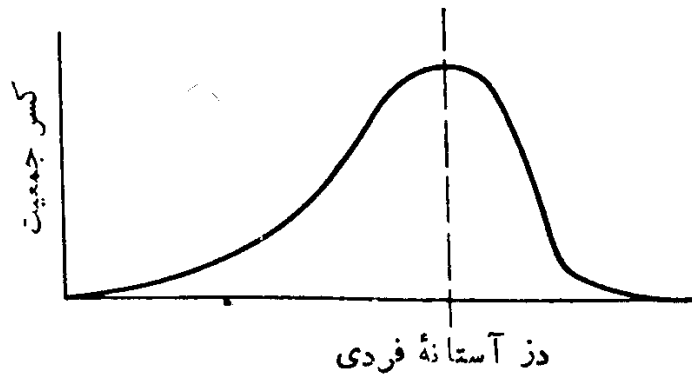
یا علامت بیماری در هیچیک از کارکنان، به استثنای کسانی که حساسیت خیلی زیادی دارند، ایجاد کند.»

کنترل عوامل وابسته به محیط زیست، چون تابش یوننده و ایزوتوپهای پرتوزا که احتمال ابتلا به بیماری سرطان و نارساییهای ژنتیکی را افزایش می دهند، فلسفه دیگری دارد. با اینکه متخصصان زیست شناسی مولکولی سازوکارهای درون سلولی مربوط به ترمیم DNA آسیب دیده در باکتریها را پیدا، و متخصصان ژنتیک وابستگی آهنگ دز و جهش زایی ناشی از پرتوزایی را مشاهده کرده اند (و هر دوی این مشاهدات حاکی از وجود یک آستانه برای اثرات تصادفی است)، ولی ما به منظور تعیین استانداردهای ایمنی برای تابش و برای سرطان زایی و جهش زایی شیمیایی، فرض می کنیم که اثرات تصادفی دز آستانه ندارند. فرض بر این است که منحنیهای پاسخ دز سرطان زایی و جهش زایی خطی هستند و تا دز صفر ادامه می یابند. شیب منحنیهای پاسخ دز اثرات تصادفی مختلف با استفاده از روش برونیابی تا دزهای کم و دز صفر به دست می آید.

وانگهی، فرض بر این است که این اثرات از آهنگ دز مستقل اند و فقط دز کل از لحاظ زیستی حائز اهمیت است. به عبارت دیگر، چون هر گونه افزایش دز، هر چقدر هم کم، به همان نسبت احتمال خطر را افزایش می دهد، مبنای کنترل دز تابش مصنوعی حد دز تابشی است که می تواند با منابع حاصل از کاربرد تابش برای جامعه و افراد آن قابل سازش باشد.

تمایز میان عواملی که اثرات غیر تصادفی را باعث می شوند و آنهایی که احتمال اثرات تصادفی را افزایش می دهند و مبتنی بر نبود دز آستانه هستند، آن طور که در بادی امر می نماید مشخص نیست. برای موادی که وجود دز آستانه برای آنها محرز است، مقدار آستانه به طور فردی مشخص می شود و از فردی تا فرد دیگر متفاوت است. از این رو، با اینکه مقدار متوسط آستانه برای تغییرات خون ناشی از تابش گاما برابر $25 \text{ Gy} (25 \text{ rad})$ در نظر گرفته شده است، ولی در افرادی که میزان دز آنها فقط در حدود $14 \text{ Gy} (14 \text{ rad})$ بوده است نیز تغییرات خون مشاهده شده است، در حالی که در افراد دیگری که دز آنها به $4 \text{ Gy} (40 \text{ rad})$ رسیده هم هیچ نوع تغییری دیده نشده است. اگر عده خیلی بیشتری از کسانی که تابش دیده اند از لحاظ تغییرات خون معاینه شوند، احتمال دارد که حتی در بین کسانی که دز کمتر از $14 \text{ Gy} (14 \text{ rad})$ گرفته اند نیز تغییرات خون مشاهده شود.

نامعقول نیست اگر انتظار داشته باشیم که توزیع حساسیت نسبت به خطر نا کمترین عوامل همانند شکل ۱۰۸ باشد که در آن منحنی توزیع حساسیت به طرف راست کج شده است. این منحنی در واقع در انتهای دز زیاد توزیع محور طولها را قطع می کند، زیرا مسلماً باید دزی وجود داشته باشد که همه افراد را تحت تأثیر قرار دهد. از سوی دیگر معلوم شده است که افراد «با حساسیت خیلی زیاد» وجود دارند که حتی دزهای بسیار کمی که براغلب مردم اثر ندارد، آنها را تحت تأثیر قرار می دهد. بر این اساس می توان فرض



شکل ۱۰۸ توزیع آستانه‌های فردی در میان یک جمعیت.

کرد که منحنی توزیع در سمت چپ از مبدأ مختصات می‌گذرد. توزیع پذیرفتاری دز در میان افراد یک جمعیت، عملاً حاکی از آن است که نمی‌توان مفهوم دز آستانه را برای جمعیت خیلی بزرگ به کار برد. بنا بر این در تنظیم بیشینه تراکم مجاز برای یک جمعیت خیلی بزرگ باید از قضاوت ارزشی استفاده کرد. در اینجا لازم است که مرجعی در مورد کسر قابل قبولی از جمعیت که ممکن است از یک ماده زیانبار آسیب ببینند تصمیم بگیرد و حد آن را مشخص کند تا براساس آن بیشینه تراکم مجاز برای کاربرد مفید آن تعیین شود. معمولاً بیشینه تراکم مجاز با چنان دقت و احتیاطی تعیین می‌شود که برای پیدا کردن شخص فوق‌العاده حساس باید عده فوق‌العاده زیادی را در این سطح تحت تابش قرار داد.

همین استدلال درباره کسانی که با حدود دز تابش سروکار دارند صادق است. در پرتوگیری شغلی، مسئله تعیین حدود دز به عنوان راهنمای حفاظت در برابر تابش نسبتاً ساده است. مقدار خیلی زیادی از تجارب مربوط به این زمینه، از پرتوگیری بی‌قاعده انسانها از رادیم و پرتو ایکس در طی ربع اول قرن بیستم و از مطالعه بازماندگان بمباران هسته‌ای ژاپن، بخش بزرگ آن از تحقیقات آزمایشگاهی جانوران به دست آمده است. براساس این داده‌ها و با فرض اینکه هر افزایشی در دز تابش به همان نسبت احتمال خطر را افزایش می‌دهد، می‌توان حدود دز را طوری تعیین کرد که وقتی در مورد کارگران شاغل در امور تابش به کار می‌رود بیش از مشاغلی که استانداردهای ایمنی بالایی دارند و «ایمن» محسوب می‌شوند احتمال خطر نداشته باشد. حدود دز برای افرادی از جامعه که پرتوگیری آنها ناشی از شغل نیست در سطحی تعیین شده است که خطر فرضی حاصل از آن بسیار کمتر از خطراتی است که جامعه آنها را به خاطر سایر منافع تکنولوژیکی می‌پذیرد. با استفاده از این حدود دز، می‌توان حدود سالانه جذب و تراکمهای محیطی نوکلیدهای پرتوزای مختلف را که در همان محدوده مجاز توایند دز می‌کنند، به دست آورد.

آن‌طور که در «نشریه ۲۶» ICRP آمده است محدودیت دز توصیه شده بر ۳ اصل زیر متکی است:

۱. هیچ اقدامی (که منجر به پرتوگیری می شود) نباید انجام شود مگر اینکه نتیجه مثبت و صریحی در بر داشته باشد.
۲. کلیه پرتوگیرها باید با در نظر گرفتن عوامل اجتماعی و اقتصادی، تا حد معقول و ممکن، پایین نگه داشته شود.
۳. دز معادل برای افراد مختلف نباید از آنچه کمیسیون ICRP با مراعات جنبه های احتیاطی پیشنهاد کرده است بیشتر شود.

لازم به تذکر است که ماده ۲ بر این نکته اصرار دارد که حدود واقعی دز در هر فعالیت پرتوشناختی باید خیلی محدودتر از حد بیشینه دز توصیه شده باشد. این گفته بدان معنی است که فرایندها، تجهیزات (از قبیل حفاظ گذاری، دستگاه تهویه، وغیره)، و سایر عوامل عملیاتی باید طوری طراحی شوند که دز دریافتی کارکنان از حد دز عملیاتی تجاوز نکند. این روش عملی به روش ALARA (روش تا حد معقول و ممکن پایین) معروف است. کمیسیون ICRP برای به کار بردن ALARA توصیه کرده است که ابتدا تحلیل های هزینه-سود مربوط به حدود دز عملیاتی پایینتر به عمل آید، و سپس سطحی از حفاظت در برابر تابش انتخاب شود که هزینه اثرات زیانبار تابش را در مقابل سودهای حاصل از استفاده از آن بهینه کند. چون در کاربرد ALARA باید عوامل اقتصادی و اجتماعی در نظر گرفته شود، بدیهی است که از عبارت «تا حد معقول و ممکن پایین» تعبیرهای بسیار متفاوتی می شود. کمیسیون هسته ای ایالات متحده این عبارت را رسماً تعبیر و در سری *Regulatory Guide* منتشر کرده است.

معیارهای اصلی ایمنی تابش

کمیسیون ICRP به منظور تعیین استانداردهای ایمنی تابش سه نوع پرتوگیری را مشخص کرده است:

۱. پرتوگیری شغلی اشخاص بالغ هنگام کار با تابش یوننده. این افراد که می توان آنها را کارگران تابش نامید به نوبه خود به دو زیر گروه تقسیم می شوند: (الف) زنان باردار، (ب) سایر کارگران تابش.
 ۲. پرتوگیری عامه مردم در جامعه، این گروه نیز به دو زیر گروه تقسیم می شوند که عبارت اند از (الف) تک تک افراد جامعه، (ب) گروه های جمعی.
 ۳. پرتوگیری پزشکی. این دسته شامل بیماران و اشخاصی می شوند که به خاطر مسائل تشخیصی و درمانی ناچار از پرتوگیری هستند. کسانی که ضمن پرتوگیری بیماران خود به طور اتفاقی پرتو می گیرند جزء این دسته به حساب نمی آیند.
- کمیسیون ICRP در مورد پرتوگیری شغلی، حدود دز معادل سالانه را به ترتیب زیر توصیه می کند:

۱. برای جلوگیری از اثرات غیر تصادفی:

(الف) حد 5 Sv (50 rem) برای کلیه بافتها به استثنای عدسی چشم،

(ب) حد 15 Sv (15 rem) برای عدسی چشم.

این حدود، اعم از اینکه بافتها به صورت منفرد و یا همراه با سایر اندامها در معرض پرتوگیری قرار بگیرند، صادق است.

۲. برای محدود کردن اثرات تصادفی، حد دز معادل ناشی از تابش دهسی یکنواخت تمام بدن برابر 5 mSv (5 rem) در سال تعیین می شود.

چون خطر اثرات تصادفی، چه تمام بدن به صورت یکنواخت تحت تابش قرار گیرد و چه دز تابش به صورت غیر یکنواخت توزیع شده باشد باید یکسان باشد، کمیسیون ICRP در سال ۱۹۷۷ در نشریه شماره ۲۶ مفهوم دز معادل مؤثر را معرفی و توصیه کرد که به منظور کنترل اثرات تصادفی، دز معادل مؤثر پرتوگیری شغلی به 5 mSv (5 rem) در سال محدود شود. در مورد کارکنان باردار تابش، کمیسیون ICRP توصیه کرد که پرتوگیری سالانه نباید از سه دهم حد دز معادل سایر کارکنان تابش تجاوز کند.

دز معادل مؤثر

به منظور تعیین استانداردهای ایمنی تابش فرض می کنیم که احتمال اثرات تصادفی در هر بافتی با دز معادل آن بافت متناسب است. اما به دلیل برابر نبودن حساسیت بافتهای گوناگون، مقدار ضریب تناسب در بافتهای متفاوت یکسان نیست. در جدول ۱۰۸، حساسیت نسبی چندین اندام و بافت در مقابل اثرات تصادفی زیانبار که سهمی در خطر کل دارند، بر حسب خطر ناشی از هر Sv آمده است. اگر دز تابش در سراسر بدن یکنواخت باشد، ضریب خطر کل برابر ۱ است. برای تابش نایکنواخت، مثل پرتوگیری قسمتی از بدن از یک میدان تابش خارجی، یا پرتوگیری داخلی وقتی تراکم ایزوتوپ در اندامهای مختلف متفاوت است، برای محاسبه دز معادل مؤثر از ضرایب وزنی جدول ۱۰۸ که متناسب با پذیرفتاری نسبی اندامها در برابر اثرات تصادفی هستند، استفاده می کنیم. دز معادل مؤثر H_E از رابطه زیر به دست می آید

$$H_E = \sum W_T H_T \quad (10.8)$$

که در آن W_T ضریب وزنی بافت T در جدول ۱۰۸ و H_T دز معادل بافت T است.

جدول ۱۰۸ ضرایب وزنی و احتمال خطر برای اثرات تصادفی در بافتها.

بافت	احتمال خطر به ازای هر Sv	ملاحظات	W_T
غدد تناسلی	4.0×10^{-3}	احتمال آسیب ژنتیکی در ۲ نسل اول	۰.۲۵
پستان	2.5×10^{-3}	میانگین برای کلیه سنها در هر دو جنس	۰.۱۵
مغز قرمز استخوان	2.0×10^{-3}	سرطان خون	۰.۱۲
ریه	2.0×10^{-3}	سرطان	۰.۱۲
غده تیروئید	5.0×10^{-4}	سرطان بدخیم	۰.۰۳
سطح استخوان	5.0×10^{-4}	سرطان استخوان	۰.۰۳
بافت‌های دیگر	5.0×10^{-3}	سرطان، با فرض اینکه هر بافت بیش از ۱/۵ این مقدار کل دریافت نکند	۰.۳۰
خطر کل	1.65×10^{-2}		

مثال ۱۰۸

در نتیجه یک حادثه آزمایشگاهی مقدار $(10 \mu\text{Ci})$ 370000 Bq ید 131 وارد بدن یک تکنیسین شده است. از این مقدار $(2 \mu\text{Ci})$ 74 kBq در تیروئید و $(8 \mu\text{Ci})$ 296 kBq به طور یکنواخت در بقیه بدن توزیع شده است. متخصص فیزیک بهداشت با استفاده از داده‌های غلظت سنجی زیستی و روش بدن دز تیروئید را برابر (123 rad) 123 mGy و دز تمام بدن را برابر (26 mrad) 26 mGy محاسبه کرده است.

(الف) دز معادل مؤثر تکنیسین چقدر بوده است؟

(ب) آیا پرتوگیری تکنیسین بیش از حدودی است که با معیارهای ICRP توصیه شده است؟

حل: (الف) دز معادل مؤثر را می‌توان از معادله (۱۰۸) و با استفاده از ضرایب وزنی 0.03 برای تیروئید (جدول ۱۰۸) و 0.97 برای بقیه بدن محاسبه کرد

$$H_E = 0.03 \times 123 + 0.97 \times 0.26$$

$$= 394 \text{ mSv}$$

(ب) چون دز معادل مؤثر تمام بدن از 50mSv و دز معادل مؤثر تیروئید از 500mSv بسیار کمتر است معلوم می‌شود که دز حاصل از این پرتوگیری تصادفی از مقدار پیشنهادی ICRP تجاوز نمی‌کند. اما اینکه دز کل سالانه این شخص پس از این پرتوگیری از حدود پیشنهادی ICRP تجاوز می‌کند یا نه، بستگی به سابقه پرتوگیری او دارد.

پرتوگیری افراد جامعه

کمیسیون ICRP حد دز معادل تمام بدن را برای افراد جامعه برابر 5mSv (500mrem) در سال پیشنهاد کرده و معتقد است که دز متوسط اعضای هر گروه تحت تابش کمتر از این حد خواهد بود. ICRP خاطر نشان می‌کند که چنانچه تعداد چشمه‌ها افزایش یابد، این دز متوسط نیز افزایش می‌یابد، حتی اگر دز هیچ‌یک از افراد از حد دز معادل 5mSv تجاوز نکند. به همین دلیل این کمیسیون توصیه می‌کند که مقامات ملی یا محلی باید به منظور کنترل دز معادل جمعی کل بر تمام چشمه‌های پرتودهی نظارت دائم داشته باشند.

پرتوگیری جماعات

کمیسیون ICRP هیچ توصیه خاصی برای حد دز جماعات نکرده است. در عوض، تأکید کرده است که هر مقداری که انسان به صورت مصنوعی به دز جامعه اضافه می‌کند باید به خاطر سودمندیش قابل توجیه باشد، و اینکه حد دز دریافتی افراد جامعه به دز معادل حاصل از تمام منابع مربوط می‌شود. از این رو، حد دز هر جماعتی عبارت از مجموع چندین دز کمینه مورد نیاز نه یک تک دز معادل کل مجاز که بتوان آن را میان چندین چشمه تقسیم کرد.

پرتوگیری پزشکی

کمیسیون ICRP هیچ حد دز خاصی را برای پرتوگیری پزشکی توصیه نکرده است، اما تأکید کرده است که فقط در صورت لزوم باید پرتوگیری انجام شود. این پرتوگیری باید بر اساس سودمندی‌هایی که از طریق دیگر قابل حصول نیست قابل توجیه باشد، و مقدار آن باید به حداقلی محدود شود که با سودمندی پزشکی حاصل سازگار است.

حد مجاز ورود به بدن (ALI)

توصیه‌های کنونی (۱۹۸۱) ICRP، نه بار بدنی بیشینه مجاز را مشخص کرده است نه تراکمهای بیشینه مجاز را. ولی در این توصیه‌ها حد سالانه ورود ایزوتوپهای پرتوزا که با ALI مشخص می‌شود تعیین شده است. ALI را الزامات اساسی مربوط به اثرات تصادفی

و اثرات غیر تصادفی محدود می‌کند و بنا به تعریف ورود سالانه‌ای است که به يك دز معادل انباشته مؤثر (يك انباشت دز ۵۰ ساله) که از $50\text{mSv}(5\text{rem})$ بیشتر نیست و به يك دز معادل سالانه در هر اندام یا بافت که از $500\text{mSv}(50\text{rem})$ بیشتر نیست، منجر می‌شود. این گفته‌ها را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\sum_T W_T H_{50,T} \leq 0.05 \text{ Sv} \quad (2.8)$$

$$H_{50,T} \leq 0.05 \text{ Sv} \quad \text{برای تمام بافتها} \quad (3.8)$$

که در آن W_T ضریب وزنی جدول ۱۰.۸ و $H_{50,T}$ دز معادل انباشته کل در بافت T در نتیجه ورود مواد پرتوزا از تمام چشمه‌ها در طول سالهای مورد بحث است. معادله (۲.۸) نشان می‌دهد که به خاطر کنترل اثرات تصادفی، دز مؤثر تمام بدن از حد سالانه تجاوز نمی‌کند، و معادله (۳.۸) نشان می‌دهد که به خاطر کنترل آستانه زیانبار اثرات غیر تصادفی، دز هر بافت یا هر اندام همواره کمتر از حد سالانه است. لازم به یادآوری است که حد ورود مربوط به ورود کل ایزوتوپهای پرتوزا در طول هر سال است و کمیسیون ICRP برای آهنگ ورود موردی محدودیتی قائل نشده است. به عبارت دیگر، ممکن است این حد در يك مرحله ورود به مقدار خیلی زیاد، یا در مراحل متعدد ولی به مقدار خیلی کم حاصل شود. اصول مربوط به کاربرد معادلات (۲.۸) و (۳.۸) را می‌توان با محاسبه ALI در بلع ^{137}Cs توضیح داد.

معمولاً ترکیبات معمولی سزیم به سرعت و تقریباً به طور کامل در دستگاه گوارش جذب و پس از جذب در سراسر بدن به صورت یکنواخت توزیع می‌شود. در هیچ موردی تراکم سزیم در هر اندام یا بافت بیشتر از تراکم آن در ماهیچه نیست. بازماند سزیم در بدن دستکم در طول ۱۴۰۰ روز اول را می‌توان با معادله دو قسمتی زیر محاسبه کرد

$$q(\tau) = 0.1 q_0 e^{-0.693\tau/2} + 0.9 q_0 e^{-0.693\tau/110} \quad [33.6]$$

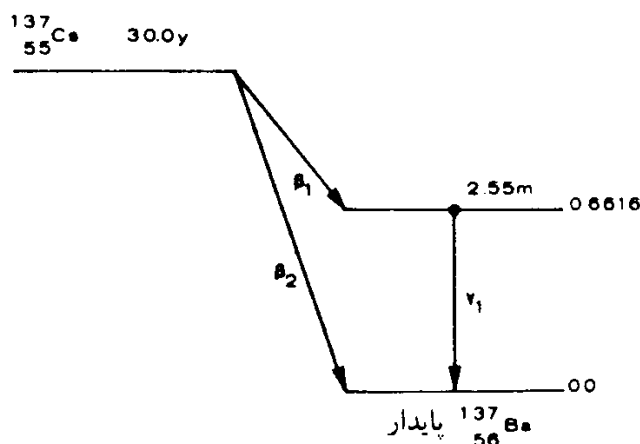
که در آن q_0 مقدار سزیمی است که ابتدا وارد بدن می‌شود. از این معادله معلوم می‌شود که ۱۰٪ سزیم به قسمتهایی وارد می‌شود که با نیمه عمر ۲ روزه از آنجا خارج می‌شود، و ۹۰٪ دیگر به قسمتهایی می‌رود که نیمه عمر باقیماندن آن در بافت ۱۱۰ روز است. چون نیمه عمر پرتو شناختی ^{137}Cs ، برابر ۳۰ سال و خیلی بیشتر از نیمه عمر در هر يك از این دو قسمت است، نیمه عمر مؤثر در این دو قسمت اساساً برابر نیمه عمر زیست شناختی آنهاست. بنابراین، آهنگهای دفع از این دو بخش همان طور که از معادله (۲۶.۶) محاسبه شده است به ترتیب برابر با 0.0347 و 0.0063 در روز خواهد بود. اما دز کل ^{137}Cs برابر معادله (۳۶.۶) برابر مجموع دزهای هر کدام از این دو قسمت است. برای رعایت معیار اثرات تصادفی، دز معادل نباید از $50\text{mSv}(5\text{rem})$ تجاوز کند، و چون ^{137}Cs در واقع يك گسیلنده بتا-گاما است، این مقدار متناظر با $50\text{mGy}(5\text{rad})$ خواهد بود

$$D = \frac{\dot{D}_{10}}{\lambda_1} + \frac{\dot{D}_{20}}{\lambda_2} = 0.055 \text{ Gy} \quad (4.8)$$

که در آن $\dot{D}_{10}$ و $\dot{D}_{20}$ به ترتیب آهنگ دز اولیه در قسمت اول و قسمت دوم و λ_1 و λ_2 آهنگهای دفع مؤثر آنهاست. این آهنگهای دز اولیه ^{137}Cs با توزیع یکنواخت رادی می توان با استفاده از مقدار مناسب انرژی مؤثر ویژه (SEE) برای بتا و گاما از معادله (۲۰.۶) به دست آورد. همچنین SEE به ازای هر تبدیل را می توان به کمک کسرهای جذب شده φ در جدول ۸.۶ و داده های خروجی ^{137}Cs شکل ۲.۸ محاسبه کرد. با تلفیق داده های جدول ۸.۶ و شکل ۲.۸، چنانکه در جدول ۲.۸ ملاحظه می شود، SEE بر حسب MeV به ازای هر تبدیل در هر کیلوگرم از معادله زیر به دست می آید

$$\text{SEE} = \frac{\sum n_i E_i \varphi_i}{m} \quad (5.8)$$

چون تابش به صورت یکنواخت در تمام بدن جذب شده است، مقدار m در اینجا برابر ۷۰ kg خواهد بود. بنا بر این مقدار به جای m و 4394 MeV/t از جدول ۲.۸ در معادله (۵.۸) خواهیم داشت



سزیم ۱۳۷

وایاشی بتای منفی

داده های خروجی

	تعداد میانگین میانگین فروپاشی / (n _i)	انرژی (E _i)	Δ _i (g-rad) (μCi-h)
Beta-1	0.935	0.1749	0.3483
Beta-2	0.065	0.4272	0.0591
Gamma-1	0.840	0.6616	1.1837
K int. con. electron, gamma-1	0.0781	0.6242	0.1038
L int. con. electron, gamma-1	0.0140	0.6560	0.0196
M int. con. electron, gamma-1	0.0031	0.6605	0.0044
K α-1 x-rays	0.0374	0.0322	0.0026
K α-2 x-rays	0.0194	0.0318	0.0013
K β-1 x-rays	0.0105	0.0364	0.0008
K β-2 x-rays	0.0022	0.0374	0.0002
L x-rays	0.0127	0.0045	0.0001
KLL Auger electron	0.0057	0.0263	0.0003
KLX Auger electron	0.0025	0.0308	0.0002
KXY Auger electron	0.0004	0.0353	0.0000
LMM Auger electron	0.0718	0.0034	0.0005
MAX Auger electron	0.173	0.0011	0.0004

داده های ورودی				
داده های ورودی	درصد تابش	انرژی گذار (MeV) فروپاشی	دیگر پارامترهای هسته ای	
Beta-1	93.5	0.514	First forbidden unique	
Beta-2	6.5	1.176	Second forbidden	
Gamma-1	93.5	0.6616	M4, α _K = 0.093, K/L = 5.6, K/M = 25.5	

شکل ۲.۸ طرح تبدیل و داده های ورودی و خروجی برای دزسنجی ^{137}Cs

جدول ۲۰۸ محاسبه انرژی مؤثر و ویژه (SEE) برای پرتوگیری داخلی تمام بدن از ^{137}Cs .

تابش	تبدیل / تعداد	انرژی میانگین ذره / E_i , MeV	انرژی جذب شده کسر جذب شده ϕ_i	(MeV/t) _i
	n_i			
β_1	0.935	0.1749	1	0.1635
β_2	0.065	0.4272	1	0.0278
γ	0.840	0.6616	0.334	0.1856
الکترون تبدیل داخلی K	0.0781	0.6242	1	0.0488
الکترون تبدیل داخلی L	0.0140	0.6560	1	0.0092
الکترون تبدیل داخلی M	0.0031	0.6605	1	0.0020
پرتو $\alpha - 1$ K	0.0374	0.0322	0.750	0.0009
پرتو $\alpha - 2$ K	0.0194	0.0318	0.754	0.0005
پرتو $\beta - 1$ K	0.0105	0.0364	0.703	0.0003
پرتو $\beta - 2$ K	0.0022	0.0374	0.690	0.0001
پرتو α L	0.0127	0.0045	1	0.0001
الکترون اوزه KLL	0.0057	0.0263	1	0.0001
الکترون اوزه KXY	0.0025	0.0308	1	0.0000
الکترون اوزه KLX	0.0004	0.0353	1	0.0001
الکترون اوزه LMM	0.0718	0.0034	1	0.0002
الکترون اوزه MXY	0.173	0.0011	1	0.0002
				$\Sigma = 0.4394 \text{ MeV/t}$

$$\text{SSE} = \frac{0.4394 \text{ MeV/t}}{1 \text{ kg}} = 4.394 \times 10^{-3} \frac{\text{MeV}}{\text{kg}}$$

با قراردادن این مقدار به جای SEE و فعالیت $q = 1 \text{ Bq}$ در معادله (۲۰.۶) نتیجه می شود

$$\dot{D} = \frac{q \text{ Bq} \times 1 \text{ tps/Bq} \times \text{SEE} \frac{\text{MeV}}{\text{t}} / \text{kg} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}}{1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \text{Gy}}$$

$$\times 8.76 \times 10^4 \text{ s/d} \quad [20.6]$$

سرانجام آهنگ دز به ازای واحد فعالیت ^{137}Cs به صورت زیر به دست می آید

$$D = 9 \times 10^{-11} \frac{\text{Gy}}{\text{d}} / \text{Bq}$$

معادله (۲۰.۶) نشان می دهد که فعالیت جذب شده در قسمت دوم ۹ برابر قسمت اول است. با قراردادن مقادیر مناسب در معادله (۲۰.۸) می توان مقدار ^{137}Cs بلعیده شده را که منجر به دز 5 Gy (5 rad)، متناظر با دز معادل 5 Sv (5 rem) می شود محاسبه کرد

$$0.05 \text{ Gy} = \frac{q \text{ Bq} \times 9 \times 10^{-11} \frac{\text{Gy}}{\text{d}} / \text{Bq}}{0.327 \text{ d}} + \frac{9q \text{ Bq} \times 9 \times 10^{-11} \frac{\text{Gy}}{\text{d}} / \text{Bq}}{6.3 \times 10^{-2} \text{ d}^{-1}}$$

$$q = 3.9 \times 10^5 \text{ Bq}$$

$$\therefore \text{ALI (تصادفی)} = q + 9q = 3.9 \times 10^6 \text{ Bq}$$

چون سزیم در تمام بدن به طور یکنواخت توزیع می‌شود، محاسبه مشابهی برای ALI بر مبنای اثرات غیرتصادفی که در آن حد دز معادل سالانه برابر 50 rem (0.5 Sv) است، مقدار خیلی بیشتری از مقدار مبتنی بر اثرات تصادفی به دست می‌دهد. برای اینکه معادلات (۲.۸) و (۳.۸) برقرار باشند باید از ALI مربوط به اثرات تصادفی استفاده کنیم. چون ALI به نزدیکترین عدد کامل گرد می‌شود، مقدار ALI مربوط به ^{137}Cs بلعیده شده در نشریه شماره ۳۰ ICRP برابر 4 MBq ثبت شده است.

محاسبه ALI مربوط به ^{137}Cs بلعیده شده به دلیل توزیع یکنواخت سزیم ساده بود، اما عموماً ایزوتوپ پرتوزا در داخل بدن به صورت یکنواخت توزیع نمی‌شود، و در نتیجه دزهای داده شده به بافت‌های گوناگون از طرف اندام‌های چشمه‌ای مختلف باید با مقدار پرتوزایی مربوط به خود آنها محاسبه شوند. برای سهولت می‌توان این محاسبات را به کمک کامپیوتر انجام داد. به عنوان مثال، دز معادل هر بافت یا اندام مفروض T پس از گذشت زمان t از ورود ایزوتوپ پرتوزا با معادله زیر به دست می‌آید

$$H(t, T) = \frac{1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \sum \tilde{A}_{i,t} \times \text{SEE}_i(T \leftarrow S) \times 1 \text{ t/Bq.s} \times Q_i}{1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \text{Gy}} \quad (6.8)$$

که در آن $\tilde{A}_{i,t}$ فعالیت جمعی اندام‌های چشمه‌ای مختلف بر حسب Bq.s ، SEE_i انرژی مؤثر ویژه بر حسب MeV به ازای هر تبدیل در هر کیلو گرم، و Q_i ضریب کیفیت تابش بر حسب Sv/Gy است. معادله (۶.۸) را می‌توان به منظور تعیین دز معادل حاصل از ورود 1 Bq حل کرد. مقدار ALI بر اساس اثرات تصادفی از معادله زیر به دست می‌آید

$$\text{ALI (تصادفی)} = \frac{0.05 \text{ Sv}}{\sum W_T H_{50, T} \text{ Sv/Bq}} \quad (7.8)$$

برای تعیین اینکه آیا مقدار ALI تصادفی به حد خود رسیده است یا نه، آن را با معیار زیر مقایسه می‌کنیم

$$\text{ALI (تصادفی)} \text{ Bq} \times (H_{50, T})_{\max} \text{ Sv/Bq} \leq 0.5 \text{ Sv} \quad (8.8)$$

اگر حاصلضرب ALI تصادفی و دز معادل انباشته در اندام یا بافتی که بیشترین دز معادل را از ورود پرتوزایی می‌گیرد $((H_{50, T})_{\max})$ از 50 rem (50 Sv) تجاوز نکند، مقدار ALI تصادفی بسیار بزرگ است، و به جای آن باید یک مقدار ALI مبتنی بر اثرات غیر تصادفی را که با رابطه زیر داده می‌شود محاسبه کرد

$$ALI (\text{غیر تصادفی}) = \frac{0.05 \text{ Sv}}{(H_{50, T})_{\max} \text{ Sv/Bq}} \quad (9.8)$$

مثال ۲۰۸

استنشاق 1 Bq از ذرات معلق نسبتاً انحلال‌ناپذیر ^{239}Pu (از نوع Y، با نیمه‌عمر احتباس ریوی بسیار طولانی) به دز معادلهای انباشته زیر از طریق ^{239}Pu و دخترهسته‌هایش، $H_{50, T}$ در اندامهای مربوط منجر شده است: ریه $3.72 \times 10^{-4} \text{ Sv}$ ، مغز قرمز استخوان $7.6 \times 10^{-5} \text{ Sv}$ ، سطوح استخوان $9.5 \times 10^{-4} \text{ Sv}$ ، و کبد $2.1 \times 10^{-4} \text{ Sv}$. مقدار ALI مربوط به تنفس این نوع ^{239}Pu را حساب کنید.
حل: ابتدا دز معادل انباشته شده وزنی را حساب می‌کنیم:

بافت	$H_{50, T}, \text{Sv}$	$\times$	$W_T =$	$H_{50, T} (\text{وزنی})$
ریه‌ها	3.72×10^{-4}		0.12	3.9×10^{-5}
مغز قرمز استخوان	7.6×10^{-5}		0.12	9.1×10^{-6}
سطوح استخوان	9.5×10^{-4}		0.03	2.9×10^{-5}
کبد	2.1×10^{-4}		0.06	1.2×10^{-5}

$$\sum W_T H_{50, T} = 8.9 \times 10^{-5} \text{ Sv/Bq}$$

مقدار ALI مبتنی بر اثرات تصادفی از معادله (۷.۸) محاسبه می‌شود

$$ALI (\text{تصادفی}) = \frac{0.05 \text{ Sv}}{8.9 \times 10^{-5} \text{ Sv/Bq}} = 5.6 \times 10^2 \text{ Bq}$$

اکنون باید دید که نتیجه حاصل با معیاری که از معادله (۸.۸) به دست می‌آید سازگاری دارد یا نه. یعنی، آیا بافتی که بزرگترین دز را دریافت می‌کند و در این مثال سطوح استخوان است، بیشتر از 50 Sv از استنشاق ALI تصادفی ^{239}Pu دز معادل می‌گیرد یا نه؟ بنا به معادله (۸.۸) حاصلضرب ALI تصادفی و بزرگترین مقدار دز معادل انباشته

شده در هر بافت یا اندام نمی‌تواند از 5 Sv بیشتر باشد. در این حالت داریم

$$5 \text{ Sv} = 5 \times 10^{-4} \text{ Sv/Bq} \times 9.5 \times 10^2 \text{ Bq} \times 5.6 \times 10^2$$

چون جواب حاصل، یعنی 5 Sv ، از معیار معادله (۸.۸) بیشتر است، می‌توان با استفاده از حد دز معادل غیر تصادفی، مقدار ALI استنشاق شده را معین کرد

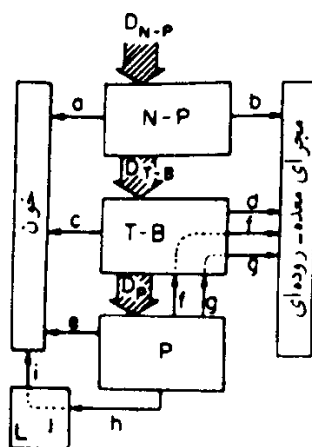
$$\begin{aligned} \text{ALI (غیر تصادفی)} &= \frac{5 \text{ Sv}}{(H_{50, T})_{\max} \text{ Sv/Bq}} \\ &= \frac{5 \text{ Sv}}{9.5 \times 10^{-4} \text{ Sv/Bq}} = 5.3 \times 10^2 \text{ Bq} \end{aligned}$$

به دلیل عدم قطعیت در مدل‌های سوخت و ساز، ALI ها فقط با يك رقم با معنی داده می‌شوند. از این رو، ALI مربوط به استنشاق ^{239}Pu «انحلال ناپذیر» در بخش ۱ نشریه شماره ۳۵ ICRP برابر $5 \times 10^2 \text{ Bq}$ ثبت شده است.

استنشاق مواد پرتوزا

مقدار ALI مربوط به ایزوتوپ‌های پرتوزای استنشاق شده بريك مدل چندبخشی ریه مبتنی است. در این مدل، رسوب ذرات معلق در مجاری تنفسی تابع توزیع اندازه ذرات معلق تنفس شده، و آهنگ زدایش ذرات رسوب کرده تابع محل رسوب و ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی این ذرات است. شکل ۳.۸ نمودار مدل ریه است که سه ناحیه را که در آنها گرد و غبار ممکن است رسوب کنند، نشان می‌دهد. این سه ناحیه عبارت‌اند از: گلو و بینی (N-P) نای و نایژه (T-B) و ناحیه ریه (P) که مجاری عمیق تنفسی را که محل تبادل گازهاست نشان می‌دهد. ناحیه N-P به نوبه خود به دو قسمت a و b تقسیم می‌شود. قسمت a نشان‌دهنده آن قسمت از گرد و غبار رسوب کرده در ناحیه N-P است که پس از حل شدن مستقیماً داخل خون می‌شود، در حالی که قسمت b گرد و غبار زوده شده از ناحیه N-P به مجرای معده و روده در اثر بلع را نشان می‌دهد. ناحیه T-B نیز دو قسمت c و d دارد که از آنجا نیز ذرات معلق رسوبی با دو سازوکار مشابه، انحلال و جذب در خون و انتقال مکانیکی، به مجرای روده و معده (از طریق مری به حلق و از آنجا با بلع به مجرای روده و معده) زوده می‌شوند. ناحیه ریه، P، از ۴ بخش e، f، g، و h تشکیل شده است: قسمت e به انحلال و جذب در خون اختصاص دارد، و قسمت‌های f و g نشان‌دهنده مسیر انتقال ذرات معلق حل نشده از راه مجرای تنفسی فوقانی به معده و روده یعنی ناحیه T-B است. پاکسازی قسمت f بر اثر انتقال مکانیکی ناشی از نیروهای نامتوازن در خلال گردش‌های تنفسی، و قسمت g توسط درشت‌خواران آلوئولی که به ناحیه T-B منتقل می‌شوند انجام می‌شود. مواد موجود در قسمت h به داخل گره‌های لنفی ریه تخلیه می‌شود. این گره‌ها با دو قسمت

ناحية	المتغير	دسته					
		D		W		Y	
		T	F	T	F	T	F
N-P ($D_{N-P}=0.30$)	a	0.01	0.5	0.01	0.1	0.01	0.01
	b	0.01	0.5	0.40	0.9	0.40	0.99
T-B ($D_{T-B}=0.08$)	c	0.01	0.95	0.01	0.5	0.01	0.01
	d	0.2	0.05	0.2	0.5	0.2	0.99
P ($D_P=0.25$)	e	0.5	0.8	50	0.15	500	0.05
	f	n.a.	n.a.	1.0	0.4	1.0	0.4
	g	n.a.	n.a.	50	0.4	500	0.4
	h	0.5	0.2	50	0.05	500	0.15
L	i	0.5	1.0	50	1.0	1000	0.9
	j	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	∞	0.1



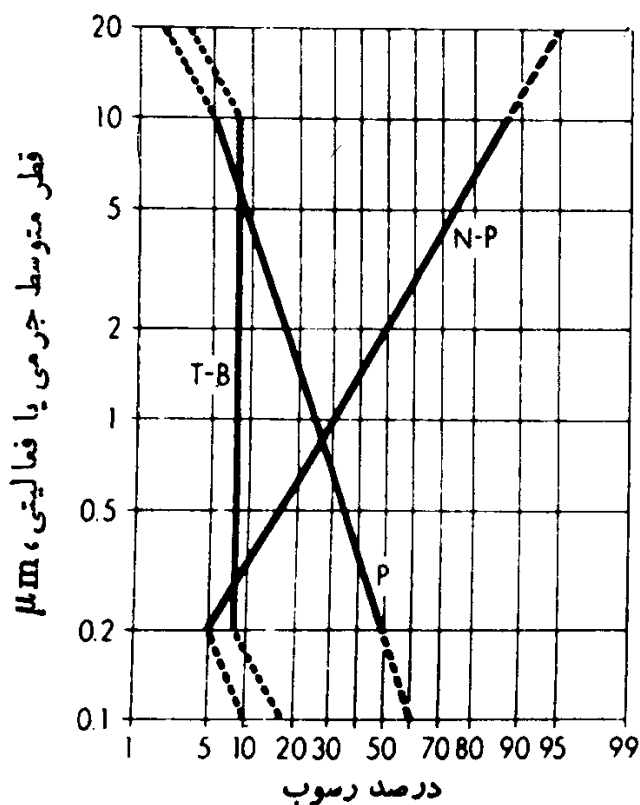
شکل ۳۰۸ مدل دفع مجاری تنفسی که برای محاسبهٔ دز مواد پر توزای تنفس شده به کار می‌رود. چنانکه در جدول این شکل ملاحظه می‌شود، مقادیر مربوط به نیمه‌عمرهای دفع T_{a-j} و کسرهای مربوط به قسمت‌های مختلف برای هر سه دسته مواد مشخص شده است. مقادیر مربوط به D_P و D_{T-B} ، D_{N-P} (در ستون سمت چپ) رسوبهای ناحیه‌ای مبتنی بر ذرات معلق با AMAD برابر با $1 \mu m$ هستند. این نمودار مسیرهای مختلف دفع در مدل، $a-j$ را در ارتباط با رسوبهای D_{T-B} ، D_{N-P} و D_P و سه ناحیهٔ تنفسی P ، $T-B$ ، $N-P$ نشان می‌دهد. حروف $n.a.$ علامت عدم کاربرد است.

i و j نشان داده شده‌اند. قسمت i بعد از انحلال ذرات معلق آنها را به داخل خون می‌ریزد، و قسمت j به‌طور دائم بعضی از ذرات معلق کاملاً غیرقابل حل را درخود نگه می‌دارد.

مقدار واقعی ذرات معلق رسوب یافته‌ای که به‌یک‌ی از طرق گفته شده زدوده می‌شود و آهنگ دفع آنها به ترکیب شیمیایی ذرات معلق بستگی دارد. اما چون تعیین هر کدام از این عوامل برای ترکیب عناصر مختلف دشوار است، می‌توان ترکیبات گوناگون کلیه عناصر شیمیایی را با توجه به معیارهایی که در شکل ۳۰۸ آمده است در یکی از سه دسته D، W، و Y قرار داد. دسته D ذرات معلق هستند که سرعت از مجاری عمیق تنفسی با نیمه عمر دفع حدود یک روز یا کسری از یک روز و ذرات دسته W با نیمه عمر دفع حدود چند هفته زدوده می‌شوند، و ذرات دسته Y نزدیک به یک سال در ریه‌ها باقی می‌مانند. از ذرات مختلف گرد و غباری که ممکن است به گره‌های لنفی منتقل شوند، فقط ذرات دسته Y برای همیشه در این گره‌ها باقی می‌مانند. در فیزیک بهداشت، ریه و گره‌های لنفی ریه به عنوان یک اندام واحد در نظر گرفته می‌شوند. یعنی فعالیت پر توایی در ریه و گره‌های لنفی به هم افزوده می‌شوند، و در محاسبات دز ذرات معلق استنشاق شده نیز از وزن کل ریه‌ها و گره‌های لنفی استفاده می‌کنند. توصیه‌های ICRP در مورد ذرات معلق تنفس شده مبتنی بر تنفس و رسوب ذرات معلق هستند که قطر متوسط فعالیت آنها در حدود $1\ \mu\text{m}$ و انحراف

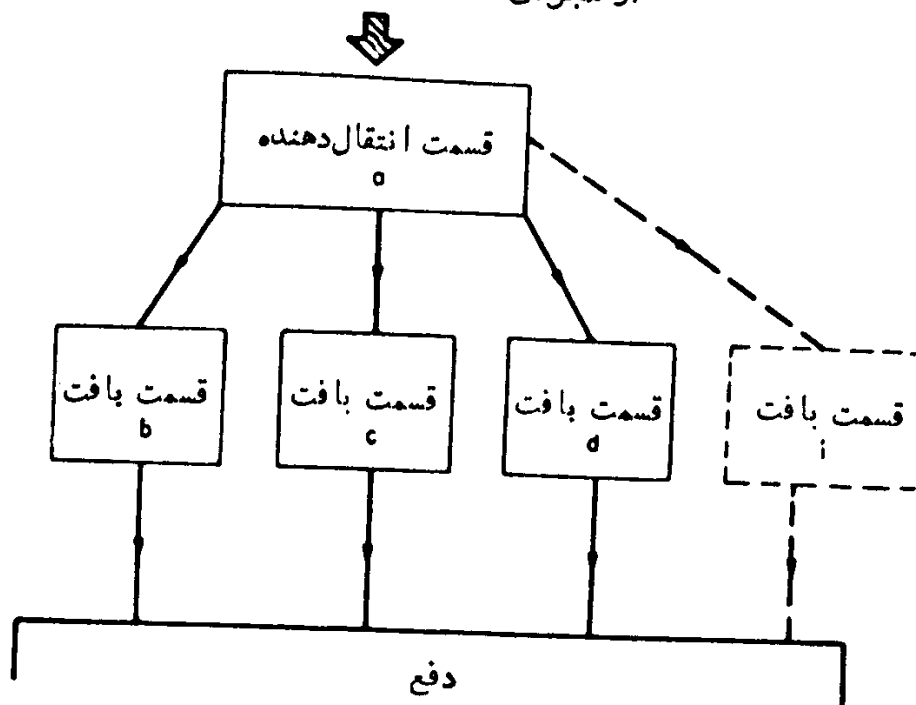
معیار هندسی آنها ۴ است. این توزیع فرضی به رسوب ۳۵٪ گرد و غبار تنفس شده در ناحیه N-P، ۸٪ در ناحیه T-B، و ۲۵٪ در ناحیه P منجر می‌شود و ۳۷٪ باقیمانده با هوای بازدم بیرون می‌آید. رسوب سایر توزیعهای اندازه‌ای را در شکل ۴۰۸ می‌توان مشاهده کرد.

ماده‌ای که از ریه بالا می‌آید و با عمل بلع وارد مجرای معده - روده و از آنجا احتمالاً همراه با مدفوع خارج می‌شود، قسمتهای مختلف این مجرا و سایر اندامهای مسیر را تحت تابش‌دهی قرار می‌دهد. از طرف دیگر این امکان وجود دارد که قسمتی از آن در ناحیه معده - روده حل و از طریق مایعات بدن به سایر اندامها منتقل شود و در آنها رسوب کند (شکل ۵۰۸). به این ترتیب، به عنوان مثال، جیوه غیر آلی در کلیه‌ها، ید در تیروئید، استرونیسم و رادیم در استخوان، و پلوتونیوم در کبد و استخوان رسوب می‌کنند. مجرای



شکل ۴۰۸ مدل ICRP برای رسوب گرد و غبار. درصد جرم یا پرتوزایی ذرات معلق که در نواحی N-P، T-B، و P رسوب می‌کنند برحسب قطر متوسط آئرودینامیک جرمی یا فعالیتی (AMAD یا MMAD) توزیع این ذرات نشان داده شده است. این مدل برای توزیعهای ذرات معلق در نظر گرفته شده است که AMAD یا MMAD آنها بین ۰.۲ μm و ۱۰ μm و انحراف معیارهای هندسی آنها کمتر از ۴.۵ باشد. برآوردهای فرضی رسوب ذرات با قطر بیشتر و کمتر با خط چین مشخص شده است. در موارد توزیع غیرعادی که AMAD یا MMAD آنها بیش از ۲۰ μm است، رسوب N-P را می‌توان کامل فرض کرد. این مدل درباره ذرات معلق که AMAD یا MMAD آنها کمتر از ۰.۱ μm است به کار نمی‌رود.

از مجرای معده - روده ای و دستگاه تنفسی



شکل ۵۰۸ مدلی که معمولاً برای توصیف نقل و انتقالات نوکلیدهای پرتوزا به کادمی رود.

معده-روده به کمک مدل به چهار ناحیه مجزا با پارامترهای جنبشی مربوط به خود تقسیم می شود، به گونه ای که می توان دز هر اندامی را در خلال عبور نوکلیدهای پرتوزا محاسبه کرد. به همین ترتیب با استفاده از یک یا چند معادله دیفرانسیل خطی مرتبه اول می توان دز مربوط به اندامهایی را که نوکلیدهای پرتوزا در آنها رسوب می کنند به دست آورد. برای نشان دادن طرز کاربرد این مدل ریه، مقدار ALI ناشی از استنشاق ^{137}Cs را با استفاده از ذرات معلقی که قطر آئرودینامیکی متوسط فعالیت آنها $1\text{ }\mu\text{m}$ و انحراف معیار آنها کمتر از ۴۵ است محاسبه می کنیم. از شکل ۴۰۸ دیده می شود که در حدود ۶۳٪ از گرد و غبار استنشاق شده به صورت زیر در مجاری تنفسی توزیع می شوند

N-P: ۳۰٪

T-B: ۹٪

P: ۲۵٪

و ۳۷٪ از طریق بازدم خارج می شوند. در محاسبه ALI ذرات معلقی ترکیبات سزیم را از دسته دفع D در نظر می گیریم، زیرا این ذرات سرعت از ریه زوده می شوند. در جدول ۳۰۸ مقدار رسوب در هر قسمت و آهنگ دفع متناظر آنها آمده است. در اینجا دز معادل حاصل از جذب هر 1 Bq را محاسبه می کنیم، که با استفاده از آن می توان حداکثر استنشاق را بر حسب Bq تعیین کرد. برای این کار، ابتدا دزی را که

جدول ۳.۸ تعداد تبدیل در هر ثانیه برای مواد رسوبی در چندین قسمت ریه پس از تنفس ۱ Bq از ^{137}Cs و آهنسنگ دفع از هر قسمت.

قسمت	$A_s(^{\circ}), \text{t/s}$	$T_{1/2}, \text{d}$	λ_E, d^{-1}
c (TB $\rightarrow$ خون)	۰.۰۵۷۶	۰.۰۰۱	۶۹.۳
d (TB $\rightarrow$ GI)	۰.۰۵۰۴	۰.۰۲	۳.۴۷
e (P $\rightarrow$ خون)	۰.۰۲۰۰	۰.۰۵	۱.۳۹
f (P $\rightarrow$ LN)	۰.۰۵۰	۰.۰۵	۱.۳۹
LN	۰.۰۵۰	۰.۰۵	۱.۳۹

^{137}Cs رسوب کرده در ریه به ریه می‌دهد، و بعد از آن دز حاصل از توزیع ^{137}Cs در بقیه بدن را که ریه‌ها را هم تحت تابش قرار می‌دهد محاسبه می‌کنیم. سپس دز مؤثر تمام بدن را که از تنفس ماده پرتوزا حاصل می‌شود به دست می‌آوریم. باید توجه داشت که ماده رسوب کرده در ناحیه N-P مستقیماً در دز میان-ریه‌ای سهمی ندارد، و سهم آن در این ناحیه صرفاً به دلیل حضور آن در بقیه قسمت‌های بدن است. دز میان-ریه‌ای حاصل از جذب ۱ Bq فقط ناشی از رسوب ^{137}Cs به مقدار ۰.۰۸ Bq در ناحیه T-B و مقدار ۰.۲۵ Bq در ناحیه P است.

دز معادل انباشته در هدف T پس از رسوب ۱ Bq از معادله (۶.۸) به دست می‌آید

$$H_{50, T} = \frac{1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \sum \tilde{A}_i \times \text{SEE}_i(T \leftarrow S) \times 1 \text{ t/Bq} \cdot \text{s} \times Q_i}{1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \text{Gy}}$$

[۶.۸]

مقدار انرژی ویژه SEE (ریه $\leftarrow$ ریه) با استفاده از داده‌های خروجی ^{137}Cs (شکل ۲.۸) همراه با کسرهای جذب شده ویژه در پیوست ۴ محاسبه می‌شود. جدول ۳.۸ داده‌های لازم برای محاسبه SEE را برای الکترون‌ها و فوتون‌ها، و مجموع آنها که برابر 283 MeV در هر کیلوگرم به ازای هر تبدیل می‌شود، نشان می‌دهد.

اکنون باید تعداد تبدیلاتی را که طی ۵۰ سال پس از جذب ۱ Bq در ریه انباشته می‌شود محاسبه کنیم. برای این کار تعداد تبدیلات در هر یک از قسمت‌های ریه را با هم جمع می‌کنیم. تعداد تبدیلات انباشته در هر قسمت پس از مدت زمان t با رابطه زیر به دست می‌آید

جدول ۴.۸ داده‌های لازم برای محاسبه SEE در ریه در اثر تنفس ^{137}Cs .

تابش	تبدیل / تعداد n_i	انرژی میانگین ذره / E_i, MeV	ریه ← ریه		تمام بدن ← ریه	
			کسر جذب شده ویژه Φ_i, kg^{-1}	$\frac{\text{SEE}_i}{t} \text{MeV/kg}$	کسر جذب شده ویژه Φ_i, kg^{-1}	$\frac{\text{SEE}_i}{t} \text{MeV/kg}$
β_1	0.935	0.1749	1	1.64E-01	1.43E-02	2.34E-03
β_2	0.065	0.4272	1	2.78E-02	1.43E-02	3.97E-04
γ	0.840	0.6616	4.86E-02	2.70E-02	5.11E-03	2.84E-03
K الکترون تبدیل داخلی	0.0781	0.6242	1	4.88E-02	1.43E-02	6.97E-04
L الکترون تبدیل داخلی	0.0140	0.6560	1	9.18E-03	1.43E-02	1.31E-04
M الکترون تبدیل داخلی	0.0031	0.6605	1	1.52E-03	1.43E-02	2.93E-05
K α -1 پرتو	0.0374	0.0322	2.26E-01	2.72E-04	1.22E-02	1.47E-05
K α -2 پرتو	0.0194	0.0318	2.26E-01	1.39E-04	1.22E-02	7.53E-06
K β -1 پرتو	0.0105	0.0364	2.17E-01	8.29E-05	1.13E-02	4.32E-06
K β -2 پرتو	0.0022	0.0374	2.15E-01	1.77E-05	1.10E-02	9.05E-07
L پرتو	0.0127	0.0045	1	5.72E-05	1.43E-02	8.12E-07
KLL الکترون اوزه	0.0057	0.0263	1	1.50E-04	1.43E-02	2.14E-06
KXY الکترون اوزه	0.0025	0.0308	1	7.7E-05	1.43E-02	1.10E-06
KLX الکترون اوزه	0.0004	0.0353	1	1.41E-05	1.43E-02	2.02E-07
LMM الکترون اوزه	0.0718	0.0034	1	2.44E-04	1.43E-02	3.49E-06
MXY الکترون اوزه	0.173	0.0011	1	1.90E-04	1.43E-02	2.72E-06

$$\sum \text{SEE}_i (\text{ریه} \leftarrow \text{ریه}) = 0.280 \frac{\text{MeV}}{t} / \text{kg}$$

$$\sum \text{SEE}_i (\text{تمام بدن} \leftarrow \text{ریه}) = 6.47\text{E-}03 \frac{\text{MeV}}{t} / \text{kg}$$

$$\tilde{A}(t) = \frac{A_s(0)}{\lambda_E} (1 - e^{-\lambda_E t}) \quad (10.8)$$

که در آن $A_s(0)$ فعالیت اولیه رسوب در هر قسمت و λ_E ثابت دفع مؤثر در آن قسمت است. برای یک مدت نسبتاً طولانی در مقایسه با نیمه عمر مؤثر ایزوتوپ، معادله (۱۰.۸) به صورت (۵۶.۶) درمی آید

$$\tilde{A} = \frac{A_s(0)}{\lambda_E} \quad [56.6]$$

تعداد کل تبدیلات انباشته در ریه از جمع تبدیلات انباشته در قسمت‌های مختلف به دست می آید

$$\tilde{A} = \sum \frac{A_{si}}{\lambda_{Ei}} \quad (11.8)$$

چون ۵۰ سال در مقایسه با نیمه‌عمر مؤثر سزیم در هر يك از نواحی ریه يك مدت زمان خیلی طولانی است، تعداد تبدیلات انباشته در ریه از معادله (۱۱.۸) و با مقادیر جدول ۳.۸ محاسبه می‌شود

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= ۸۰۶۴ \times ۱۰^۴ \text{ s/d} \left\{ \left(\frac{۰.۰۰۷۶ \text{ t/s}}{۶۹۰۳ \text{ d}^{-۱}} \right) + \left(\frac{۰.۰۰۰۴ \text{ t/s}}{۳۰۴۷ \text{ d}^{-۱}} \right) + \left(\frac{۰.۰۲۰۰ \text{ t/s}}{۱۰۳۹ \text{ d}^{-۱}} \right) \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{۰.۰۰۵۰ \text{ t/s}}{۱۰۳۹ \text{ d}^{-۱}} \right) + \left(\frac{۰.۰۰۵۰ \text{ t/s}}{۱۰۳۹ \text{ d}^{-۱}} \right) \right\} \\ &= ۱۰۹ \times ۱۰^۴ \text{ تبدیل} \end{aligned}$$

دز معادل انباشته در اثر ^{۱۳۷}Cs در ریه با استفاده از معادله (۶.۸) محاسبه می‌شود

$$\begin{aligned} H_{50} &= \frac{۱۰۶ \times ۱۰^{-۱۳} \text{ J/MeV} \times ۱۰۹ \times ۱۰^۴ \text{ t} \times ۰.۰۲۸۰ \frac{\text{MeV}}{\text{kg}} / \text{t} \times ۱ \text{ Sv/Gy}}{۱ \frac{\text{J}}{\text{Bq}} / \text{Gy}} \\ &= ۸۰۶ \times ۱۰^{-۱۰} \text{ Sv} \end{aligned}$$

مرحله بعدی محاسبه دز معادل انباشته در اثر ^{۱۳۷}Cs بقیه بدن در ریه است. مقدار کل جذب شده در بدن شامل مقدار جذب شده در ناحیه N-P و ریه است که به صورت زیر به دست می‌آید

$$۰.۰۳ + ۰.۰۰۸ + ۰.۰۲۵ = ۰.۰۶۳ \text{ Bq}$$

بازماند ^{۱۳۷}Cs در بدن از معادله (۳۳.۶) به دست می‌آید. این معادله نشان می‌دهد که ۱۰٪ سزیم جذب شده، یعنی ۰.۰۶۳ Bq ، به ناحیه‌ای انتقال می‌یابد که آهنگ دفع آن ۰.۰۳۴۷ در روز و ۹۰٪ دیگر، یعنی ۰.۰۵۶۷ Bq ، به ناحیه‌ای می‌رود که آهنگ دفع آن ۰.۰۰۶۳ در روز است. تعداد کل تبدیلات در بدن در اثر رسوب ۰.۰۶۳ Bq در مجاری تنفسی که پس از استنشاق ۱ Bq حاصل می‌شود و سپس به تمام بدن انتقال می‌یابد از معادله (۱۱.۸) به دست می‌آید

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= ۸۰۶۴ \times ۱۰^۴ \text{ s/d} \left(\frac{۰.۰۰۶۳ \text{ t/s}}{۰.۰۳۴۷ \text{ d}^{-۱}} + \frac{۰.۰۵۶۷ \text{ t/s}}{۰.۰۰۰۶۳ \text{ d}^{-۱}} \right) \\ &= ۷۰۸ \times ۱۰^۶ \text{ تبدیل} \end{aligned}$$

با استفاده از کسرهای جذب ویژه گاما و پرتو ایکس برای (تمام بدن ← ریه) که از

درونیابی مقادیر پیوست شماره ۴ به دست می‌آید، و کسر جذب ویژه 1.23×10^{-2} مربوط به پرتو بتا و الکترون که به کمک معادله (۵۸.۶) محاسبه می‌شود، و سپس با جمع SEE مربوط به هر تابش مانند آنچه در جدول ۴.۸ آمده است، مقدار SEE (تمام بدن ← ریه) را برابر $6.47 \times 10^{-3} \text{ MeV}$ به ازای هر تبدیل در هر کیلو گرم به دست می‌آوریم. دز معادل انباشته در ریه را در اثر ^{137}Cs بدن با معادله (۶.۸) محاسبه می‌کنیم

$$H_{\Delta_0} =$$

$$\frac{1.23 \times 10^{-12} \text{ J/MeV} \times 7.78 \times 10^6 \text{ t} \times 6.47 \times 10^{-3} \frac{\text{MeV}}{\text{kg}} / \text{t} \times 1 \text{ Sv/Gy}}{1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \text{Gy}}$$

$$= 8.72 \times 10^{-9} \text{ Sv}$$

بنابراین، دز معادل کل انباشته در ریه‌ها در پی استنشاق 1 Bq سزیم ^{137}Cs عبارت است از

$$H_{\Delta_0, L} = 8.76 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq} + 8.72 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq} \\ = 9.73 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$$

قبلاً هنگام محاسبه ALI بلعیده شده دیدیم که دز معادل انباشته ^{137}Cs که در تمام بدن به صورت یکنواخت توزیع شده باشد برابر است با

$$\frac{0.05 \text{ Sv}}{3.79 \times 10^6 \text{ Bq}} = 1.33 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$$

چون در استنشاق 1 Bq فقط مقدار 63 Bq در بدن جذب می‌شود، با استفاده از ضرایب وزنی 12 برای ریه و 88 برای بقیه بدن، دز معادل انباشته مؤثر ناشی از استنشاق 1 Bq سزیم ^{137}Cs را به صورت زیر به دست می‌آوریم

$$\sum W_T H_{\Delta_0, T} = 0.12 \times 9.73 \times 10^{-9} + 0.88 (0.88 \times 1.33 \times 10^{-8}) \\ = 8.73 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$$

مقدار ALI ناشی از اثرات تصادفی از معادله (۷.۸) محاسبه می‌شود

$$\text{ALI (تصادفی)} = \frac{0.05 \text{ Sv}}{8.73 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}} = 6 \times 10^6 \text{ Bq}$$

اینک باید ببینیم که آیا ALI مبتنی بر اثرات تصادفی ^{137}Cs به دز معادل انباشته‌ای بیشتر از 5 Sv در هر اندام یا بافت منجر می‌شود یا نه. چون سزیمی که از ریه به

بدن می‌رود به‌طور یکنواخت در تمام بدن توزیع می‌شود، دز معادل انباشته در هر بافت از $1.3 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$ که به تمام بدن می‌رسد بیشتر نخواهد شد. حاصلضرب ALI تصادفی و دز معادل انباشته تمام بدن در اثر رسوب 6.3 Bq در بدن عبارت است از

$$6 \times 10^6 \text{ Bq} \times 0.63 \times 1.3 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq} = 0.005 \text{ Sv}$$

چون ALI مبتنی بر اثرات تصادفی منجر به دز معادل انباشته‌ای کمتر از 0.005 Sv می‌شود، مقدار ALI تصادفی قابل استفاده است، و این امر جذب ^{137}Cs در اثر استنشاق را به مقدار $6 \times 10^6 \text{ Bq}$ در سال محدود می‌کند.

هنگام محاسبه ALI مربوط به ^{137}Cs فرض کردیم که تمامی تابشهای جدولهای ۲۰۸ و ۴۰۸ از تبدیل سزیم به باریم حاصل می‌شوند. این گفته از لحاظ فنی درست نیست، زیرا $^{137\text{m}}\text{Ba}$ که نیمه عمر آن ۲٫۵۵ دقیقه است پرتوگامای 1.1 MeV را تولید می‌کند. اما این ایزوتوپ، به دلیل خیلی کوتاه بودن نیمه عمرش، با مادر دراز عمر خود (۳۰ سال) به تعادل دیرپا می‌رسد. وانگهی باریم، به دلیل نیمه عمر خیلی کوتاهش، این فرصت را پیدا نمی‌کند که مسیر سوخت و ساز خودش را دنبال کند، بلکه همان مسیر سوخت و ساز سزیم را دنبال می‌کند. به همین دلایل، می‌توانیم $^{137\text{m}}\text{Ba}$ - ^{137}Cs را به عنوان یک چشمه منفرد در نظر بگیریم. در موارد تبدیلات پرتوزایی متوالی که در آنها دخترهسته‌ها فرصت تعقیب مسیرهای سوخت و ساز خود را دارند، سهم هر دختر در دز کل ناشی از تنفس یا بلع مادر، به‌طور جداگانه در محاسبه ALI در نظر گرفته می‌شود.

میزان تراکم تعیین شده در هوا (DAC)

مقدار ALI، که بر اساس حداکثر دز ناشی از اثرات تصادفی و غیر تصادفی محاسبه می‌شود، فقط حد جذب سالانه را مشخص می‌کند و با آهنگ جذب یا تراکم محیطی نوکلیدهای پرتوزا که به جذب کمک می‌کنند مربوط نمی‌شود. ولی در مواردی نظیر طراحی فنی و کنترل عملیات روزانه، شناخت تراکم محیطی نوکلیدهای پرتوزا ضرورت دارد. به همین مناسبت، میزان تراکم تعیین شده در هوا (DAC) برای آلودگیهای معلق در هوا تعریف شده است. DAC صرفاً میانگین تراکم جوی نوکلید پرتوزایی است که در یک فرد مرجع در مدت ۲۰۰۰ ساعت کار به مقدار جذب سالانه ALI منجر می‌شود. چون هر فردی ۲۰ لیتر هوا در هر دقیقه و ۲۴۰۰ متر مکعب هوا در مدت ۲۰۰۰ ساعت کار تنفس می‌کند، میزان تراکم تعیین شده برابر است با

$$\text{DAC} = \frac{\text{ALI}}{2400} \text{ Bq/m}^3 \quad (12.8)$$

از این رو، برای ^{137}Cs معلق در هوا که مقدار ALI تنفسی آن برابر $6 \times 10^6 \text{ Bq}$ است، میزان تراکم عبارت است از

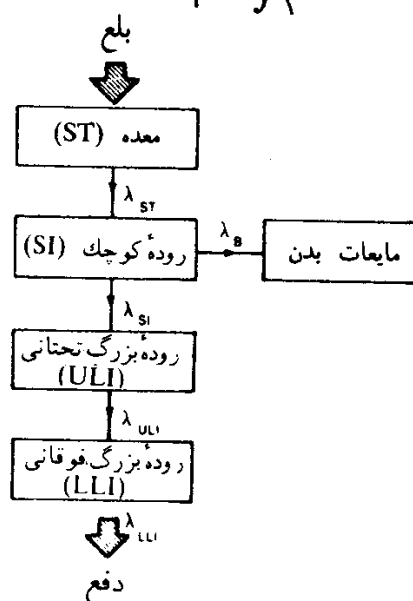
$$DAC = \frac{6 \times 10^6 \text{ Bq}}{274 \times 10^3 \text{ m}^3} = 215 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$$

که به مقدار $2 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$ گرد می‌شود.

مجرای معده - روده

در مواردی که نوکلیدهای پرتوزا بلعیده می‌شوند، مخصوصاً آنهایی که جذب ضعیفی در ناحیه معده و روده دارند، مجرای معده - روده یا بخشهایی از آن ممکن است بیشترین دز تابشی را دریافت کند. این دز را می‌توان بر اساس مدل چهار قسمتی شکل ۶.۸ محاسبه کرد. بنابراین مدل، نوکلید پرتوزا ابتدا وارد معده می‌شود و پس از عبور از روده کوچک، که قسمت عمده مایعات بدن در آنجا جذب می‌شود، به ترتیب از روده بزرگ فوقانی و تحتانی می‌گذرد و سرانجام فعالیت پرتوزایی بساقیمانده با مدفوع دفع می‌شود. آهنگ دفع از روده کوچک به مایعات بدن با رابطه زیر به دست می‌آید

$$\lambda_B = \frac{f_1 \lambda_{si}}{1 - f_1} \quad (13.8)$$



مجرای معده - روده	جرم جدارها (g)	جرم محتویات (g)	میانگین زمان ماندگاری (روز)	λ d^{-1}
معده (ST)	۱۵۰	۲۵۰	۱/۲۴	۲۴
روده بزرگ (SI)	۶۴۰	۴۰۰	۴/۲۴	۶
روده بزرگ فوقانی (ULI)	۲۱۰	۲۲۰	۱۳/۲۴	۱.۸
روده بزرگ تحتانی (LLI)	۱۶۰	۱۳۵	۲۴/۲۴	۱

شکل ۶.۸ مدل دزسنجی مجرای معده - روده.

که در آن f نسبت عناصر پایداری را که پس از بلع وارد مایعات بدن می‌شوند نشان می‌دهد.

هنگام محاسبات دز برای تعیین ALI فرض می‌کنیم که نوکلید پرتوزا در سراسر محتویات معده و روده به طور یکنواخت توزیع می‌شود و توزیع ماده در هر بخش آن طوری است که در شکل ۶.۸ دیده می‌شود. همچنین فرض می‌کنیم که حرکت محتویات در قسمتهای مختلف با جنبش‌شناسی مرتبه اول و مطابق آهنگ دفع شکل ۶.۸ صورت می‌گیرد. با این اطلاعات می‌توان میزان دز دریافتی جدارهای معده و روده را (که جرم آنها در شکل ۶.۸ آمده است) به ازای جذب هر بکرل، با استفاده از نسبتهای جذب ویژه مربوط، حساب کرد و سپس مقدار ALI را به دست آورد.

پرتوگیری مرکب

در محاسبه مقدار ALI مربوط به هر ایزوتوپ فرض می‌شود که پرتوگیری از هیچ ایزوتوپ دیگر و از هیچ مسیر دیگری، همچنین از تابش بیرونی، وجود ندارد. به طور کلی، هر کس که ممکن است از طریق تنفس یا بلع و یا از طریق تابش خارجی در معرض تابش چندین ایزوتوپ پرتوزای مختلف قرار بگیرد، در صورتی که بخواهد در محدوده دز توصیه شده باقی بماند باید معیار زیر را رعایت کند

$$\sum \frac{\text{دریافت از طریق تنفس}}{\text{ALI (تنفس)}} + \sum \frac{\text{دریافت از طریق بلع}}{\text{ALI (بلع)}} + \sum \frac{\text{دز بیرونی}}{\text{حد دز}} \leq 1 \quad (14.8)$$

مبنای مقررات ایمنی تابش

قبل از آنکه توصیه‌های سازمان ICRP در زمینه محدودیت دز در نشریه شماره ۲۶ این سازمان در سال ۱۹۷۷ منتشر شود، اغلب سازمانهای مسؤول در کشورهای مختلف جهان از توصیه‌های سازمان ICRP که در نشریه شماره ۲ (۱۹۵۹) و شماره ۹ (۱۹۶۵) منتشر شده بود، استفاده می‌کردند. در نشریه شماره ۲ عمده‌تاً ایزوتوپهای ورودی به داخل بدن، و در شماره ۹ حفاظت در برابر تابش و محدودیت دز بررسی شده بود. این توصیه‌ها با توجه به نیاز کشورهای مختلف تنظیم شده، و مقررات مبتنی بر آنها هم به همه کشورهای دنیا اعلام شده است که هم اکنون نیز (در سال ۱۹۸۲) همین مقررات مورد استفاده قرار می‌گیرد.

ICRP دو دسته پرتوگیری اصلی را در ارتباط با مسائل مربوط به ایمنی تابش به صورت زیر معرفی کرده است:

۱. پرتوگیری شغلی

(الف) بانوان دارای استعداد حاملگی

(ب) بانوان باردار
(ج) سایر کارگران تابش
۲. عموم افراد جامعه

حدود دز توصیه شده در جدول ۵.۸ آمده است.

دز سالانه (۵۰ mSv) ۵ rem، وقتی در طول يك دوره ۵۰ هفته ای به صورت یکنواخت توزیع شود، يك آهنگ دز هفنگسی برابر (۱ mSv) ۱۰۰ mrem به دست می دهد. این مقدار (۱ mSv) ۱۰۰ mrem را غالباً، به غلط، آهنگ بیشینه دز مجاز در نظرمی گیرند.

دز بیشینه قابل قبول، مجموع دزهای مربوط به انواع پرتوگیری خارجی و همچنین پرتوگیری داخلی ناشی از ایزوتوپهای داخل بدن را نیز شامل می شود. به عنوان مثال، هرگاه در بدن کارگری آنقدر ایزوتوپ پرتوزا رسوب کرده باشد که با آهنگ (۲۵ mSv) ۲۵ mrem در هفته دستگاه خونساز بدن او را تحت تابش قرار دهد،

جدول ۵.۸ خلاصه ای از حدود دز تابشی برای افراد مختلف.

بافت یا اندام	پرتوگیری حرفه ای دارند	حدود دز برای افراد جامعه
غدد تناسلی، مغز سرخ	* ۵ rem در سال	۵ rem در سال
استخوان	(۵۰ mSv در سال)	(۵ mSv در سال)
پوست، استخوان،	* ۳۰ rem در سال	** ۳ rem در سال
تیروئید	(۳۰۰ mSv در سال)	(۳۰ mSv در سال)
دستها و ساعدها،	* ۷۵ rem در سال	۷۵ rem در سال
پاها و مچها	(۷۵۰ mSv در سال)	(۷۵ mSv در سال)
سایر اندامها	* ۱۵ rem در سال	۱۵ rem در سال
	(۱۵۰ mSv در سال)	(۱۵ mSv در سال)

* در هر ربع سال حداکثر تا نصف حد دز سالانه را می توان قابل تحمل تلقی کرد. حد دز شکم برای زنانی که استعداد حاملگی دارند ۳ rem در هر ربع سال است، در حالی که دز شکم برای زنان باردار از هنگام تشخیص بارداری تا هنگام زایمان نباید از ۱ rem تجاوز کند.

** برای تیروئید بچه ها تا ۱۶ سالگی ۱۵ rem در سال است.

آنگاه دز مربوط به تابش خارجی او در هفته کمتر از (0.75 mSv) یا 75 mrem خواهد بود. معمولاً، در برنامه‌ریزیهای ایمنی تابش که در آنها پرتوگیری بر اثر بیش از یک ایزوتوپ پرتوزا از طریق تنفس و بلع و همچنین تابش خارجی باید در نظر گرفته شود، محیط‌کاری طوری کنترل می‌شود که شرط زیر برقرار بماند

$$\sum \frac{C_i(\text{هوا})}{\text{MPC}_i(\text{هوا})} + \sum \frac{C_i(\text{آب})}{\text{MPC}_i(\text{آب})} + \frac{\text{دز بیرونی (آهنگ)}}{\text{MPD (آهنگ)}} \leq 1 \quad (15.8)$$

که در آن $C_i(\text{هوا})$ و $C_i(\text{آب})$ تراکمهای محیطی واقعی ذامین ایزوتوپ در هوا و آب، $\text{MPC}_i(\text{هوا})$ و $\text{MPC}_i(\text{آب})$ بیشینه مجاز تراکمهای محیطی ذامین ایزوتوپ، و MPD بیشینه دز مجاز هستند.

حدود دزی که برای حفاظت در برابر تابش خارجی توصیه شده است، به دلیل سادگی تعیین دز ناشی از پرتوگیری در هر زمان مفروضی در میدانهای تابشی، از لحاظ زیست‌شناختی با معنی و مستقیماً قابل کاربرد است. ولی برای حفاظت در برابر تابش داخلی ناشی از تنفس یا بلع مواد پرتوزا باید از حدود محاسبه شده استفاده کرد. این حدود محاسبه شده، بسته به نوع ایزوتوپ مورد نظر، مبتنی بر دو معیار مختلف است. برای استخوان - خواهانی چون ^{90}Sr ، ^{227}Ac ، ^{232}Th ، ^{231}Pa ، ^{237}Np ، ^{239}Pu ، و جز آنها که تابش بتا یا آلفا گسیل می‌کنند، حدود محاسبه شده بر مبنای مقایسه با ^{226}Ra و دختر هسته‌هایش محاسبه می‌شود. برای تمامی ایزوتوپهای پرتوزای دیگر، مقداری از ایزوتوپ محاسبه می‌شود که اگر در بدن رسوب کند و اگر تمام بدن، غدد تناسلی، یا دستگاه تولید خون اندام بحرانی باشد، دز معادل آن از 1 mSv (100 mrem) در هفته بیشتر نشود؛ یا اگر تیروئید اندام بحرانی باشد، دز معادل آن از 6 mSv (600 mrem) در هفته، و اگر سایر اندام یا بافتها اندام بحرانی باشند، دز معادل آن از 3 mSv (300 mrem) در هفته بیشتر نشود. (منظور از اندام بحرانی آن قسمت از بدن است که در شرایط مورد نظر بیشتر در معرض آسیب تابشی است). این مقدار ایزوتوپ پرتوزا را بیشینه مجاز بادر بدنی می‌گویند. در این صورت، با معلوم بودن جنبش‌شناسی سوخت و ساز این ایزوتوپ پرتوزا می‌توانیم آن تراکمهایی از ایزوتوپ را در هوا و آب محاسبه کنیم که بعد از پرتوگیری مداوم به انباشت بیشینه مجاز بادر بدنی منجر می‌شود. این تراکمهای محاسبه شده را بیشینه تراکمهای مجاز (MPC) در هوا و آب می‌نامند. کمیسیون ICRP در نشریه شماره ۲ خود بیشینه تراکمهای مجاز تمامی ایزوتوپهای پرتوزای شناخته شده را، با فرض پرتوگیری در تمام طول عمر، محاسبه و منتشر کرده است. در این گزارش توضیحات مفصلی درباره روش محاسبه تراکمهای مزبور همراه با عوامل فیزیکی و زیست‌شناختی لازم برای این محاسبات آمده است. در جدول ۶.۸ که از نشریه شماره ۲ استخراج شده است تعدادی از مقادیر بیشینه تراکم و بادر بدنی دیده می‌شود. چون محاسبه MPC بر اساس پرتوگیری پیوسته تمام عمر انجام می‌شود، هر پرتوگیری کوتاه مدت یا تصادفی از تراکمهای محیطی که از بیشینه‌های محاسبه شده بزرگتر باشد، لزوماً به این معنی نیست که شخص بیش از حد پرتوگیری کرده است.

جدول ۶.۸ بیشینه بار بدنی و تراکمهای مجاز نوکلیدهای پرتوزا در هوا و آب برای پرتوگیری شغلی.

بیشینه تراکمهای مجاز					بیشینه بار بدنی مجاز	اندام مرجع (الف)	نوکلید پرتوزا و نوع واپاشی
(MPC) _a	(MPC) _w	(MPC) _a	(MPC) _w	برای هفته‌ای ۱۶۸ ساعت (ب)			
μCi/cm ^۳	μCi/cm ^۳	μCi/cm ^۳	μCi/cm ^۳	برای هفته‌ای ۴۰ ساعت			
(MPC) _a	(MPC) _w	(MPC) _a	(MPC) _w	q(μC)	در تمام بدن	مشخص شده است	
μCi/cm ^۳	μCi/cm ^۳	μCi/cm ^۳	μCi/cm ^۳	μCi/cm ^۳			
^۳ H _۲ (H ^۳ O) (β ⁻)							
۵×۱۰ ^{-۶}	۰٫۰۳	۲×۱۰ ^{-۵}	۰٫۱	۱۰ ^۳	}	بافت بدن	محلول
۷×۱۰ ^{-۶}	۰٫۰۵	۲×۱۰ ^{-۵}	۰٫۲	۲×۱۰ ^۳		تمام بدن	
۴×۱۰ ^{-۴}		۲×۱۰ ^{-۳}			پوست	غوطه‌وری	(H ^۳)
^{۱۴} C(CO _۲) (β ⁻)							
۱۰ ^{-۶}	۸×۱۰ ^{-۳}	۲×۱۰ ^{-۶}	۰٫۰۲	۳۰۰	}	بافت چربی	محلول
۲×۱۰ ^{-۶}	۰٫۰۱	۵×۱۰ ^{-۶}	۰٫۰۳	۴۰۰		تمام بدن	
۲×۱۰ ^{-۶}	۰٫۰۱	۶×۱۰ ^{-۶}	۰٫۰۴	۴۰۰		استخوان	
۱۰ ^{-۳}		۵×۱۰ ^{-۵}			تمام بدن	غوطه‌وری	غوطه‌وری

جدول ۶۰۸ (ادامه)

$^{226}_{84}\text{Po}(\beta^-)$

استخوان	$2X 10^{-8}$	$2X 10^{-4}$	$7X 10^{-8}$	$5X 10^{-4}$	۶
نمای بدن	10^{-7}	$9X 10^{-4}$	$2X 10^{-7}$	$3X 10^{-7}$	۳۰
GI(LLI)	$2X 10^{-7}$	$9X 10^{-4}$	$6X 10^{-7}$	$2X 10^{-7}$	
کبد	$2X 10^{-7}$	$2X 10^{-7}$	$6X 10^{-7}$	$5X 10^{-7}$	۵۰
مغز	10^{-7}	$8X 10^{-7}$	$2X 10^{-8}$	۰.۰۵۲	۲۰۰
دیه	$2X 10^{-8}$		$8X 10^{-8}$		
GI(LLI)	$2X 10^{-8}$	$2X 10^{-4}$	10^{-7}	$7X 10^{-4}$	
استخوان	10^{-7}	$9X 10^{-8}$	$2X 10^{-8}$	$2X 10^{-4}$	۳۰
نمای بدن	$9X 10^{-8}$	$7X 10^{-4}$	$2X 10^{-7}$	$2X 10^{-7}$	۲۰۰
GI(LLI)	10^{-7}	$2X 10^{-7}$	$2X 10^{-8}$	۰.۰۵۱	
دیه	$2X 10^{-8}$		10^{-7}		
GI(LLI)	$2X 10^{-8}$	$2X 10^{-7}$	$9X 10^{-7}$	$5X 10^{-7}$	

$^{40}_{20}\text{Ca}(\beta^-)$

$^{54}_{24}\text{Cr}(\text{ec}, \gamma)$

$^{54}_{24}\text{Cr}(\text{ec}, \gamma)$					
GI(LLI)					
تمام بدن					
ریه					
پروستات					
تیر و تید					
کلیه					
محلول					
نامحلول					

$^{60}_{27}\text{Co}(\beta^-, \gamma)$

$^{60}_{27}\text{Co}(\beta^-, \gamma)$					
GI(LLI)					
تمام بدن					
لوزا الصده					
کبد					
طحال					
کلیه					
محلول					
نامحلول					

[illegible]

${}^3X\ 10^{-2}$	${}^2X\ 10^{-4}$	10^{-7}	${}^6X\ 10^{-4}$	
${}^2X\ 10^{-7}$		${}^6X\ 10^{-7}$		
$\left. \begin{array}{l} \text{GI(LLI)} \\ \text{دیه} \end{array} \right\} \text{نامحلول}$				

10^{-8}	10^{-4}	${}^3X\ 10^{-8}$	${}^3X\ 10^{-4}$	2
${}^9X\ 10^{-8}$	${}^4X\ 10^{-4}$	${}^3X\ 10^{-7}$	10^{-7}	
${}^6X\ 10^{-8}$	${}^7X\ 10^{-4}$	${}^2X\ 10^{-7}$	${}^2X\ 10^{-7}$	40
10^{-8}		${}^4X\ 10^{-8}$		
$\Delta X\ 10^{-8}$	${}^3X\ 10^{-4}$	10^{-7}	${}^8X\ 10^{-4}$	
$\left. \begin{array}{l} \text{استخوان} \\ \text{GI(LLI)} \\ \text{تمام بدن} \end{array} \right\} \text{محلول}$				

10^{-10}	10^{-2}	${}^3X\ 10^{-10}$	${}^4X\ 10^{-2}$	2
${}^3X\ 10^{-10}$	${}^4X\ 10^{-2}$	${}^9X\ 10^{-10}$	10^{-5}	20
10^{-7}	$\Delta X\ 10^{-4}$	${}^3X\ 10^{-7}$	10^{-3}	
${}^2X\ 10^{-9}$		$\Delta X\ 10^{-9}$		
${}^6X\ 10^{-8}$	${}^4X\ 10^{-4}$	${}^2X\ 10^{-7}$	10^{-3}	
$\left. \begin{array}{l} \text{دیه} \\ \text{GI(LLI)} \end{array} \right\} \text{نامحلول}$				

10^{-10}	10^{-2}	${}^3X\ 10^{-10}$	${}^4X\ 10^{-2}$	2
${}^3X\ 10^{-10}$	${}^4X\ 10^{-2}$	${}^9X\ 10^{-10}$	10^{-5}	20
10^{-7}	$\Delta X\ 10^{-4}$	${}^3X\ 10^{-7}$	10^{-3}	
${}^2X\ 10^{-9}$		$\Delta X\ 10^{-9}$		
${}^6X\ 10^{-8}$	${}^4X\ 10^{-4}$	${}^2X\ 10^{-7}$	10^{-3}	
$\left. \begin{array}{l} \text{استخوان} \\ \text{تمام بدن} \\ \text{GI(LLI)} \end{array} \right\} \text{محلول}$				

10^{-7}	${}^6X\ 10^{-4}$	${}^4X\ 10^{-7}$	${}^2X\ 10^{-3}$	
${}^4X\ 10^{-8}$	1	10^{-7}	3	20
${}^6X\ 10^{-8}$	2	${}^2X\ 10^{-7}$	4	30
${}^6X\ 10^{-8}$	2	${}^2X\ 10^{-7}$	4	30
${}^9X\ 10^{-8}$	2	${}^3X\ 10^{-7}$	6	40
10^{-7}	2	${}^3X\ 10^{-7}$	7	40
$\left. \begin{array}{l} \text{GI(LLI)} \\ \text{تمام بدن} \\ \text{استخوان} \\ \text{کلیه} \\ \text{کبد} \\ \text{طحال} \end{array} \right\} \text{محلول}$				

${}^{90}_{40}\text{Zr}(\beta^-, \gamma, e^-)$

${}^{88}_{38}\text{Sr}(\beta^-)$

${}^{88}_{38}\text{Sr}(\beta^-)$

$\left. \begin{array}{l} \text{ریشه} \\ \text{GI(LLI)} \end{array} \right\} \text{نامحلول}$ ${}_{41}^{95}\text{Nb}(\beta^-, \gamma)$					
10^{-8}	$2X 10^{-8}$	$2X 10^{-8}$	$2X 10^{-7}$		
10^{-7}	$6X 10^{-4}$	$2X 10^{-7}$	$2X 10^{-7}$		
$2X 10^{-7}$	10^{-7}	$6X 10^{-7}$	$2X 10^{-7}$	40	$\left. \begin{array}{l} \text{GI(LLI)} \\ \text{تمام بدن} \\ \text{کبد} \\ \text{کلیه} \\ \text{استخوان} \\ \text{طحال} \end{array} \right\} \text{محلول}$
$2X 10^{-7}$	4	$5X 10^{-7}$	10	60	
$2X 10^{-7}$	6	$7X 10^{-7}$	20	60	
$2X 10^{-7}$	6	$8X 10^{-7}$	20	60	
$2X 10^{-7}$	7	$9X 10^{-7}$	20	80	
$2X 10^{-7}$	7	10^{-7}	20	80	
$2X 10^{-7}$	10^{-7}	10^{-7}			
$2X 10^{-8}$	10^{-7}	$5X 10^{-7}$	$2X 10^{-7}$		$\left. \begin{array}{l} \text{ریشه} \\ \text{GI(LLI)} \end{array} \right\} \text{نامحلول}$ ${}_{44}^{94}\text{Ru}(\beta^-, \gamma)$
$2X 10^{-7}$	10^{-7}	$8X 10^{-8}$	$4X 10^{-4}$		
$5X 10^{-8}$	$4X 10^{-7}$	10^{-7}	0.001	3	$\left. \begin{array}{l} \text{GI(LLI)} \\ \text{کلیه} \\ \text{استخوان} \\ \text{تمام بدن} \end{array} \right\} \text{محلول}$
$2X 10^{-7}$	0.001	$5X 10^{-7}$	0.004	10	
$2X 10^{-7}$	0.002	$7X 10^{-7}$	0.006	10	

$2X 10^{-4}$	$6X 10^{-4}$	$3X 10^{-4}$	
$2X 10^{-4}$	10^{-4}	$6X 10^{-4}$	

$\left. \begin{array}{l} \text{دیه} \\ \text{GI(LLI)} \end{array} \right\}$ نامحلول

$3X 10^{-4}$	$2X 10^{-4}$	$9X 10^{-4}$	$6X 10^{-4}$	0.7
$3X 10^{-4}$	$2X 10^{-4}$	$8X 10^{-4}$	$5X 10^{-4}$	50
$2X 10^{-4}$	0.01	$7X 10^{-4}$	0.03	
10^{-4}	$6X 10^{-4}$	$3X 10^{-4}$	$2X 10^{-4}$	
10^{-4}		$3X 10^{-4}$		

$^{131}_{53}\text{I}(\beta^-, \gamma, e^-)$
 $\left. \begin{array}{l} \text{تیر و تید} \\ \text{تمام بدن} \\ \text{GI(LLI)} \end{array} \right\}$ محلول
 $\left. \begin{array}{l} \text{دیه} \\ \text{GI(LLI)} \end{array} \right\}$ نامحلول

$2X 10^{-4}$	$2X 10^{-4}$	$6X 10^{-4}$	$4X 10^{-4}$	30
$3X 10^{-4}$	$2X 10^{-4}$	$8X 10^{-4}$	$5X 10^{-4}$	40
$3X 10^{-4}$	$2X 10^{-4}$	$9X 10^{-4}$	$6X 10^{-4}$	50
$4X 10^{-4}$	$2X 10^{-4}$	10^{-4}	$7X 10^{-4}$	50
$7X 10^{-4}$	$5X 10^{-4}$	$2X 10^{-4}$	10^{-4}	100
$8X 10^{-4}$	$5X 10^{-4}$	$2X 10^{-4}$	10^{-4}	100
$2X 10^{-4}$	$2X 10^{-4}$	$6X 10^{-4}$	$5X 10^{-4}$	200
$2X 10^{-4}$	$8X 10^{-4}$	$5X 10^{-4}$	0.02	

$^{137}_{55}\text{Cs}(\beta, \gamma, e^-)$
 $\left. \begin{array}{l} \text{تمام بدن} \\ \text{کبد} \\ \text{طحال} \\ \text{ماهیچه} \\ \text{استخوان} \\ \text{کلیه} \\ \text{دیه} \\ \text{GI(SI)} \end{array} \right\}$ محلول

$\left. \begin{array}{l} \text{دیه} \\ \text{GI(LLI)} \end{array} \right\}$ نامحلول

جدول ۴۰۸ (ادامه)

$^{144}_{58}\text{Ce}(\alpha, \beta^-, \gamma)$

GI(LLI)				
استخوان	10^{-4}	8×10^{-8}	3×10^{-4}	Δ
کبد	3×10^{-4}	10^{-8}	0.2	Δ
کلیه	4×10^{-4}	0.1	0.3	Δ
تمام بدن	7×10^{-4}	0.2	0.5	10
	10^{-8}	0.3	3×10^{-8}	20
	2×10^{-4}	4×10^{-4}		
	2×10^{-8}	10^{-4}	3×10^{-4}	
ریشه				
نامحلول				
GI(LLI)				

$^{144}_{61}\text{Pm}(\alpha, \beta^-)$

GI(LLI)				
استخوان	5×10^{-7}	2×10^{-3}	10^{-7}	4×10^{-3}
کلیه	2×10^{-8}	0.5	4×10^{-8}	1
تمام بدن	7×10^{-8}	2	2×10^{-7}	4
کبد	10^{-7}	2	3×10^{-7}	7
	10^{-7}	3	4×10^{-7}	8
	3×10^{-8}		10^{-7}	
	2×10^{-7}	2×10^{-3}	10^{-8}	4×10^{-3}
ریشه				
نامحلول				
GI(LLI)				

$^{182}_{77}\text{Ta}(\beta^-, \gamma)$

$9X10^{-1}$	$4X10^{-4}$	$3X10^{-7}$	10^{-2}	γ
10^{-1}	0.3	$4X10^{-2}$	0.9	γ
$3X10^{-1}$	0.7	$8X10^{-1}$	2	20
$3X10^{-1}$	0.7	$9X10^{-1}$	2	20
$5X10^{-1}$	1	10^{-7}	4	40
$9X10^{-1}$	2	$3X10^{-7}$	6	50
$7X10^{-1}$		$2X10^{-1}$		
$7X10^{-1}$		$2X10^{-7}$	10^{-2}	

$\left. \begin{array}{l} \text{GI(LLI)} \\ \text{کبد} \\ \text{کلیه} \\ \text{تمام بدن} \\ \text{طحال} \\ \text{استخوان} \end{array} \right\} \text{مطلوب}$

$\left. \begin{array}{l} \text{دیه} \\ \text{GI(LLI)} \end{array} \right\} \text{نامطلوب}$

$^{192}_{77}\text{Ir}(\beta^-, \gamma)$

$9X10^{-1}$	$4X10^{-4}$	$3X10^{-7}$	10^{-2}	6
$4X10^{-1}$	10^{-2}	10^{-7}	$4X10^{-2}$	7
$5X10^{-1}$	10^{-2}	10^{-7}	$4X10^{-2}$	8
$6X10^{-1}$	$2X10^{-2}$	$2X10^{-7}$	$5X10^{-2}$	10
10^{-7}	$4X10^{-2}$	$4X10^{-7}$	0.01	20
$9X10^{-1}$		$3X10^{-1}$		
$6X10^{-1}$		$2X10^{-7}$	10^{-2}	

$\left. \begin{array}{l} \text{GI(LLI)} \\ \text{کلیه} \\ \text{طحال} \\ \text{کبد} \\ \text{تمام بدن} \end{array} \right\} \text{مطلوب}$

$\left. \begin{array}{l} \text{دیه} \\ \text{GI(LLI)} \end{array} \right\} \text{نامطلوب}$

جدول ۴.۸ (ادامه)

$^{198}_{79}\text{Au}(\beta^-, \gamma)$				
$\left. \begin{array}{l} \text{GI(LLI)} \\ \text{کلیه} \\ \text{تمام بدن} \\ \text{طحال} \\ \text{کبد} \end{array} \right\} \text{محلول}$				
10^{-7}	$\Delta X 10^{-2}$	$2X 10^{-7}$	$2X 10^{-3}$	
$4X 10^{-7}$	0.002	$2X 10^{-2}$	0.007	20
$2X 10^{-2}$	0.004	$2X 10^{-2}$	0.1	20
$2X 10^{-2}$	0.007	$4X 10^{-2}$	0.2	40
$2X 10^{-4}$	0.1	10^{-6}	0.3	80
$4X 10^{-4}$	$\Delta X 10^{-2}$	$2X 10^{-7}$	10^{-3}	
$2X 10^{-7}$		$4X 10^{-7}$		
10^{-4}		$2X 10^{-4}$		
$\left. \begin{array}{l} \text{GI(LLI)} \\ \text{ریه} \end{array} \right\} \text{نامحلول}$				
10^{-4}		$2X 10^{-4}$		
$^{223}_{86}\text{Rn}^{(2)}(\alpha, \beta, \gamma)$				
$^{223}_{88}\text{Ra}(\alpha, \beta^-, \gamma)$				
10^{-11}	10^{-7}	$2X 10^{-11}$	$2X 10^{-7}$	0.1
$2X 10^{-11}$	$2X 10^{-7}$	$\Delta X 10^{-11}$	$4X 10^{-7}$	0.2
10^{-7}	$\Delta X 10^{-2}$	$2X 10^{-7}$	10^{-3}	
$\left. \begin{array}{l} \text{استخوان} \\ \text{تمام بدن} \\ \text{GI(LLI)} \end{array} \right\} \text{محلول}$				

GI(LLI) نامحلولى $^{238}_{92}\text{U}(\alpha, \beta^-, \gamma)$

$6X 10^{-8}$	$3X 10^{-4}$	$2X 10^{-7}$	$4X 10^{-4}$	
$6X 10^{-8}$	$3X 10^{-4}$	$2X 10^{-10}$	$8X 10^{-4}$	
$2X 10^{-10}$	$2X 10^{-7}$	$5X 10^{-10}$	0.001	0.003
$2X 10^{-10}$	$5X 10^{-7}$	$6X 10^{-10}$	0.001	0.006
$6X 10^{-10}$	0.001	$2X 10^{-9}$	0.004	0.02

GI(LLI)
 کلیه
 استخوان
 تمام بدن
 محلول

$2X 10^{-11}$		10^{-10}		
$5X 10^{-8}$	$3X 10^{-4}$	10^{-7}	$8X 10^{-4}$	

GI(LLI)
 ریه
 نامحلولى

$^{238}_{92}\text{U}(\alpha, \gamma, e^-)$

$8X 10^{-8}$	$2X 10^{-4}$	$2X 10^{-7}$	10^{-7}	
$3X 10^{-11}$	$6X 10^{-4}$	$7X 10^{-11}$	$2X 10^{-7}$	$5X 10^{-7}$
$2X 10^{-10}$	$5X 10^{-7}$	$6X 10^{-10}$	0.001	0.006
$6X 10^{-10}$	0.001	$2X 10^{-9}$	0.004	0.05
$5X 10^{-11}$		10^{-10}		
$6X 10^{-8}$	$2X 10^{-4}$	$2X 10^{-7}$	10^{-7}	

GI(LLI)
 کلیه
 استخوان
 تمام بدن
 ریه
 نامحلولى

$^{239}\text{Pu}(\alpha, \gamma)$

	استخوان				
	کبد	کلیه	GI(LLI)	تمام بدن	
6×10^{-13}	5×10^{-5}	2×10^{-12}	10^{-4}	0.04	محلول
2×10^{-12}	2×10^{-4}	7×10^{-12}	5×10^{-4}	0.4	
3×10^{-12}	2×10^{-4}	9×10^{-12}	7×10^{-4}	0.5	
6×10^{-8}	3×10^{-4}	2×10^{-7}	8×10^{-4}		
5×10^{-12}	3×10^{-4}	10^{-11}	10^{-3}	0.4	دیه نامحلول
10^{-11}		4×10^{-11}			
5×10^{-8}	3×10^{-4}	2×10^{-7}	8×10^{-4}		

(الف) علائم اختصاری S, GI, SI, LLI و LLI به ترتیب مجاری ممتد-روده، ممتد، روده بزرگ فوقانی و تحتانی را نشان می‌دهد.

(ب) باید توجه داشت که مقادیر MPC برای 168 ساعت در هفته همیشه مضارب دقیقی از مقادیر 40 ساعت در هفته نیست، دلیل این موضوع گرد کردن مقادیر محاسبه شده به یک عدد درست و در بعضی موارد هم ناشی از تفاوتهای تکنیکی است که در گزارش ICRP بحث شده است. به دلیل خطاهای موجود در پیشتر داده‌های زیست‌شناختی و به دلیل تفاوتهای فردی، این اختلافات مهم تلقی نمی‌شوند. مقادیر MPC منبسط به هفته‌ای 40 ساعت به عنوان معیار پذیرش در هفته در پذیرش پیوسته و برای کل افراد جامعه مورد استفاده است.

(ج) فرض بر این است که مقدار دختر-این وتوهای پرتوزای ^{229}Rn و ^{220}Rn پس از مقدار آنها در هوای تصفیه نشده است. دخترهسته‌های سایر این وتوهای به عنوان جزئی از مواد ورودی به بدن در نظر گرفته نمی‌شوند. این نوع این وتوها، اگر وجود داشته باشند، باید بر اساس قواعد مخلوطها بررسی می‌شوند.

محاسبه MPC در آب آشامیدنی بر اساس حد دز اندام بحرانی

با مثال ساده‌ای می‌توان اصول حاکم بر محاسبه بیشینه تراکم مجاز در آب آشامیدنی را توضیح داد. در این محاسبه فرض می‌شود که ایزوتوپ پرتوزا در يك یا چند «بخش» یا اندام بدن انباشته شده‌است. در اکثر موارد زمان رسوب در اندام مورد نظر را می‌توان نسبت به زمانی که ایزوتوپ در اندام باقی می‌ماند، لحظه‌ای در نظر گرفت. این ایزوتوپ، بعد از رسوب با آهنگی که به نیمه عمر مؤثر آن بستگی دارد دفع می‌شود. در صورتی که عبور از اندامها یا بافت‌های بعدی (نظیر کلیه، کبد، و جز آنها) در مقایسه با آهنگ دفع از اندام اولیه سریعتر باشد، می‌توان آهنگ دفع را غالب تلقی کرد که در این حالت دفع از بدن از جنبش‌شناسی مرتبه اول پیروی می‌کند. در این ساده‌ترین حالت، می‌توان احتباس ایزوتوپ را در بدن با معادله زیر توصیف کرد

$$Q = Q_0 e^{-\lambda_E t} \quad [25.6]$$

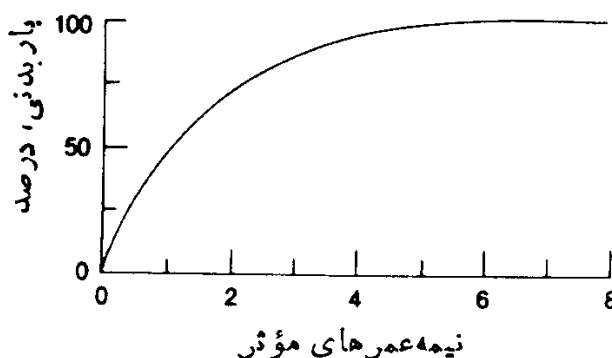
که در آن Q فعالیت باقیمانده در زمان t پس از رسوب Q_0 ، و λ_E ثابت مؤثر دفع است. اگر ورود ایزوتوپ پرتوزا به بدن به‌طور پیوسته صورت بگیرد، انباشت ایزوتوپ از معادله زیر به دست می‌آید

$$Q = \frac{K}{\lambda_E} (1 - e^{-\lambda_E t}) \quad (16.8)$$

که در آن K مقدار فعالیت وارد شده در واحد زمان، مثلاً بر حسب بکرل در روز است. شکل ۷.۸ نمایش هندسی معادله (۱۶.۸) است. باید توجه داشت به همان نسبتی که t افزایش می‌یابد $e^{-\lambda_E t}$ کم می‌شود، و بار بدنی Q به مقدار حدی خود نزدیک می‌شود

$$Q_\infty = \frac{K}{\lambda_E} \quad (17.8)$$

در عمل رسیدن به این حد پس از حدود ۶ نیمه عمر مؤثر صورت می‌گیرد. در این هنگام،



شکل ۷.۸ تولید و انباشت ایزوتوپ پرتوزا در بدن بر اثر ورود پیوسته به بدن.

می‌توان گفت که حالت پایدار، که در آن مقدار فعالیت جذب شده با مقدار فعالیت دفع شده برابر است، برقرار شده است.

در محاسبه بیشینه تراکم مجاز برای هرایزوتوپ پرتوزا در آب آشامیدنی، باید داده‌های فیزیکی و زیست‌شناختی معینی به شرح زیر در دست باشد:

الف) داده‌های فیزیکی

۱. نوع تابش (α, β, γ)

۲. انرژی تابش

۳. نیمه عمر پرتو شناختی

ب) داده‌های زیست‌شناختی

۱. شناخت اندام بحرانی

۲. آهنگ دفع زیست‌شناختی اندام بحرانی

۳. کسر فعالیت بلعیده شده که به صورت منظم رسوب می‌کند
به عنوان مثال، در نشریه شماره ۲ ICRP در مورد ^{131}I چنین آمده است:
گسیلنده بتا-گاما

انرژی مؤثر برابر 0.23 MeV به ازای هر تبدیل

نیمه عمر پرتو شناختی ۸ روز

اندام بحرانی تیروئید به وزن 0.02 kg

نیمه عمر زیست‌شناختی برابر ۱۳۸ روز

نیمه عمر مؤثر ۷۶ روز، و بنابراین

ثابت دفع مؤثر برابر $0.0913 = 0.693 / 76$ در روز

۳۰٪ ید بلعیده شده در تیروئید رسوب می‌کند

۲۰٪ ید تمام بدن در تیروئید وجود دارد

آب ورودی روزانه 2200 ml

بیشینه دز مجاز برای تیروئید شخص بالغ (130 rad) 0.3 Gy در سال که معادل

است با (0.086 rad) 0.00086 Gy در روز.

مقدار ایزوتوپ پرتوزایی که با توزیع یکنواخت در تمام یک اندام و با آهنگ دز

بیشینه توصیه شده آن اندام را تحت تابش می‌گیرد، از معادله (۴۱.۶) به دست می‌آید

$$\dot{D} = \frac{q \text{ Bq} \times 1 \text{ tps/Bq} \times E_p \text{ MeV/t} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \times 8764 \times 10^4 \text{ s/d}}{m \text{ kg} \times 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \text{Gy}}$$

[۴۱.۶]

در اینجا tps علامت اختصاری تعداد تبدیل (یا فروپاشی) در هر ثانیه است. با استفاده از

مقادیر زیر می‌توان مقدار مناسب $\dot{D}$ را انتخاب و معادله را بر حسب q حل کرد.

آهن‌گ دز معادل روزانه	اندام بحرانی
$1.4 \times 10^{-4} \text{ Sv (0.014 rem)}$	تمام بدن، دستگاه خونساز، و غدد تناسلی
$8.6 \times 10^{-4} \text{ Sv (0.086 rem)}$	تیروئید
$4.3 \times 10^{-4} \text{ Sv (0.043 rem)}$	سایر اندامها یا بافتها

آهن‌گ دز معادل بیشینه برای ^{131}I برابر با $8.6 \times 10^{-4} \text{ Sv}$ یا $8.6 \times 10^{-4} \text{ Gy}$ در روز است (چون ^{131}I گسیلندهٔ بتا-گاما است، داریم $QF=1$). با قراردادن این مقدار و سایر مقادیر مربوط در معادله (۴۱.۶) خواهیم داشت

$$8.6 \times 10^{-4} \text{ Gy/d} =$$

$$\frac{q \text{ Bq} \times 1 \text{ tps/Bq} \times 0.23 \text{ MeV/t} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \times 8.64 \times 10^{-4} \text{ s/d}}{0.02 \text{ kg} \times 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \text{Gy}}$$

$$q = 5.4 \times 10^3 \text{ Bq (0.146 } \mu\text{Ci)}$$

چون فقط ۲۰٪ بدکل بدن به تیروئید می‌رسد، بیشینهٔ بار بدنی مجاز برابر است با

$$\frac{5.4 \times 10^3 \text{ Bq}}{0.2} = 2.7 \times 10^4 \text{ Bq (0.73 } \mu\text{Ci)}$$

چون مقادیر توصیه شدهٔ بیشینهٔ ICRP با تقریب یک رقم بامعنی گرد شده است، بیشینهٔ بار بدنی مجاز برای ^{131}I در نشریهٔ شمارهٔ ۲ ICRP به صورت $0.7 \mu\text{Ci}$ ($3 \times 10^4 \text{ Bq}$) ذکر شده است.

برای محاسبهٔ تراکم بیشینهٔ آب آشامیدنی که به فعالیت بیشینهٔ $5.4 \times 10^3 \text{ Bq}$ در تیروئید منجر می‌شود، با استفاده از شرط تعادل پایا داریم

$$(18.8 \text{ الف}) \quad \text{فعالیت دفع شده} = \text{فعالیت رسوب کرده}$$

$$C \text{ Bq/ml} \times 2.2 \times 10^3 \text{ ml/d} \times f = \lambda_E d^{-1} \times q \text{ Bq} \quad (18.8 \text{ ب})$$

که در آن C بیشینهٔ تراکم مجاز ایزوتوپ در آب، f کسری از ایزوتوپ ورودی که در اندام بحرانی رسوب می‌کند، λ_E ثابت دفع مؤثر، و q فعالیت حالت پایا در اندام بحرانی است.

با قراردادن مقادیر مناسب در معادله (۱۸.۸ ب) می‌توان آن را بر حسب C حل کرد

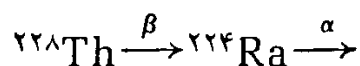
$$C = \frac{913 \times 10^{-2} \text{d}^{-1} \times 504 \times 10^3 \text{Bq}}{222 \times 10^3 \text{ml/d} \times 0.3}$$

$$= 0.75 \text{ Bq/ml} (2 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/ml})$$

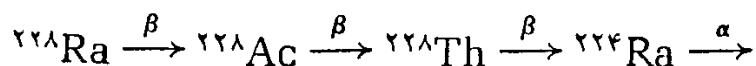
در نشریه شماره ۲ ICRP بیشینه تراکم مجاز بد ۱۳۱ در آب برای بلع پیوسته به صورت $2 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/ml}$ ، و برای پرتوگیری شغلی ۲۵ ساعت در هفته به صورت $6 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/ml}$ ذکر شده است.

تراکم در آب آشامیدنی بر مبنای مقایسه با رادیم

ما در مورد پرتوگیری انسان از رادیم تجربیات زیادی داریم. به همین دلیل، و به دلیل اینکه رادیم «استخوان خواه» است و در استخوان رسوب می کند، بیشینه باربدنی تمامی استخوان خواهان را در مقایسه با دز معادلی که رادیم به استخوان می رساند تعیین می کنیم. بر اساس اطلاعات موجود، مقدار $1 \mu\text{g}$ از رادیم که متناظر با فعالیت 37 kBq است، در حالت تعادل با محصولات واپاشی اش، به عنوان بیشینه باربدنی مجاز ^{226}Ra توصیه شده است. اگر ضریب کیفیت ذرات آلفا را ۱۰ بگیریم، دز معادل محاسبه شده برای استخوان در اثر $1 \mu\text{g}$ رادیم و دخترهسته هایش برابر 56 mSv (56 rem) در هفته خواهد بود. رادیم به صورت نسبتاً یکنواختی در استخوان توزیع می شود، اما سایر استخوان خواهان به صورت نایکنواخت در استخوان توزیع می شوند به طوری که دز بعضی از قسمتهای استخوان به حدود ۵ برابر دز میانگین استخوان می رسد. به همین دلیل، کمیسیون ICRP ضریب آسیب پذیری نسبی n را به عنوان عاملی که در QF ضرب می شود معرفی کرده است. این ضریب برای تمام تابشهای ذره ای (آلفا و بتا)، به استثنای مواردی که در آنها تابشهای ذره ای حاصل زنجیره ای هستند که نخستین عضو آن رادیم است، برابر ۵ است. وقتی رادیم نخستین عضو زنجیره باشد، ضریب آسیب پذیری برابر ۱ است، زیرا توزیع ایزوتوپهای پرتوزا را در این مورد رادیم تعیین می کند. به عنوان مثال ضریب آسیب پذیری نسبی زنجیره زیر



برابر ۵ به ازای هر ذره است، در حالی که ضریب آسیب پذیری نسبی همین ذرات در زنجیره زیر برابر ۱ است



انرژی که از ^{226}Ra و دخترهسته های باقیمانده در استخوان به استخوان می رسد،

برابر ۱۱ MeV به ازای هر تبدیل است. با قراردادن مقدار ۱۰ به جای QF انرژی مؤثر به ۱۱۰ MeV می‌رسد. چون ۹۹٪ بار بدنی را داریم در استخوان بندی قرار می‌گیرد، بیشینه بار بدنی مجاز هر استخوان خواه دیگر عبارت از

$$q = \frac{377 \times 10^3 \text{ Bq} \times 0.99}{f_y} \times \frac{110 \text{ MeV/t}}{E \text{ MeV/t}} = \frac{4 \times 10^5}{f_y E} \text{ Bq} \quad (19.8)$$

که در آن E انرژی مؤثر ذره‌ای به ازای هر تبدیل در استخوان خواه دیگر، و f_y کسر بار بدنی کل استخوان خواهی است که در استخوان بندی قرار می‌گیرد. مثلاً در مورد ^{90}Sr ، تبدیل $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$ یک گسیلنده بتای خالص است و

$$\text{انرژی میانگین تبدیل} = 0.194(^{90}\text{Sr}) + 0.093(^{90}\text{Y}) = 0.112 \text{ MeV/t}$$

$$QF = 1$$

$$n = 5$$

$$f_y = 0.99$$

انرژی مؤثر برابر $5 \times 0.112 = 0.56 \text{ MeV}$ به ازای هر تبدیل است. با استفاده از معادله (۱۹.۸) بیشینه بار بدنی مجاز چنین به دست خواهد آمد

$$q = \frac{4 \times 10^5}{0.99 \times 0.112} = 772 \times 10^4 \text{ Bq} (2 \mu\text{Ci})$$

در نشریه شماره ۲ مقدار نیمه عمر مؤثر ^{90}Sr در استخوان بندی برابر ۶۴۰۰ روز تعیین شده است که با آهنگ مؤثر دفع $\lambda_E = 1.08 \times 10^{-4}$ در روز متناظر است. چون ۹٪ استرونیسم بلعیده شده در استخوان رسوب می‌کند، از معادله (۱۸.۸) بیشینه تراکم مجاز در آب آشامیدنی که بار بدنی را به مقدار $772 \times 10^4 \text{ Bq} (2 \mu\text{Ci})$ می‌رساند به دست می‌آید

$$C \text{ Bq/ml} \times 772 \times 10^3 \text{ ml/d} \times 0.09 = 772 \times 10^4 \text{ Bq} \times 1.08 \times 10^{-4} \text{ d}^{-1}$$

$$C = 379 \times 10^{-2} \text{ Bq/ml} (1 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/ml})$$

اگر آب با آهنگی که در محاسبه بالا فرض شد آشامیده شود، هنگام برقراری تعادل، بار بدنی به مقدار بیشینه مجاز می‌رسد. به دلیل نیمه عمر مؤثر خیلی طولانی ^{90}Sr در استخوان، در طول ۵۰ سال پرتوگیری شغلی که برای محاسبه مقادیر مربوط به راهنمای حفاظت در برابر تابش در نظر گرفته می‌شود، بار بدنی به مقدار بیشینه مجاز نمی‌رسد. بعد از ۵۰ سال بلعیدن

مداوم با آهنگ بالا، مقدار ^{90}Sr در استخوان بندی برابر می شود با

$$\begin{aligned} q &= q_m(1 - e^{-\lambda_E t}) \\ &= 722 \times 10^4 (1 - e^{-1.08 \times 10^{-4} \times 50 \times 365}) \\ &= 622 \times 10^4 \text{ Bq} (1.7 \mu \text{ Ci}) \end{aligned}$$

که فقط برابر ۸۶٪ باربدنی بیشینه است. از این رو، معلوم می شود که باربدنی متوسط و در نتیجه آهنگ دز میانگین استخوان بندی در دوره ۵۰ ساله بلع به طور قابل توجهی از بیشینه باربدنی مجاز کمتر خواهد بود. باربدنی میانگین در طول مدت زمان بلع T که از زمان صفر که در آن هیچ نوع ایزوتوپ پرتوزایی از انواع مورد بحث در بدن نیست آغاز می شود، با فرض اینکه آهنگ دفع مؤثر ایزوتوپ پرتوزا λ_E باشد، از معادله زیر به دست می آید

$$\bar{q} = \frac{1}{T} \int_0^T q_m(1 - e^{-\lambda_E t}) dt \quad (20.8)$$

که با انتگرال گرفتن از آن نتیجه می شود

$$\bar{q} = q_m \left[1 + \frac{1}{\lambda_E T} (e^{-\lambda_E T} - 1) \right] \quad (21.8)$$

برای ^{90}Sr که $\lambda_E = 0.0395 \text{ y}^{-1}$ است، در يك دوره پرتوگیری ۵۰ ساله خواهیم داشت

$$\bar{q} = 418 \times 10^4 \text{ Bq} (1.13 \mu \text{ Ci})$$

چندین ایزوتوپ پرتوزای دیگر وجود دارد که در طی ۵۰ سال بلع پیوسته در تراکمهای توصیه شده بیشینه به مقادیر تعادل خود نمی رسند. این ایزوتوپهای پرتوزا در جدول ۷.۸ آمده است.

پرتوزایی هوابرد

هنگام بررسی پرتوزایی هوابرد باید ریه انسان را از دو نظر مطالعه کرد: نخست به عنوان راه ورودی مواد تنفس شده ای که به طور منظم رسوب می کنند، و دوم به عنوان يك اندام بحرانی که ممکن است بر اثر تابش آسیب ببیند. برای محاسبات تراکمهای مجاز پرتوزایی جوی، می توان آلودگیهای هوابرد را به طور کلی به دو دسته گازی و ذرات معلق تقسیم کرد. در آلودگیهای پرتوزای گازی باید احتمال خطر ناشی از غوطه وری و استنشاق را

جدول ۲۰۸ ایزوتوپهای پرتوزایی که در طی ۵۰ سال به تعادل نمی‌رسند.

Z	ایزوتوپ پرتوزا	T_E (سال)	درصد تعادل پس از ۵۰ سال
38	⁹⁰ Sr	18	86
88	²²⁶ Ra	44	56
89	²²⁷ Ac	20	83
90	²³⁰ Th	200	16
90	²³² Th	200	16
91	²³¹ Pa	200	16
93	²³⁷ Np	200	16
94	²³⁸ Pu	62	43
94	²³⁹ Pu	200	16
94	²⁴⁰ Pu	190	16
94	²⁴¹ Pu	12	94
94	²⁴² Pu	200	16
95	²⁴¹ Am	140	22
95	²⁴³ Am	200	16
96	²⁴³ Cm	30	69
96	²⁴⁴ Cm	17	87
96	²⁴⁵ Cm	200	16
96	²⁴⁶ Cm	190	16
98	²⁴⁹ Cf	140	22
98	²⁵⁰ Cf	10	97

در نظر گرفت، ولی در دسته دیگر خطر اصلی از رسوب ماده پرتوزا در ریه ناشی می‌شود. محاسبه تراکم مجاز یک گاز را با استفاده از ^{۴۱}A که یک گاز از لحاظ زیست‌شناختی بی‌اثر است می‌توان توضیح داد. آرگون ۴۱ با نیمه عمر ۱۰۰ دقیقه (یا ۰.۰۷۶ روز) و با گسیل ذره بتای با انرژی ۱.۲ MeV و پرتو گامای با انرژی ۱.۳ MeV به ^{۴۱}K واپاشیده می‌شود. در حالت غوطه‌وری فرض می‌شود که شخص در یک نیمکره بی‌نهایت بزرگ از گاز غوطه‌ور می‌شود. در هر محیط نامتناهی که در آن ایزوتوپی به صورت یکنواخت توزیع شده باشد، چگالی انرژی گسیل شده با چگالی انرژی جذب شده برابر است. با در نظر گرفتن مقدار ۱.۱ برای توان ایستاندگی بافت نسبت به هوا و انرژی مؤثر $1.7 \text{ MeV} = (1.2)(1/3) + 1.3$ ، تراکم پرتوزایی که به آهنگ جذب در معادل (۰.۰۱۴۳ rem) 0.0143 Sv در روز منجر می‌شود، از رابطه زیر به دست می‌آید

$$1.43 \times 10^{-4} \text{ Sv/d} =$$

$$C \text{ Bq/m}^3 \times 1 \text{ tps/Bq} \times 1.7 \text{ MeV/t} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \times 8.76 \times 10^4$$

$$\frac{1.293 \text{ kg/m}^3 \times 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}/\text{Gy} \times 1 \text{ Gy/Sv}}{\times 10^4 \text{ s/d} \times 1.1}$$

$$C = 7715 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3 (1.9 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cm}^3)$$

این محاسبه برای نقطه‌ای که کاملاً در گاز پرتوزا غوطه‌ور است انجام شده است. چون انسان بر روی زمین قرار دارد و فقط از طریق 2π استرادیان پرتوگیری می‌کند، تراکم مجاز به دو برابر مقداری که در بالا محاسبه شد یعنی به $(3.8 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cm}^3) 1473 \text{ Bq/m}^3$ افزایش می‌یابد.

هنگامی که گازی استنشاق می‌شود، ممکن است پس از نفوذ در مویرگ‌های ریه در مایعات و چربی بدن حل شود. اگر گاز بی‌اثر باشد، پس از اشباع مایعات و چربی بدن از آن گاز، فرایند جذب در بدن متوقف خواهد شد. بنابراین باید مقدار اشباع 4^1A حل شده در مایعات بدن بر اثر استنشاق هوای آلوده را در غوطه‌وری کامل محاسبه کنیم تا ببینیم که آیا به بیش پرتوگیری می‌انجامد یا نه. ابتدا، تراکم مولی 4^1A را که با مقدار $(3.8 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cm}^3) 1473 \text{ kBq/m}^3$ متناظر است تعیین می‌کنیم. برای این منظور فعالیت ویژه 4^1A را از معادله (۳۰۴) به دست می‌آوریم

$$\frac{37 \times 10^{10} \times 1.6 \times 10^3 \text{ y} \times 226 \times 365 \text{ d/y}}{0.076 \text{ d}^{-1} \times 41} = 1.57 \times 10^{18} \text{ Bq/g}$$

$$\frac{1473 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3}{1.57 \times 10^{18} \text{ Bq/g}} \times \frac{1 \text{ mol}}{41 \text{ g}} = 2.23 \times 10^{-16} \text{ mol/m}^3$$

تراکم مولی هوا برابر است با

$$\frac{1 \text{ mol}}{22.41 \times 10^{-3} \text{ m}^3/1} = 44.6 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

چون ۹۴ درصد حجم هوا آرگون است، تراکم مولی طبیعی آرگون موجود در هوا برابر است با

$$94 \times 10^{-2} \times 44.6 \text{ mol/m}^3 = 0.42 \text{ mol A/m}^3 \text{ هوا}$$

از این رو، مقدار 4^1A متناظر با بیشینه تراکم مجاز غوطه‌وری، نسبت به آرگون موجود در هوا ناچیز است، و می‌توان فرض کرد که تراکم مولی آرگون در هوا در نتیجه افزایش $(3.8 \times 10^{-7} \mu\text{Ci/cm}^3) 1473 \text{ kBq}$ در هر متر مکعب هوا تغییر نمی‌کند. با این مقدار 4^1A در هوا، فعالیت ویژه آن برابر است با

$$\frac{1473 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3}{0.42 \text{ mol A/m}^3} = 3.4 \times 10^4 \text{ Bq/mol A} (9.1 \times 10^{-7} \text{ Ci/mol A})$$

اکنون تراکم آرگون در مایعات بدن را در حالتی که آرگون محلول با آرگون موجود در هوا به تعادل می‌رسد محاسبه می‌کنیم. طبق قانون هانری، مقدار گاز حل شده

در هر مایعی با فشار جزئی گاز بالای مایع متناسب است

$$P_{\text{ساز}} = KN = K \frac{n_g}{n_g + n_s} \quad (22.8)$$

که در آن $P_{\text{ساز}}$ فشار جزئی گاز، K ثابت هانری، N کسر مولی گاز حل شده، n_g تراکم مولی گاز حل شده، و n_s تراکم مولی حلال است. در جدول ۸.۸ قابلیت حل چندین گاز را در آب 38°C بر حسب ثابت هانری نشان داده ایم. در دمای معمولی بدن انسان، ثابت هانری آرگون برابر 3.41×10^7 و فشار جزئی آن در جو برابر است با

$$P_{\text{ساز}} = 0.0094 \times 760 = 7.15 \text{ mm Hg}$$

مقدار کل آب بدن شخصی به وزن ۷۰ کیلوگرم، برابر ۴۳ لیتر است. تراکم مولی آب، به عنوان حلال، برابر است با

$$n_s = \frac{1000 \text{ g/l}}{18 \text{ g/mol}} = 55.6 \frac{\text{mol}}{\text{l}}$$

اکنون می توان معادله (۲۲.۸) را بر حسب تراکم آرگون محلول، حل کرد

$$7.15 = 3.41 \times 10^7 \left(\frac{n_g}{n_g + 55.6} \right)$$

$$n_g = 1.17 \times 10^{-5} \text{ mol/l}$$

چون فعالیت ویژه آرگون محلول برابر $(9.1 \times 10^{-7} \text{ Ci/mol})$ و $3.4 \times 10^4 \text{ Bq/mol}$ است، تراکم فعالیت آن در مایعات بدن برابر $(1.1 \times 10^{-5} \mu\text{Ci/l})$ و 0.4 Bq/l ، و فعالیت کل آن در مایعات بدن برابر $(4.6 \times 10^{-4} \mu\text{Ci})$ و 172 Bq خواهد بود. قابلیت حل آرگون در چربی بیشتر از قابلیت حل آن در آب است. در حالت تعادل و در دمای بدن، نسبت تراکم آرگون در چربی به تراکم آن در آب برابر نسبت ۵.۴ به ۱ است. مقدار ^4A در 10 kg چربی بدن یک شخص مرجع برابر است با

$$0.4 \times 0.4 \text{ Bq/kg} \times 10 \text{ kg} = 216 \text{ Bq} \quad (5.8 \times 10^{-4} \mu\text{Ci})$$

فعالیت کل آرگون در شخص مرجع برابر مجموع فعالیت آن در مایعات بدن و در چربی، یعنی $(1.1 \times 10^{-3} \mu\text{Ci})$ و 388 Bq است. با فرض اینکه آرگون به طور یکنواخت در تمام بدن توزیع شده باشد، آهنگ دز تمام بدن در اثر ^4A محلول را می توان از معادله زیر به دست آورد

جدول ۸.۸ قابلیت حل چند گاز در آب بادمای ۰.۳۸°C .

$$K = \frac{\text{فشار جزئی گاز بر حسب میلی متر جیوه}}{\text{کسر موای گاز در محلول}}$$

گاز	K
H_2	5.72×10^7
He	۱۱۵۰
N_2	۷۵۱
O_2	۴۵۴
A	۳۴۱
Ne	۹۷۶
Kr	۲۱۳
Xe	۱۱۲
Em	۵۶۵۱
CO_2	۵۱۶۸
C_2H_2	۵۱۳۱
C_2H_4	۱۲۱
N_2O	۵۲۴۲

$$\dot{D} = \frac{q \text{ Bq} \times 1 \text{ tps/Bq} \times E_e \text{ MeV/t} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \times 8.76 \times 10^4 \text{ s/yr}}{m \text{ kg} \times 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \text{Gy}}$$

[۴۱.۶]

که در آن E_e انرژی مؤثر جذب شده به ازای هر تبدیل است که برابر است با مجموع انرژی متوسط پرتو بتا، 0.4 MeV ، و انرژی جذب شده از گامای 0.13 MeV . کسر جذب شده انرژی پرتو گاما که با درونیایی میان 0.1 و 0.15 MeV در جدول ۶.۶ به دست می آید، برابر 0.31 است. بنابراین، انرژی مؤثر برابر است با

$$E_e = 0.4 + 0.31 \times 0.13 = 0.8 \text{ MeV/تبدیل}$$

با قراردادن این مقدار به جای E_c ، همراه با مقدار 3888 Bq به جای q و 70 kg به جای m در معادله (۴۱.۶) آهنک دز برابر $(6 \times 10^{-4} \text{ mrad/d})$ یا $(6 \times 10^{-9} \text{ Gy/d})$ به دست می آید.

بر طبق این محاسبات، آهنک دز آرگون محلول در بدن در مقایسه با دز غوطه‌وری قابل چشم‌پوشی است.

ذرات معلق استنشاق شده ممکن است حل پذیر یا حل ناپذیر باشند. در حالت حل پذیر بودن، ممکن است در مایعات بدن جذب شود یا در ریه به صورت رسوب حل ناپذیری در آید و یا با بافت پروتئینی برهم کنش کند. ذرات معلق «حل ناپذیر» که در عمق مجاری تنفسی رسوب می کنند ممکن است برای یک مدت طولانی در آنجا باقی بمانند، تا اینکه بر اثر بیگانه‌خواری یا بالا آمدن بر اثر حرکات منظم جداره‌های مژکدار و یا بر اثر انحلال تدریجی از بین بروند. راهنماهای حفاظتی توصیه شده برای ذرات معلق هوا برد به طور کلی بر فرضیات زیر متکی است. مگر در مواردی که اطلاعات زیست‌شناختی ویژه‌ای برای ذرات معلق در دسترس قرار گرفته باشد:

ذرات حل پذیر	ذرات حل ناپذیر
۱. ۲۵٪ بازدمیده می شود.	۱. ۲۵٪ بازدمیده می شود.
۲. ۵۰٪ در مجرای تنفسی فوقانی رسوب می کند و در مدت ۲۴ ساعت بلعیده می شود.	۲. ۵۰٪ در مجرای تنفسی فوقانی رسوب می کند و در مدت ۲۴ ساعت بلعیده می شود.
۳. ۱۲٪ در عمق مجرای تنفسی رسوب می کند، اما در مدت ۲۴ ساعت به داخل گلو رانده و از آنجا بلعیده می شود.	۳. ۲۵٪ در مایعات بدن حل و در آنها جذب می شود.
۴. ۱۲٪ در عمق مجرای تنفسی رسوب می کند، و با نیمه عمر احتباس زیست‌شناختی ۱۲۰ روز در آنجا باقی می ماند.	

کاربرد این فرضیات را با محاسبه بیشینه تراکم مجاز گرد و غبار حاوی ^{35}S توضیح می دهیم. گوگرد 35 با نیمه عمر ۸۷٫۲ روز و انرژی میانگین 0.49 MeV یک گسیلنده خالص بتاست. طبق فرضیات بالا، ۲۵٪ از گرد و غبار استنشاق شده بی درنگ بازدمیده می شود، ۶۲٫۵٪ آن در ریه رسوب می کند و طی ۲۴ ساعت از آنجا خارج می شود، و ۱۲٫۵٪ دیگر با نیمه عمر مؤثر احتباس زیر در اعماق مجرای تنفس باقی می ماند.

$$T_E = \frac{T_B \times T_p}{T_B + T_p}$$

$$= \frac{120 \times 8772}{120 + 8772} = 50.05d$$

که با آهنگ دفع $\lambda_E = 0.0138d^{-1}$ متناظر است. مقدار فعالیت Q در ریه (به وزن ۱ kg) که به آهنگ دز جذب شده $(0.43 rad)$ $(0.43 Gy)$ می انجامد، از معادله (۴۱.۶) محاسبه می شود

$$0.43 Gy/d =$$

$$\frac{QBq \times 1 tps/Bq \times 0.049 MeV/t \times 1.6 \times 10^{-13} J/MeV \times 8.76 \times 10^4 s/d}{1 kg \times 1 \frac{J}{kg} / Gy}$$

$$Q = 6.4 \times 10^5 Bq (17.2 \mu Ci)$$

هنگامی که بار ریه با تراکم جوی $C Bq/m^3$ در تعادل باشد، آنگاه

(۲۳.۸ الف) مقدار دفع شده = کسر رسوب کرده $\times$ مقدار استنشاق شده

چون هر فرد مرجع روزانه $20 m^3$ هوا تنفس می کند، معادله (۲۳.۸ الف) به صورت زیر درمی آید

$$20 m^3/d \times C Bq/m^3 \times 0.75 = \lambda_E d^{-1} \times q Bq + 0.625 \times 20 C Bq/d$$

(۲۳.۸ ب)

که در آن q مقدار فعالیت در عمق مجرای تنفسی است. اما داریم

$$q + 0.625 \times 20 C = Q$$

(۲۴.۸)

با قرار دادن $\lambda_E = 0.0138 d^{-1}$ و $Q = 6.4 \times 10^5 Bq$ در معادلات (۲۴.۸) و (۲۳.۸ ب)، مقدار C به دست می آید

$$C = 3.3 \times 10^3 Bq/m^3 (8.9 \times 10^{-8} \mu Ci/cm^3)$$

نشریه شماره ۲ کمیسیون ICRP با گرد کردن مقدار بالا، MPC هوا را برای ^{35}S حل ناپذیر برابر $9 \times 10^{-8} \mu Ci/cm^3$ ذکر کرده است.

دز تابش مجرای معده و روده ها (به وزن ۲۱۶۵ g با محتویات) در اثر فعالیت کسری از مواد استنشاق شده که بنا به فرض از ریه بالا می آید و بلعیده می شود، بنا بر معادله (۴۱.۶)، برابر $(1.5 mrad)$ $(1.5 \times 10^{-5} Gy)$ در روز به دست می آید.

بیشینه تراکمهای مجاز برای پرتوگیری غیرشغلی

آنچه درباره MPC هوا و آب در جدول نشریه شماره ۲ ICRP ذکر شده است، فقط برای پرتوگیری شغلی معتبر است. کمیسیون ICRP در مورد پرتوگیری غیرشغلی و افراد عادی جامعه، توصیه می کند که MPC برای ایزوتوپهایی که در آنها تمام بدن، یا بافت خونساز، یا غدد تناسلی اندام بحرانی است با ضریب ۱۰۰، و برای سایر ایزوتوپها با ضریب ۳۰ کاهش داده شود. در ایالات متحده آمریکا، این توصیه ها تحت عنوان «استانداردهای حفاظت در برابر تابش» به صورت مقررات کشوری درآمده است. در اینجا باید تأکید کرد که بیشینه دزها و بیشینه تراکمهای مجازی که توصیه شده است باید فقط به عنوان حدود بالا در نظر گرفته شوند، و در کلیه موارد برنامه ریزی برای حفاظت در برابر تابش باید بر دزهای تابشی استوار شود که مقدار آنها تا حد ممکن کم و به آسانی قابل تحقق باشد. وانگهی، با اینکه جداول MPC بر اساس پرتوگیری از طریق استنشاق و یا بلع تنظیم شده است، حفاظت در برابر تابش در هر حالت خاص باید بر مبنای حساسترین اқشار جمعیت تحت پرتوگیری و در مسیری که بیشترین دز به گروه بحرانی جمعیت می رسد تعیین شود. به عنوان مثال، در مورد ^{131}I جوی، در ناحیه ای که در آنجا گاوان شیرده می چرند، گروه بحرانی جمعیت همان کودکانی خواهند بود که از شیر گاو تغذیه می کنند، و مسیر بحرانی پرتوگیری عبارت است از مسیر هوا - علوفه - گاو - شیر - و کودک. رعایت این نکات باعث شده است که MPC مربوط به ^{131}I در جدول با ضریب ۷۰۰ کاهش یابد.

سنجش - افزارهای فیزیک بهداشت

آشکارسازهای تابش

چون انسان به طور طبیعی هیچ نوع وسیله‌ای برای احساس تابش یوننده ندارد، برای آشکارسازی و اندازه‌گیری تابش باید کاملاً متکی بر سنجش - افزار باشد. ابزارهایی که در حرفه فیزیک بهداشت به کار می‌روند هدفهای بسیار متنوعی را تعقیب می‌کنند. بنا بر این طبیعی است که انواع گوناگونی از این ابزارها وجود داشته باشد که از میان آنها از شمارگر گایگر برای شمارش ذرات، فیلم بجها و دزسنجهای جیبی برای اندازه‌گیری دزهای تابش، و ابزارهای از نوع اتاقک یونش برای آهنگ دز می‌توان نام برد. در میان هر کدام از این انواع مختلف، ابزارهایی دیده می‌شود که عمدتاً برای اندازه‌گیری نوع معینی از تابش، نظیر پرتوهای ایکس کم انرژی پرتوهای گاما، نوترونهای تند، و امثال آن ساخته شده است.

اگرچه این ابزارها انواع مختلف و متنوعی دارند، ولی بر طرز کار اکثر آنها فقط چند اصل حاکم است. اصل اساسی هر ابزار اندازه‌گیری تابش این است که آشکارساز به نحوی با تابش برهم‌کنش کند که پاسخ آن با اثر تابش یا خاصیت تابش تحت اندازه‌گیری متناسب باشد. در جدول ۱۰۹ بعضی از اثرات فیزیکی و شیمیایی تابش که در فیزیک بهداشت برای آشکارسازی و اندازه‌گیری تابش به کار می‌روند آمده است.

جدول ۱۰۹ اثرات تابشی به کار رفته در آشکارسازی و اندازه گیری تابش.

اثر	نوع سنجش-افزار	آشکارساز
الکتریکی	۱. اتاقک یونش	۱. گاز
	۲. شمارگر تناسبی	۲. گاز
	۳. شمارگر گایگر	۳. گاز
	۴. حالت جامد	۴. نیمرسانا
شیمیایی	۱. فیلم	۱. امولسیون عکاسی
	۲. دزسنج شیمیایی	۲. جامد یا مایع
نور	۱. شمارگر سوسوزن	۱. بلور یا مایع
	۲. شمارگر چرنکوف	۲. بلور یا مایع
گرمالیانی	دزسنج گرمالیان	بلور
	گرماسنج	جامد یا مایع

سنجش - افزارهای شمارش ذرات

ابزارهای شمارگر ذره ابزارهایی هستند که متخصصان فیزیک بهداشت اغلب از آنها برای تعیین میزان پرتوزایی نمونه‌ای که از محیط گرفته می‌شود، مثل نمونه هوا، یا برای اندازه گیری فعالیت یک مایع زیست شناختی از کسی که احتمال می‌رود دارای آلودگی داخلی مواد پرتوزا باشد استفاده می‌کنند. یکی دیگر از کاربردهای مهم این نوع سنجش - افزار استفاده از آنها در ابزارهای قابل حمل اندازه گیری تابش است. این سنجش - افزارها ممکن است خیلی حساس باشند و حتی نسبت به یک تک ذره یوننده هم واکنش نشان دهند. به همین دلیل، برای پیدا کردن چشمه‌های تابشی مجهول، نشت درحفاظها، و یا یافتن نواحی آلوده به طور وسیع از آنها استفاده می‌شود. ماده آشکارساز در این ابزارها ممکن است به صورت گاز یا جامد باشد. در هر دو حالت، عبور ذره یوننده از آشکارساز به اتلاف انرژی و تولید رگه یونشی منجر می‌شود. این رگه یونشی به یک تب الکتریکی تبدیل می‌شود و تب حاصل دستگاه ثبتی مانند یک شمارنده یا آهنک سنج را به کار می‌اندازد.

شمارگرهای گازی برای ذرات

دستگاه آشکارساز گازی شکل ۱.۹ را در نظر می‌گیریم. این دستگاه متشکل است از چشمه ولتاژ متغیر V ، مقاومت خیلی زیاد R ، اتاقک شمارش پر از گاز D ، و دو الکترود هم‌محور که کاملاً نسبت به هم عایق بندی شده‌اند. ظرفیت کل این مدار را با خازن C نشان داده‌ایم. وقتی آشکارساز در معرض تابش قرار می‌گیرد، به دلیل تولید یون در داخل آن، گاز داخلی رسانا می‌شود.

اگر RC ثابت زمانی مدار آشکارساز از زمان لازم برای گردآوری تمام یونهای حاصل از عبور یک ذره منفرد خیلی بیشتر باشد، مقدار ولتاژ تب حاصل از رابطه زیر به دست می‌آید

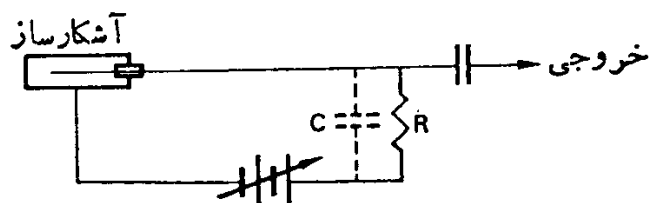
$$V = \frac{Q}{C} \quad (1.9)$$

که در آن Q کل بار جمع‌آوری شده و C ظرفیت مدار است. شکل تب حاصل به صورت منحنیهای شکل ۲.۹ است که در خروجی مدار آشکارساز ظاهر می‌شود.

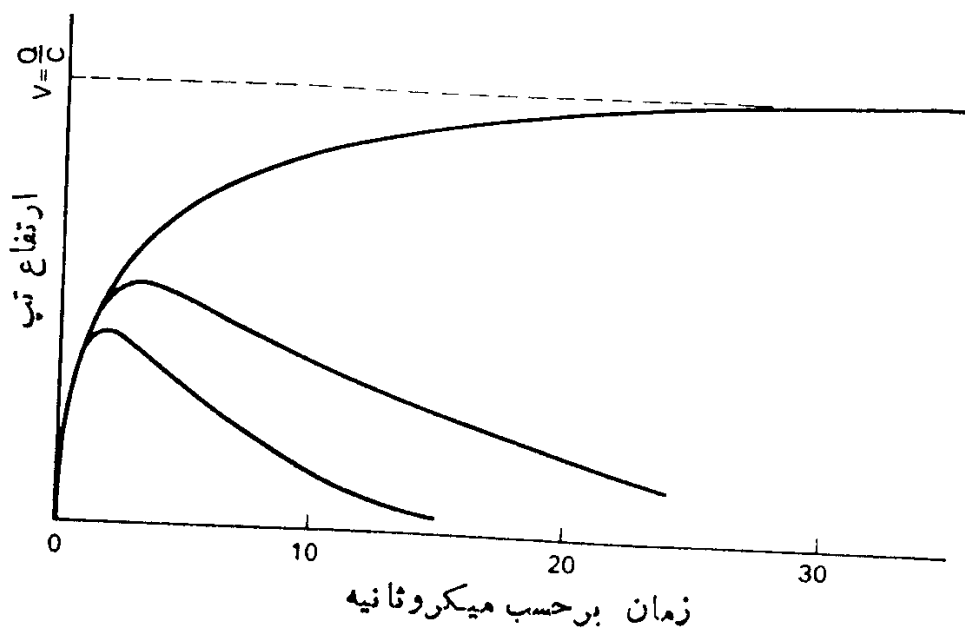
اگر تب خروجی پهن باشد جدا کردن تپهای متوالی از همدیگر مشکل می‌شود. اما اگر ثابت زمانی مدار آشکارساز خیلی کمتر از زمان لازم برای گردآوری تمام یونها باشد، همان‌طور که در منحنیهای شکل ۲.۹ دیده می‌شود، ارتفاع تب ظاهر شده کوتاه‌تر است، اما تب خیلی باریکتر می‌شود. این به اصطلاح «برش» تب، جداسازی و شمارش تپهای منفرد را امکان‌پذیر می‌کند.

شمارگر اتاقک یونش

اگر شار ثابتی از تابش از داخل آشکارساز عبور کند، و اگر ولتاژ V نیز تغییر داده شود، چندین ناحیه مهم کاملاً مشخص در اندازه‌گیری تابش ممکن است شناسایی شود. با افزایش ولتاژ از صفر تا ولتاژهای نسبتاً کم، با اولین ناحیه که به ناحیه اتاقک یونش معروف است، روبه‌رو می‌شویم. اگر قطبیت الکتریکی وسیله اندازه‌گیری همانند شکل ۱.۹ باشد، تمام یونهای مثبت در کاتد بیرونی، و تمام یونهای منفی یا الکترون‌ها در آنند مرکزی جمع خواهند شد. منظور از «ولتاژهای کم» در اینجا این است که گستره ولتاژ به قدری بزرگ است که یونها را، قبل از ترکیب مجدد کسر قابل توجهی از آنها، جمع‌آوری می‌کند، ولی



شکل ۱.۹ مدار اصلی آشکارساز گازی.

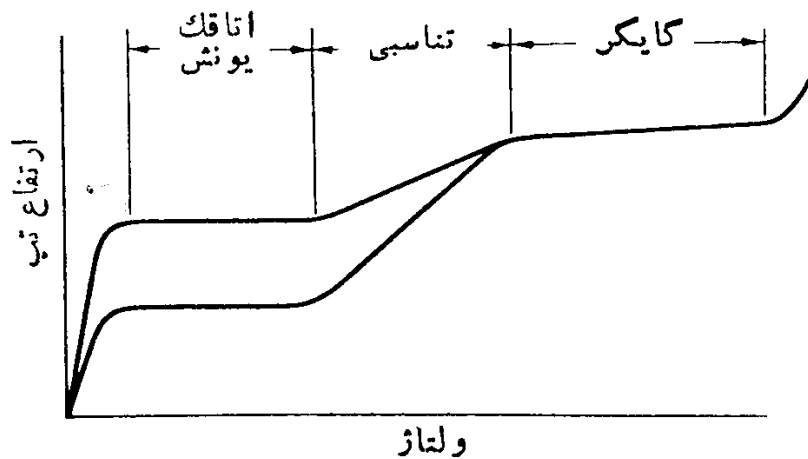


شکل ۲۰۹ بستگی شکل تب به ثابت زمانی مدار آشکارساز. منحنی بالایی مربوط به حالتی است که در آن $RC = \infty$ ، منحنی میانی به حالتی اختصاص دارد که زمان جمع آوری یون بیشتر از RC ، و منحنی پایینی حالتی را نشان می‌دهد که در آن RC خیلی کمتر از زمان جمع آوری یون است.

در حدی نیست که به یونها شتاب دهد و در اثر برخورد میان آنها یونش ثانوی تولید کند. مقدار دقیق این ولتاژ به نوع و فشار گاز، ابعاد، و آرایش هندسی الکترودها بستگی دارد. در این ناحیه تعداد الکترونیایی که در آن جمع آوری می‌شود برابر تعدادی است که به وسیله ذره یوننده اولیه تولید می‌شود. بنابراین، اندازه تب مستقل از ولتاژ است و فقط به تعداد یونهای تولید شده به وسیله ذره یوننده اولیه در طی عبور از آشکارساز بستگی دارد. ناحیه اتاقک یونش را می‌توان به صورت گسترده ولتاژهای مؤثری تعریف کرد که در آن یونها بر اثر یونش ثانوی تکثیر نمی‌شوند، یعنی، ضریب تقویت گاز برابر واحد است. بستگی بزرگی تب حاصل از شمارگری که در ناحیه اتاقک یونش کار می‌کند به تعداد یونهای تولید شده در اتاقک، امکان استفاده از این وسیله را برای تمایز گذاری بین تابشهای حاصل از یونشهای ویژه متفاوت، مثل یونشهای حاصل از آلفا، بتا، و گاما فراهم می‌آورد. به عنوان مثال، هر ذره آلفا که از اتاقک عبور کند در حدود 10^5 زوج یون تولید می‌کند که با بار $1.6 \times 10^{-14} C$ متناظر است. اگر ظرفیت اتاقک $10 \mu F$ باشد و تمامی بارها جمع آوری شوند، تب ولتاژ حاصل از عبور آلفا برابر است با

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{1.6 \times 10^{-14}}{10 \times 10^{-12}} = 1.6 \times 10^{-3} V$$

از طرف دیگر ذره بتا می‌تواند در حدود 1000 زوج یون در داخل اتاقک تولید کند. بنابراین تب خروجی حاصل از عبور ذره بتا فقط $1.6 \times 10^{-5} V$ خواهد شد. تقویت این



شکل ۳.۹ منحنی ارتفاع تب بر حسب ولتاژ دوسر شمارگر گازی. در این شکل ناحیه‌های مربوط به اتاقک یونش، تناسبی، و گایگر نشان داده شده است.

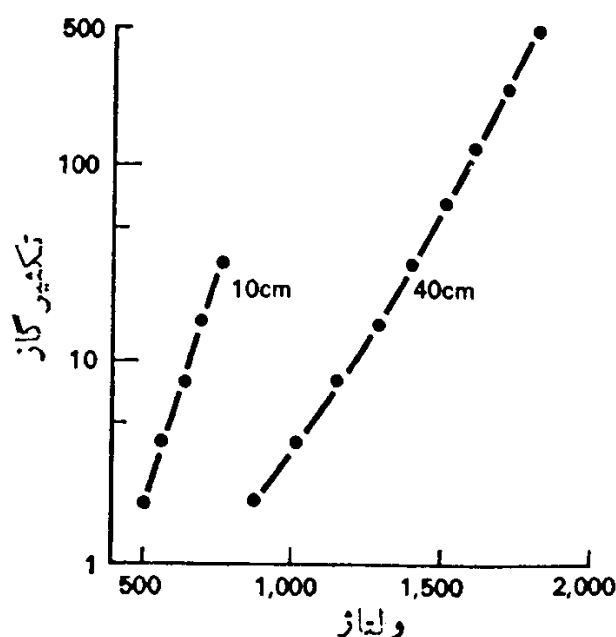
دو تب با ضریب ۱۰۰، به تپی برابر $16V$ و برای آلفا و $1600V$ برای بتا منجر می‌شود. با استفاده از دستگاه ممیز در شمارنده (یا هر وسیله ثابت دیگر) می‌توان تپهای کمتر از یک مقدار تعیین شده قبلی را از شمارش خارج و تنها به شمارش تپهای بیشتر از این مقدار اکتفا کرد. در این مثال، تنظیم دستگاه ممیز و ولتاژ $16V$ موجب می‌شود که تپهای ناشی از ذرات آلفا شمارش شوند ولی تپهای پرتوهای بتا عبور نکنند. این ولتاژ تنظیم دستگاه ممیز را غالباً حساسیت ورودی شمارنده می‌نامند. افزایش حساسیت ورودی در مثال بالا موجب می‌شود که هر دو ذره آلفا و بتا شمارش شوند. در شکل ۳.۹، که ارتفاع تب خروجی بر حسب ولتاژ دوسر اتاقک یونش رسم شده است، این توانایی تمیز میان دو نوع تابش از یکدیگر نشان داده شده است.

شمارگر تناسبی

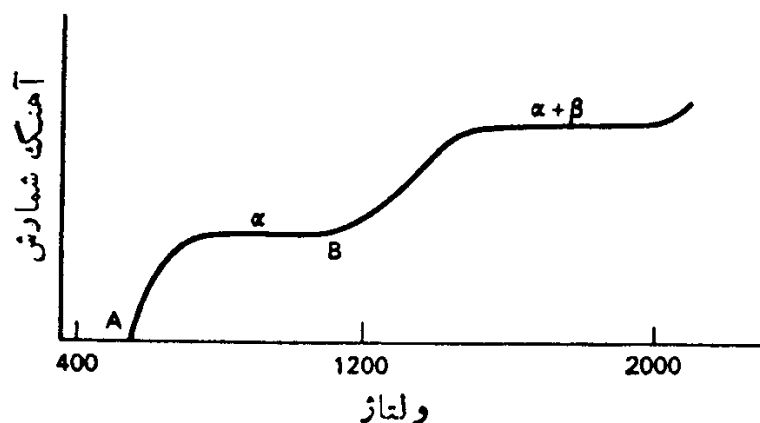
یکی از نقاط ضعف قابل توجه هر شمارگری در ناحیه اتاقک یونش این است که تب خروجی نسبتاً ضعیف است و همین موضوع ایجاب می‌کند که این تب خیلی تقویت شود و یا میزان حساسیت ورودی در شمارنده خیلی بالا باشد. برای رفع این اشکال و ضمناً استفاده از بستگی بزرگی تب به یونش برای تمیز دادن تابشها از همدیگر، می‌توان شمارگر را به صورت یک شمارگر تناسبی مورد استفاده قرار داد. با افزایش ولتاژ دوسر شمارگر به مقدار بالاتر از ولتاژ اتاقک یونش، زمانی فرامی‌رسد که بر اثر برخورد الکترونهاى ثانوی تولید می‌شوند. این لحظه آغاز عملکرد شمارگر تناسبی است. در این هنگام افت ولتاژ دوسر مقاومت R ، به دلیل وجود الکترونهاى اضافی، از افت ولتاژ نظیر در ناحیه اتاقک یونش بیشتر است. ضریب تقویت گاز از ۱ بیشتر است و این تکثیر یون در گاز، که بهمن خوانده می‌شود، به نواحی مجاور یونش اولیه محدود می‌شود. افزایش ولتاژ، باعث تقویت بهمن و گسترش آن در امتداد آنند می‌شود. چون بزرگی تب خروجی با تعداد الکترونهاى جمع شده در

آند تعیین می‌شود، اندازه تپ و ولتاژ خروجی يك آشكار ساز معين با ولتاژ زیاد دوسر این آشكار ساز متناسب خواهد بود. تقویت گاز، علاوه بر ولتاژ زیاد دوسر لامپ، به قطر الکتروود جمع کننده^۱ و فشار گاز بستگی دارد. کاهش فشار گاز به افزایش تکثیر آن به صورتی که در شکل ۴.۹ نشان داده شده است منجر می‌شود. به دلیل بستگی تکثیر گاز، و در نتیجه اندازه تپ خروجی، به ولتاژ زیاد، لازم است که برای شمارگر تناسبی از يك منبع تغذیه ولتاژ زیاد خیلی پایدار استفاده شود.

در شکل ۵.۹ نمونه‌ای از کاربرد شمارگر تناسبی برای تمایز تابش آلفا از بتا نشان



شکل ۴.۹ نمودار تکثیر گاز بر حسب ولتاژ به ازای فشارهای ۱۰ و ۴۰ سانتی متر جیوه. مخزن محتوی آرگون؛ قطر آند ۱ in و قطر کاتد ۸.۷ in است.



شکل ۵.۹ آهنگ شمارش آلفا و آلفا-بتا به صورت تابعی از ولتاژ در شمارگر تناسبی.

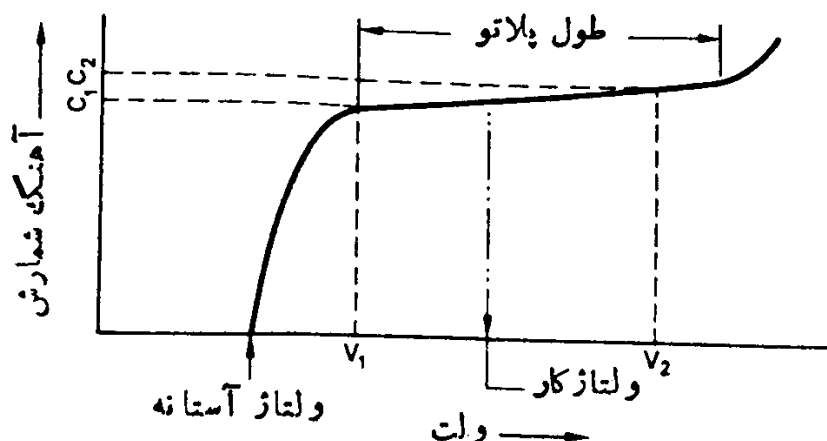
۱. شدت میدان الکتریکی نزدیک سطح آند که با معادله (۴۰.۲) به دست می‌آید، با کاهش قطر آند جمع کننده افزایش می‌یابد.

داده شده است. در نقطه A یا ولتاژ «آستانه»، تپهای تولید شده توسط ذرات آلفایی که از شمارگر عبور می کنند، آنقدر قوی هستند که از دستگاه ممیز بگذرند. افزایش اندکی در ولتاژ، باعث افزایش آهنگ شمارش می شود، زیرا در این صورت، تپهای خروجی حاصل از ذرات آلفا از حساسیت ورودی شمارنده پیشی می گیرند. افزایش بیشتر ولتاژ زیاد تأثیر چندانی بر آهنگ شمارش ندارد، و به قسمت «پلاتوی» منحنی یا گستره ای از ولتاژ زیاد که در آن آهنگ شمارش تقریباً مستقل از ولتاژ است، منجر می شود. برای دستگاهی که در این قسمت پلاتوی آلفا کار می کند، تپهای حاصل از ذرات بتا به قدری کوچک اند که به دستگاه ممیز نمی رسند. اما، با افزایش ولتاژ زیاد، نقطه ای مثل B فرا می رسد که در آن تقویت گاز به قدری زیاد است که ذرات بتا نیز تپهای خروجی بلندتر از حساسیت ورودی شمارنده تولید می کنند. این حالت به قسمت «تخت» دیگری روی منحنی منجر می شود که در آن هم ذرات آلفا و هم ذرات بتا شمارش می شوند. با کم کردن آهنگ شمارش آلفا از آهنگ شمارش بتا، فعالیت پرتو بتا به دست می آید.

شمارگر گایگر

با ادامه افزایش ولتاژ زیاد به مقادیر بالاتر از ناحیه تناسبی سرانجام بهمن در سراسر طول آند گسترش خواهد یافت. هنگامی که این پدیده روی می دهد، ناحیه تناسبی خاتمه می یابد و ناحیه گایگر آغاز می شود. در این نقطه اندازه تپها، بدون توجه به نوع ذره یوننده اولیه، یکسان است و بنا بر این هنگامی که شمارگر در ناحیه گایگر کار می کند نمی تواند انواع گوناگون تابش را از هم تمیز بدهد. اما وجود تپهای خروجی خیلی بزرگ (بزرگتر از $1/4V$) که از تقویت زیاد گاز در شمارگر ناشی می شوند باعث می شود که استفاده از تقویت کننده تپ به طور کلی منتفی شود و یا از تقویت کننده ای با تقویت کنندگی نه چندان زیاد استفاده شود.

شکل ۵.۹ قسمتهای پلاتوی آلفا و آلفا-بتا را در شمارگر تناسبی نشان می دهد. شمارگرهای گایگر نیز گستره وسیعی از ولتاژهای کار دارند که در آن آهنگ شمارش تقریباً از ولتاژ کار مستقل است. این قسمت پلاتو، تقریباً از ولتاژی که تپهای به اندازه کافی بزرگ برای عبور از دستگاه ممیز تولید می کند تا ولتاژی که آهنگ شمارش را آنچنان به سرعت افزایش می دهد که از فروریزش الکتریکی گاز شمارنده پیشی می گیرد، ادامه می یابد. در ناحیه گایگر، پدیده بهمن تا حد ممکن در امتداد محور آند گسترش پیدا می کند. بنا بر این، افزایش ولتاژ باعث گسترش بهمن در امتداد شعاع و افزایش آهنگ شمارش می شود. به این ترتیب، همان طور که در شکل ۶.۹ نشان داده شده است، اندکی شیب مثبت در قسمت پلاتو ایجاد می شود. عوامل مهمی که از روی آنها می توان درباره کیفیت شمارگر قضاوت کرد عبارت اند از طول قسمت پلاتو، شیب قسمت پلاتو، و زمان تفکیک (که بعداً توضیح آن می آید). معمولاً شیب بر حسب درصد افزایش آهنگ شمارش به ازای هر $100V$ داده می شود



شکل ۶۰۹ نمودار مشخصات کار شمارگر گایگر.

$$\text{شیب} = \frac{(C_2 - C_1)/C_1}{0.01(V_2 - V_1)} \times 100 \quad (2.9)$$

شیب شمارگرهای گایگر در حدود ۳٪ در ۱۰۰ ولت است، و ولتاژ کار آنها در فاصله حدود یک سوم تا یک دوم طول پلاتو از قسمت زانویی منحنی آهننگ شمارش بر حسب ولتاژ تعیین می شود.

فرونشانی شمارگر گایگر

هنگامی که یونهای مثبت پس از هر تپ جمع آوری می شوند، انرژی جنبشی خود را در اثر برخورد با جداره لوله از دست می دهند. بیشتر این انرژی به صورت گرما تلف می شود. اما، گاهی این انرژی صرف برانگیختن اتمها در لوله می شود. این اتمها هنگام برگشت به حالت پایه، ممکن است با گسیل فوتونهای فرابنفش انرژی برانگیختگی خود را از دست بدهند. چون در این لحظه میدان الکتریکی اطراف آنها به شدت تمام تقویت می شود، ممکن است برهم کنش میان فوتون فرابنفش و گاز داخل شمارگر بهمنی راه بیندازد و شمارش کاذب تولید کند. جلوگیری از این شمارش کاذب را فرونشانی می گویند. فرونشانی ممکن است الکترونیکی باشد که با کاهش ولتاژ آنها پس از هر تپ تا جمع آوری تمام یونهای مثبت همراه است، و یا شیمیایی که در آن از خود-فرونشانی بعضی از گازها استفاده می شود. در خود-فرونشانی، گاز می تواند فوتونهای فرابنفش را بدون اینکه یونیده شود جذب کند. یکی از راههای انجام این کار وارد کردن مقدار اندکی بخار ماده آلی از قبیل الکل یا اتر در لوله است. انرژی فوتون فرابنفش صرف تجزیه مولکول آلی می شود. بنابراین، چنین لوله ای تا زمانی مفید است که به تعداد کافی مولکول آلی برای عمل فرونشانی داشته باشد. در عمل بخار آلی شمارگر گایگر عمر مفیدی در حدود ۱۰^۸ شمارش دارد. در صورتی که گاز شمارگر مقدار کمی هالوژن داشته باشد نیز عمل خود-فرونشانی در آن انجام می شود. در این مورد، مولکول هالوژن پس از جذب انرژی از فوتون فرابنفش تجزیه نمی شود و در نتیجه، عمر مفید شمارگرهای محتوی فرونشاندن هالوژنی به تعداد تپهای تولید شده در آن محدود نمی شود.

زمان تفکیک

هرگاه دو ذره به فاصله خیلی کمی وارد شمارگر شوند، بهمن یونهای حاصل از ذره اول شمارگر را فلج می کند و مانع از آن می شود که در مقابل ذره دوم واکنش نشان بدهد. چون شدت میدان الکتریکی در نزدیکی سطح آند بیشینه است، بهمن یونش خیلی نزدیک به آند آغاز می شود و سپس در امتداد طول آن گسترش می یابد. از این رو، یونهای منفی به سوی آند و یونهای مثبت به طرف کاتد حرکت می کنند. یونهای منفی که در واقع همان الکترونها هستند بسیار تند حرکت می کنند و بزودی جمع آوری می شوند، در صورتی که یونهای مثبت به دلیل سنگینی تاحدی آهسته تر حرکت می کنند و بنابراین، قبل از آنکه جمع آوری شوند ناگزیر برای يك مدت نسبتاً طولانی در راه خواهند بود. زمان لازم برای جمع آوری یونهای مثبتی که در نزدیکی سطح آند تشکیل می شوند از معادله زیر به دست می آید

$$t = \frac{(b^2 - a^2)p \ln b/a}{2V\mu} \text{ s} \quad (3.9)$$

که در آن b شعاع کاتد بر حسب سانتی متر، a شعاع آند بر حسب سانتی متر، p فشار گاز در شمارگر بر حسب میلی متر جیوه، V اختلاف پتانسیل در دوسر شمارگر بر حسب ولت، μ تحرک یونهای مثبت بر حسب سانتی متر بر ثانیه به ازای هر ولت در سانتی متر است؛ مقدار μ برای هوا برابر ۱۵۷۵ و برای آرگون برابر ۱۵۴۰ است.

مثال ۱۰۹

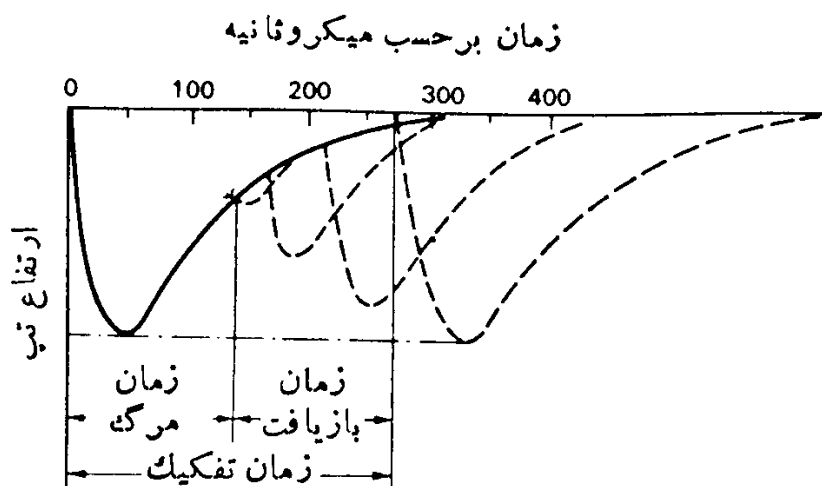
با فرض اینکه ولتاژ کار برابر ۱۵۰۰ V و شعاع کاتد و آند به ترتیب ۱ cm و ۰.۱ cm باشند، چقدر طول می کشد تا تمام یونهای مثبت تولید شده در يك شمارگر گایگر محتوی گاز آرگون با فشار ۱۰۰ mm Hg جمع آوری شوند؟

حل: برای به دست آوردن زمان لازم، مقادیر معلوم را در معادله (۳.۹) قرار می دهیم

$$t = \frac{(1 - 0.01^2) \times 100 \ln 1/0.01}{2 \times 1000 \times 1040}$$

$$= 221 \times 10^{-6} \text{ s}$$

یونهای کند مثبت در پیرامون آند که بار مثبت دارد پوششی به وجود می آورند و از این طریق شدت میدان الکتریکی اطراف آن را به شدت کاهش می دهند و ایجاد بهمن به وسیله ذره یوننده دیگر را غیر ممکن می سازند. هنگامی که پوشش یون مثبت به سوی کاتد حرکت می کند، شدت میدان الکتریکی آنقدر افزایش می یابد که بهمن دیگری بتواند راه بیفتد. زمان لازم برای حصول این شدت میدان الکتریکی را زمان هرگت می نامند. اما بعد از این زمان، که بهمن دیگری می تواند راه بیفتد، تپ خروجی ناشی از این بهمن هنوز نسبتاً کوچک



شکل ۷۰۹ نمودار رابطه بین زمان مرگ، زمان باز یافت، و زمان تفکیک.

است، زیرا شدت میدان الکتریکی به قدری نیست که تب گایگر تولید کند. با ادامه حرکت یونهای مثبت به سمت خسارج، بزرگی تپهای خروجی ناشی از ذره یوننده دیگر افزایش خواهد یافت. وقتی تپ خروجی به قدر کافی بزرگ باشد که بتواند از دستگاه ممیز بگذرد و شمارش شود، شمارگر از اثرات یونش پیشین رهایی یافته است، و در این حال فاصله زمانی بین زمان مرگ و رهایی کامل را زمان باز یافت می گویند. حاصل جمع زمان مرگ و زمان باز یافت را زمان تفکیک می نامند. از سوی دیگر، زمان تفکیک را می توان به صورت کمینه زمانی تعریف کرد که باید از آشکارسازی ذره یوننده قبلی بگذرد تا ذره دوم قابل آشکارسازی شود. رابطه میان زمان مرگ، زمان باز یافت و زمان تفکیک در شکل ۷۰۹ نشان داده شده است. زمان تفکیک هر شمارگر گایگر از مرتبه $100 \mu s$ یا بیشتر است. شمارگر تناسبی خیلی تندتر از شمارگر گایگر است. چون بهمن در شمارگر تناسبی به قسمت کوتاهی از طول آند محدود می شود، بهمن دوم می تواند در جای دیگری در امتداد آند راه بیفتد در حالی که ناحیه مربوط به بهمن اول کاملاً از کار افتاده و فلج است. بنابراین، زمان تفکیک شمارگرهای تناسبی از مرتبه چند میکروثانیه است.

اندازه گیری زمان تفکیک

زمان تفکیک هر شمارگر را می توان با استفاده از روش دو چشمه ای به راحتی اندازه گرفت. دو چشمه پرتوزا به طور جداگانه و با هم شمارش می شوند. اگر هیچ اتلاف زمان تفکیکی وجود نداشته باشد، آهنگ شمارش دو چشمه با هم باید برابر مجموع آهنگهای شمارش تک تک آنها به صورت جداگانه باشد. اما به دلیل افت شمارش ناشی از زمان تفکیک دستگاه شمارش، مجموع آهنگهای شمارش تک تک چشمه ها از آهنگ شمارش آنها با هم بیشتر است. اگر آهنگ شمارش چشمه اول R_1 و از آن چشمه دوم R_2 و آهنگ شمارش دو چشمه با هم R_{1+2} و آهنگ شمارش زمینه R_0 باشد، زمان تفکیک از رابطه زیر به دست می آید

$$\tau = \frac{R_1 + R_2 - R_{12} - R_b}{R_{12}^* - R_1^* - R_2^*} \quad (۲.۹)$$

تمامی آهنگهای شمارش چشمه که در بالا به آنها اشاره شد، شامل آهنگ شمارش زمینه هستند. چون $R_1 + R_2$ فقط اندکی بزرگتر از R_{12} است، هنگام تعیین زمان تفکیک باید تمام اندازه گیریها با دقت زیاد انجام شوند. درحالتی که زمان تفکیک τ و آهنگ شمارش مشاهده شده نمونه مورد نظر R_0 است، آهنگ شمارش «حقیقی» که در صورت عدم وجود اتلاف زمان تفکیک مشاهده خواهد شد عبارت است از

$$R = \frac{R_0}{1 - R_0 \tau} \quad (۵.۹)$$

شمارگرهای سوسوزن

آشکارساز سوسوزن مبدلی است که انرژی جنبشی ذره یوننده را به درخش نوری تبدیل می کند. از لحاظ تاریخی، می توان شمارش سوسوزن را یکی از نخستین وسایل اندازه گیری تابش به شمار آورد. رادرفورد در آزمایشهای کلاسیک خود در مورد پراکندگی ذرات آلفا، بلور سولفید روی را به عنوان آشکارساز اولیه تابش به کار برد و درخشهای حاصل از برخورد این ذرات با سولفید روی را با چشم مشاهده کرد. اما امروز این نور به طریق الکترونیکی و با لامپهای تکثیر کننده فوتونی که تپهای خروجی آنها را می توان تقویت، بر حسب اندازه دسته بندی، و شمارش کرد، دیده می شود. تابشهای مختلف را می توان با شمارگرهای سوسوزن و با استفاده از مواد سوسوزن مناسب آشکارسازی کرد. در جدول ۲.۹ برخی مواد که برای این مقصود مناسب هستند آمده است.

شمارگرهای سوسوزن برای شمارش پرتوهای گاما و پرتوهای بتای کم انرژی به طور وسیع به کار برده می شوند. به دلیل اتلاف انرژی بتا در داخل نمونه، ممکن است بازده شمارش شمارگرهای گایگر یا شمارگرهای تناسبی برای شمارش بتاهای کم انرژی کم باشد (این پدیده را خود-جذبی می گویند). ولی با حل کردن نمونه پرتوزا در یک مایع سوسوزن مانند تولوئن می توان این نقص را برطرف کرد. بازده آشکارسازی این شمارگرهای سوسوزن مایع به ۱۰۰٪ نزدیک می شود. این آشکارسازها در کاربردهای تحقیقاتی، مخصوصاً در زیست-شیمی برای اندازه گیری ^{14}C و ^3H به طور وسیع به کار می روند، اما شمارگرهای سوسوزن مایع در کارهای عملی فیزیک بهداشت کاربرد مستقیم چندانی ندارند.

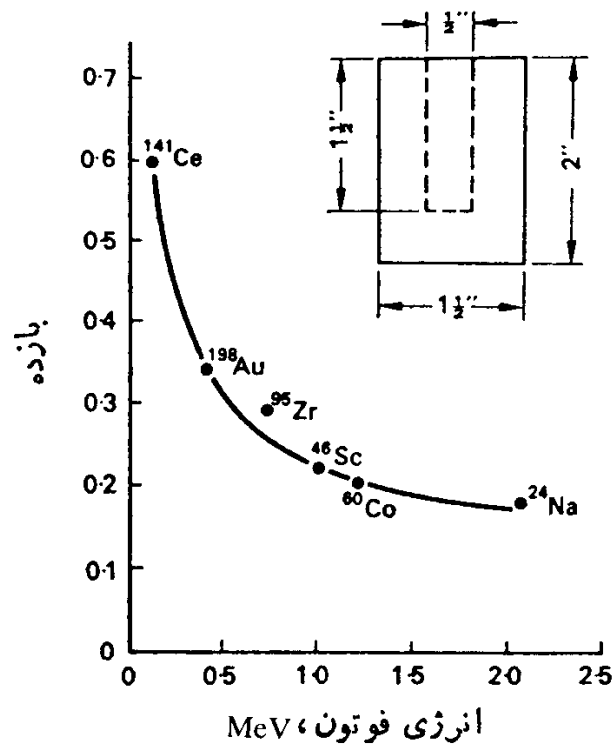
بازده ذاتی آشکارسازی شمارگرهای گازی برای پرتوهای آلفا و بتایی که وارد آنها می شوند نزدیک به ۱۰۰٪ است ولی برای پرتوهای گاما بسیار کم و معمولاً از ۱٪ نیز کمتر است. از طرف دیگر، بازده آشکارسازی بلورهای سوسوزن جامد برای پرتوهای گاما بسیار زیاد است. وانگهی، چون شدت درخش نور در آشکارساز با انرژی پرتوگامای مولد نور متناسب است، هر آشکارساز سوسوزنی می تواند به کمک وسایل الکترونیکی

جدول ۲.۹ مواد سوسوزن.

ماده فسفری	چگالی (g/cm ³)	طول موج گسیل بیشینه، Å	ارتفاع نسبی تپ	زمان واپاشی μs
NaI(Tl)	۳٫۶۷	۴۱۰۰	۲۱۰	۰٫۲۵
CsI(Tl)	۴٫۵۱	آبی	۵۵	۱٫۱
KI(Tl)	۳٫۱۳	۴۱۰۰	۵۰	۱٫۰
آنتراسن	۱٫۲۵	۴۴۰۰	۱۰۰	۰٫۰۳۲
ترانس - استیلبن	۱٫۱۶	۴۱۰۰	۶۰	۰٫۰۰۶۴
پلاستیک		۳۵۵۰-۴۵۰۰	۲۸-۴۸	۰٫۰۰۳-۰٫۰۰۵
مایع		۳۵۵۰-۴۵۰۰	۲۷-۴۹	۰٫۰۰۲-۰٫۰۰۸
ترفنیل - پی	۱٫۲۳	۴۰۰۰	۴۰	۰٫۰۰۵

مناسب، به عنوان طیف سنج پرتو گاما (و با يك آشکارساز مناسب به عنوان طیف سنج بتایا آلفا) به کار برده شود.

آشکارسازی که بیش از همه برای اندازه گیری پرتو گاما به کار می رود، آشکارساز بلور سدیم یدید است که با تالیم [NaI(Tl)] فعال می شود و به طریق اپتیکی با يك لامپ تکثیر کننده فوتونی جفت می شود. فعال ساز تالیم، که به صورت «ناخالصی» تا حدود ۲۰ درصد در ساختار بلور وجود دارد، انرژی جذب شده در بلور را به نور تبدیل می کند. چگالی زیاد بلور، همراه با عدد اتمی خیلی مؤثر آن بازده آشکارسازی را به مقدار زیادی افزایش می دهد (شکل ۸.۹). فوتونهای پرتو گامایی که از بلور می گذرند با همان سازوکارهای معمولی جذب فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، و تولید زوج با اتمهای بلور برهم کنش می کنند. ذرات یوننده اولیه حاصل از برهم کنشهای پرتو گاما (فوتوالکترونها، الکترونهای کامپتون، زوج الکترون - پوزیترونها) با برانگیختن و یونیدن اتمهای بلور انرژی جنبشی خود را از دست می دهند. اتمهای برانگیخته با گسیل کوانتومهای نور به حالت پایه برمی گردند. این تپهای نور بر اثر برخورد با کاند لامپ تکثیر کننده فوتونی که نسبت به نور حساس است موجب می شوند که الکترونها از کاند به خارج پرتاب شوند. الکترونهای خارج شده شتاب می گیرند و به الکتروود دوم که «دینود» نام دارد و پتانسیل آن نسبت به فوتوکاتد در حدود ۱۰۰ V مثبت است می رسند. هر الکترونی که به دینود برخورد می کند باعث می شود که چندین الکترون دیگر از آن پرتاب شوند و جریان اولیه الکترونها «افزایش» یابد. (یا

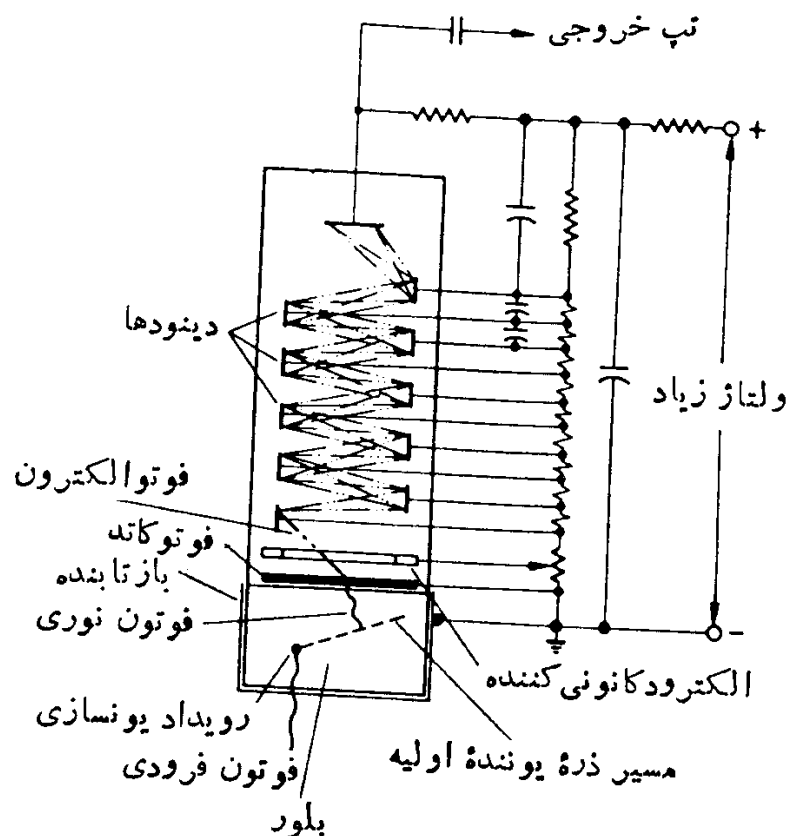


شکل ۸.۹ بازده آشکارسازی بر حسب انرژی پرتوگاما برای بلور NaI(Tl).

«تکثیر» شود). این فرایند تقریباً ۱۰ بار تکرار می‌شود تا تمامی الکترونهايي که به این طریق تولید می‌شوند در صفحه انتهایی لامپ تکثیرکننده فوتونی جمع‌آوری شوند. این تب جریان که بزرگی آن با انرژی ذره یوننده اولیه متناسب است می‌تواند تقویت و شمارش شود. شکل ۹.۹ توالی رویدادهای تحقق یافته در آشکارسازی فوتون‌را در اتاقک سوسوزن به صورت ساده نشان می‌دهد.

برهم کنش فوتوالکتریک در داخل بلور، فوتوالکترونهاي اساساً تک انرژی تولید می‌کند و این فوتوالکترونها نیز به نوبه خود تپهای نوری با شدت تقریباً یکسان تولید می‌کنند. چون این تپهای نوری شدت یکسان دارند، تپهای خروجی جریانی با بزرگی تقریباً یکسان پدید می‌آورند. از طرف دیگر، در پراکندگی کامپتون، از الکترون کامپتون طیف پیوسته انرژی به دست می‌آید. الکترونی که دارای بیشترین انرژی است از پس پراکندگی 180° فوتون فرودی ناشی می‌شود. این پراانرژیترین الکترون کامپتون را در طیف سنجی سوسوزن «لبه کامپتون» می‌گویند. فوتون پراکنده ممکن است از بلور عبور کند و از آن خارج شود، یا به وسیله جذب فوتوالکتریک (که محتملترین برهم کنش است) و یا پراکندگی کامپتون دیگر، دوباره برهم کنش کند.

در تولید زوج، با اتلاف انرژیهای پوزیترون و الکترون به طور همزمان در بلور، یک درخش نور که نشاندهنده انرژی فوتون اولیه منهای 1.02 MeV است، تولید می‌شود. پوزیترون، بعد از دست دادن انرژی با یک الکترون ترکیب می‌شود و در نتیجه این دو ذره باهم نابود می‌شوند، و دوفوتون با انرژی 511 MeV تولید می‌کنند.



شکل ۹.۹ نمودار توالی رویدادهای آشکارسازی فوتون یرتوگاما به وسیله شمارگر سوسون. هر الکترون فرودی به طور متوسط در حدود ۴ الکترون از هر دینود خارج می‌کند.

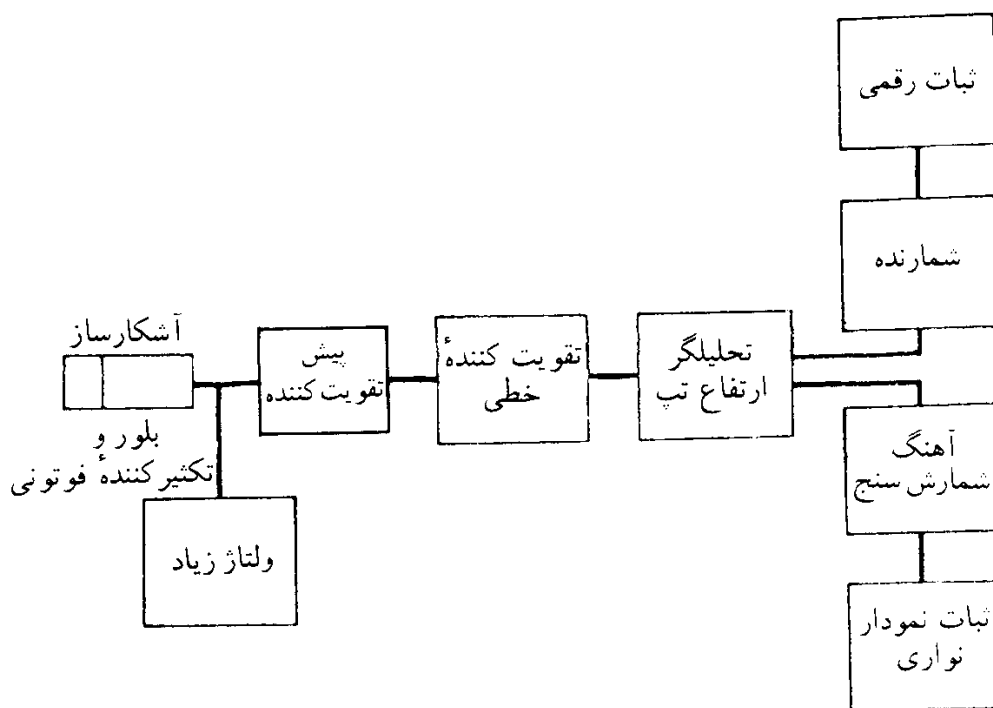
بنا بر این، بسته به توالی زمانی، اندازه بلور، و جایگاه هندسی برهم کنش اولیه، ممکن است با دو تب هر کدام با انرژی 51 MeV و یک تب نوری با انرژی 102 MeV ، یا یک تب نوری با انرژی کل فوتون اصلی روبه‌رو شویم.

طیف‌نمایی هسته‌ای

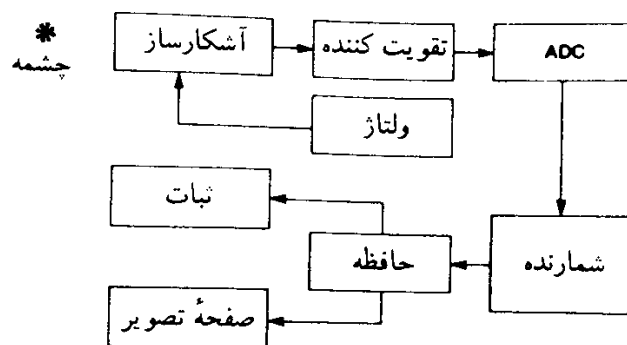
طیف‌نمایی هسته‌ای عبارت است از تحلیل چشمه‌های تابشی یا ایزوتوپهای پرتوزا از طریق اندازه‌گیری توزیع انرژی چشمه. طیف‌سنج وسیله‌ای است که تپهای خروجی آشکارساز را، که معمولاً آشکارساز سوسوزن یا نیم‌رساناست، برحسب اندازه آنها از هم جدا می‌کند. چون توزیع اندازه آنها با انرژی تابش آشکارسازی شده متناسب است، خروجی طیف‌سنج اطلاعات مفصلی را به دست می‌دهد که برای تشخیص ایزوتوپهای پرتوزای مجهول و برای شمارش يك ایزوتوپ در حضور ایزوتوپهای دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تکنیک در تحلیل پرتو x و پرتو گاما، با استفاده از آشکارسازهای نیم‌رسانا و آشکارسازهای سوسوزن $NaI(Tl)$ ، در تحلیل پرتو بتا با استفاده از آشکارسازهای سوسوزن مایع، و در تحلیل آلفا با استفاده از آشکارسازهای نیم‌رسانا کاربرد وسیع پیدا

کرده است. طیف‌سنج‌های هسته‌ای بر دو نوع اند: تحلیلگر تک‌کانالی (SCA) و تحلیلگر بس‌کانالی (MCA). اجزای اصلی طیف‌سنج تک‌کانالی عبارت است از یک آشکارساز، یک تقویت‌کننده خطی، یک گزینشگر ارتفاع تب، و یک وسیله قرائت مثل شمارنده یا آهنگ‌سنج (شکل ۱۰.۹) گزینشگر ارتفاع تب، یک «شکاف» الکترونیکی است که می‌توان آن را برای عبور تپ‌هایی که دامنه آنها میان دو حد کمینه و بیشینه دلخواه تغییر می‌کند، تنظیم کرد. خروجی تحلیلگر ارتفاع تب به صورت یک تب منطقی است که برای شمارنده یا آهنگ‌سنج شمارش‌سنج فرستاده می‌شود. کاربرد عمده تحلیلگر تک‌کانالی در مواردی است که می‌خواهند تابش مورد نظر را از تابش‌هایی که ممکن است نوفه تلقی شوند متمایز کنند. از این رو، طیف‌سنج تک‌کانالی برای اندازه‌گیری یک ایزوتوپ پرتوزا در حضور ایزوتوپ دیگر، یا برای بهینه‌کردن نسبت سیگنال به نوفه هنگام اندازه‌گیری یک چشمه با فعالیت کم در حضور یک زمینه قابل توجه به کار می‌رود.

در تحلیلگر بس‌کانالی (شکل ۱۱.۹)، به جای گزینشگر ارتفاع تب، از یک مبدل قیاسی به رقمی (ADC) استفاده می‌شود تا تمامی تپ‌های خروجی آشکارساز بر حسب ارتفاع آنها مرتب شوند. این تحلیلگر MCA یک حافظه از نوع حافظه کامپیوتری نیز دارد که اطلاعات حاصل از ADC یا هر چشمه دیگر را در خود ذخیره می‌کند. این ویژگی امکان انجام عملیات پردازش داده‌ها به صورت خودکار، مثل تفریق زمینه و تجزیه طیف، را فراهم می‌کند. تجزیه طیف، تکنیکی است که برای تحلیل طیف‌های مرکب، بر اساس تفریق متوالی طیف‌های پرتوگامای هر یک از ایزوتوپ‌های منفرد از طیف مرکب، مورد استفاده



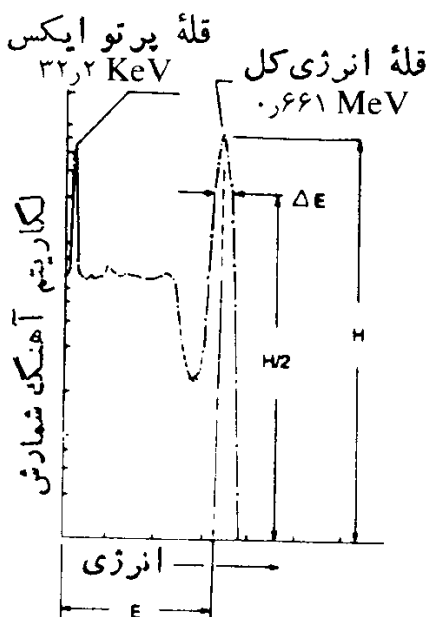
شکل ۱۰.۹ نمودار طیف‌سنج تک‌کانالی پرتوگاما.



شکل ۱۱.۹ نمودار ساده‌ای از تحلیلگر بس کانالی.

قرار می‌گیرد. به این نوع تحلیل وقتی نیاز داریم که نمونه مورد تحلیل حاوی چندین گسیلنده مختلف گاما باشد.

تبدیل قیاسی به رقمی با باردار کردن یک خازن تا حداکثر ولتاژ تپی که باید تحلیل شود، و سپس تخلیه آن، انجام می‌شود. در خلال تخلیه خازن، تپهای «ساعت» ناشی از یک نوسانگر بر بسامد به وسیله یک شمارنده شمارش می‌شود. تعداد تپهای ساعت شمرد شده در طول تخلیه خازن با زمان لازم برای تخلیه خازن، و از این رو با ارتفاع تپ خارج شده از آشکارساز متناسب است. خروجی ADC یک تپ منطقی است و در کانالی انباشته می‌شود که شماره یا «نشانی» آن با تعداد تپهای ساعت در طول تخلیه خازن مشخص می‌شود. بیشتر تحلیلگرهای بس کانالی تعدادی کانال دارند که به صورت توانی از ۲ در گستره ۱۲۸ تا ۴۰۹۶ تغییر می‌کنند. ظرفیت انباشت هر کدام از این کانالها ۱۰۵ تا ۱۰۶ شمارش است، و بسامدهای «ساعت» از ۴ تا ۱۰۰ MHz در تغییر است. طیف سنج بس کانالی می‌تواند شمارشهای هر کانال را چاپ کند و طیف پرتوگاما را با استفاده از یک اسیلوسکوپ به صورت مرئی نمایش دهد. در شکل ۱۲.۹ یک طیف ساده پرتوگاما به صورت نمونه نشان داده شده است.



شکل ۱۲.۹ طیف پرتوگامای ^{137}Cs . قله انرژی کل 0.661 MeV در واقع از گذار ایزومری $^{137\text{m}}\text{Ba}$ یا دختر هسته ^{137}Cs ناشی می‌شود. پرتو ایکس 32.2 keV مشخصه بسامد داریم از تبدیل داخلی ۸۵٪ از فوتونهای 0.661 MeV حاصل می‌شود.

طیف‌نمایی هسته‌ای بر تعیین محل خطوط طیف حاصل از جذب کامل ذرات باردار یا فوتونها مبتنی است. برای این منظور، اگر بخواهیم خطوط طیفی نزدیک به هم را از هم جدا و مشاهده کنیم، توان تفکیک آشکارساز از اهمیت خاصی برخوردار است. توان تفکیک به صورت نسبت پهنای خط در نیم‌بیشینه قله کامل انرژی FWHM (که غالباً هنگام کار با آشکارسازهای فوتونی به آن «قله نوری» می‌گویند) به انرژی نقطه میانی قله کامل انرژی (شکل ۱۲.۹) تعریف می‌شود. هرگاه پهنای خط در نیم‌بیشینه ΔE باشد، داریم

$$\text{درصد توان تفکیک} = \frac{\Delta E}{E} \times 100 \quad (۶.۹)$$

هرچه بخش انرژی ΔE کمتر باشد، توانایی آشکارساز در تفکیک قله‌های انرژی نزدیک به هم بیشتر است. توان تفکیک هر آشکارساز معین تابعی از انرژی است و با افزایش انرژی بهتر می‌شود. به عنوان مثال، توان تفکیک آشکارساز NaI(Tl) برای فوتون 100 keV ممکن است در حدود ۱۴٪ باشد، در صورتی که برای فوتون 1 MeV نزدیک به ۷٪ است.

آشکارساز چرنکوف

تابش چرنکوف عبارت است از نور مرئی حاصل از عبور یک ذره باردار در یک محیط، هنگامی که سرعت ذره از سرعت فاز نور در آن محیط بیشتر است. چون با افزایش ضریب شکست محیط، گسیل تابش چرنکوف تشدید می‌شود، آشکارسازهای چرنکوف از شیشه‌ای ساخته می‌شوند که چگالی آنها زیاد و ضریب شکست آنها برای خطوط D سدیم در گستره ۱۶ تا ۱۷ است. برای این کار از مایعات با ضریب شکست خیلی زیاد هم استفاده می‌شود. پس از آنکه تابش چرنکوف در آشکارساز تولید شد، به کمک یک تکثیر کننده فوتونی مورد مشاهده و اندازه‌گیری قرار می‌گیرد. معمولاً آشکارساز چرنکوف، به دلیل بستگی تابش چرنکوف به سرعت ذرات باردار، در فیزیک بهداشت کاربرد چندانی ندارد، ولی عمده‌تاً در تحقیقات فیزیک انرژی زیاد برای اندازه‌گیری سرعت ذرات پرانرژی مورد استفاده است.

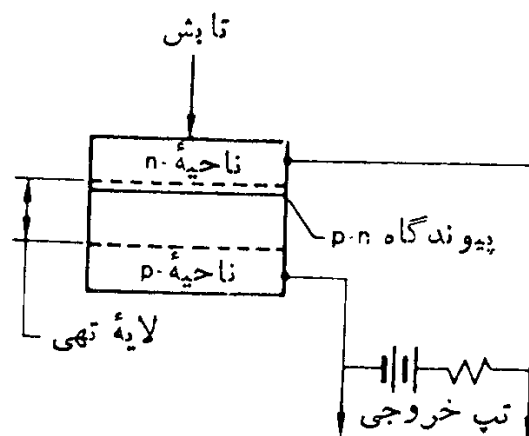
آشکارساز نیمرسانا

طرز کار آشکارساز نیمرسانا شبیه به اتاقک یونش حالت جامد است. ذره یوننده، نظیر بتا و آلفا و جز آن، با اتمهای آشکارساز در حجم حساس آن برهم کنش و بر اثر یونش الکترون تولید می‌کند. مجموعه این یونها یک تب خروجی تشکیل می‌دهد. در آشکارساز نیمرسانا (سیلیسیم) برای تولید هر رویداد یونشی فقط انرژی متوسطی در حدود 35 eV مورد

نیاز است، درحالی که در شمارگرهای گازی انرژی یونش نسبتاً زیادی در حدود $35-30$ eV لازم است.

نیمرسانا ماده‌ای است که خواص رسانش الکتریکی آن در فاصله بین «رسانای خوب» و «عایق» قرار دارد. اگرچه بیشتر مواد را می‌توان به عنوان نیمرسانا رده بندی کرد، ولی سیلیسیم و ژرمانیم بیشتر متداول اند. این دو عنصر، که هر کدام چهار الکترون ظرفیت دارند، بلورهای تشکیل می‌دهند که اتمهای شبکه آنها با پیوندهای کووالانسی به هم پیوسته اند. جذب انرژی به وسیله این بلورها به شکست پیوندهای اتمی می‌انجامد، و به تولید يك الکترون آزاد و يك «حفره» در جایگاهی که قبلاً الکترون ظرفیت آن را اشغال کرده بود منجر می‌شود. الکترون آزاد به راحتی می‌تواند در داخل بلور حرکت کند. هر يك از الکترونهاى مجاور حفره هم می‌توانند به داخل حفره بپرند و بدین ترتیب حفره دیگری تولید شود. قراردادن نیمرسانا در يك مدار الکتریکی بسته باعث می‌شود که الکترونها به سمت پایانه مثبت و حفره‌ها به طرف پایانه منفی به حرکت در آیند و جریانی در نیمرسانا برقرار شود.

اساس کار هر آشکارساز نیمرسانای تابش به مازاد الکترونها یا حفره‌ها بستگی دارد. نیمرسانایی که الکترون اضافی دارد به نوع n و نیمرسانایی که حفره اضافی دارد به نوع p معروف است. معمولاً تعداد الکترونها و حفره‌های بلور سیلیسیم خالص با هم برابر است. (این الکترونها و حفره‌ها از شکستن پیوندهای کووالانسی بر اثر جذب گرما یا انرژی نور تولید می‌شوند.) با اضافه کردن مقداری ناخالصی به بلور، می‌توان تعدادی الکترون اضافی (به صورت ناحیه n) یا تعدادی حفره اضافی (به صورت ناحیه p) تولید کرد. ژرمانیم و



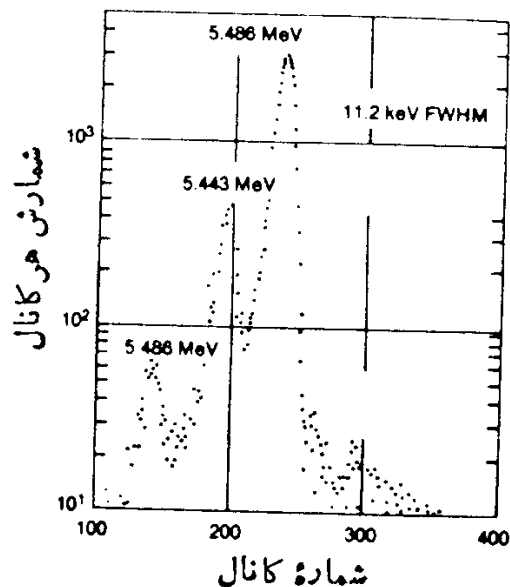
شکل ۱۳.۹ آشکارساز با پیوندگاه نیمرسانا. این آشکارساز برای اندازه گیری الکترونها و سایر ذرات باردار خیلی مفید است. برای اندازه گیری پرتوهای گاما، يك تابشگر الکترونی بین چشمه تابش و آشکارساز قرار داده می‌شود، و سپس الکترونهاى حاصل از اثر فوتوالکتریک و کامپتون به وسیله آشکارساز اندازه گیری می‌شوند.

۱. برای خارج کردن یکی از الکترونهاى ظرفیت سیلیسیم فقط $12eV$ انرژی لازم است.

سیلیسیم هردو در گروه چهارم جدول تناوبی قرار دارند. اگر اتمهای یکی از عناصر گروه پنجم جدول تناوبی مانند فسفر، آرسنیک، آنتیموان، و بیسموت که هر يك ۵ الكترون ظرفیت دارند به سیلیسیم یا ژرمانیم خالص افزوده شوند، چهار الكترون از پنج الكترون اتم افزوده شده با مشاركت اتمهای سیلیسیم یا ژرمانیم يك پیوند کووالانسی تشکیل می دهند. از این رو، الكترون پنجم ناخالصی يك الكترون اضافی است که می تواند آزادانه در بلور حرکت و در شارش جریان الكتریکی شرکت کند. تحت این شرایط بلور از نوع n است. نیم رسانای نوع p را که حفره اضافی دارد، می توان با افزودن يك ناخالصی از عناصر گروه سوم جدول تناوبی به بلور نیم رسانا تولید کرد. عناصر گروه سوم نظیر بور، آلومینیم، گادولینیم، یا اندیم، ۳ الكترون ظرفیت دارند. بنابراین، اضافه کردن یکی از آنها به عنوان ناخالصی در بلور سبب می شود که فقط ۳ پیوند از ۴ پیوند ظرفیت در شبکه بلور تشکیل شود. این کمبود يك الكترون معادل يك حفره است، و ژرمانیم یا سیلیسیم حاصل، بلوری از نوع p خواهد بود.

يك ناحیه p از سیلیسیم یا ژرمانیم را که در مجاورت يك ناحیه n قرار داشته باشد، پیوندگاه $n-p$ می گویند. اگر يك پیش ولت موافق به پیوندگاه اعمال شود، یعنی اگر ولتاژی به دوسر پیوندگاه اعمال شود که ناحیه p را به پایانه مثبت و ناحیه n را به پایانه منفی وصل کند، چون مقاومت ظاهری بین دوسر پیوندگاه بسیار کم است، جریانی الكتریکی در آن برقرار می شود. اگر قطبیت ولتاژ اعمال شده معکوس شود یعنی، اگر ناحیه n به پایانه مثبت و ناحیه p به پایانه منفی وصل شود، پیش ولت معکوس خواهیم داشت. تحت این شرایط هیچ جریانی در پیوندگاه برقرار نخواهد شد (به استثنای جریان خیلی ضعیفی که در اثر گرما از حرکت الكترونها و حفره ها حاصل می شود). ناحیه اطراف پیوندگاه، بر اثر اختلاف پتانسیل، از حفره ها و الكترونهاي نواحی p و n پاك می شود. این ناحیه که به آن لایه تهی می گویند، همان حجم حساس آشکارساز حالت جامد است. هنگامی که ذره یوننده از ناحیه لایه تهی می گذرد، بر اثر برخورد میان ذرات یوننده و بلور زوجهای الكترون - حفره تولید می شود. سپس میدان الكتریکی، حفره ها و الكترونها را از هم جدا می کند و بر اثر شارش الكترونها در مدار خارجی يك تپ الكتریکی در مقاومت بار تولید می شود.

آشکارسازهای نیم رسانا به دلیل اینکه ذاتاً توان تفکیک انرژی زیادی دارند در طیف نمایی هسته ای فوق العاده مفیدند. برای طیف نمایی ذرات باردار معمولاً از نیم رسانای نوع سد سطحی استفاده می کنند. شکل ۱۴.۹ توان تفکیک این نوع آشکارساز را نشان می دهد و چنانکه دیده می شود، ذرات آلفای با انرژی 5.443 MeV و 5.486 MeV به راحتی و وضوح از یکدیگر تفکیک شده اند. با استفاده از موادی نظیر گاز ^3He ، ^6Li ، ^{10}B ، ^{235}U ، یا مواد هیدروژنی که نسبت به نوترون حساسیت دارند و به کمک آشکارساز سد سطحی می توان هم نوترونهاي تند و هم نوترونهاي کند را مورد اندازه گیری قرار داد. برای طیف نمایی فوتون، از سیلیسیم لیتیم دار Si(Li) یا ژرمانیم لیتیم دار Ge(Li) استفاده می کنند. این آشکارسازها باید در دماهای فوق العاده پایین زمزاییک کار کنند. دماهای پایین



شکل ۱۴.۹ طیف آلفای ^{241}Am حاصل از آشکارساز سد سطحی سلیسیم.

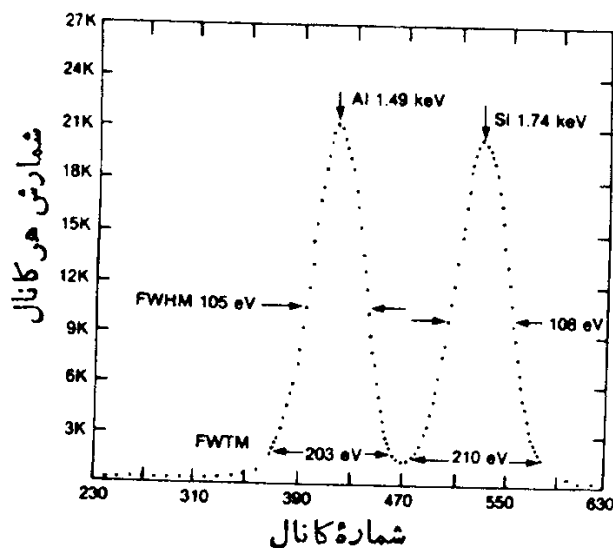
مورد نیاز را با نصب آشکارساز روی «انگشتانه سرد» و با غوطه‌ور کردن آن در نیتروژن مایع (77°K) در فلاسک دوجداره تأمین می‌کنند. در شکل ۱۵.۹ توان تفکیک حاصل از این نوع آشکارسازها نشان داده شده است.

مزایای آشکارسازهای نیم‌رسانا به شرح زیر است:

- (الف) شمارش خیلی سریع به خاطر زمان تفکیک بسیار کوتاه (از مرتبه نانو ثانیه)
- (ب) توان تفکیک بالا برای انرژی
- (ج) ولتاژ کار نسبتاً پایین در حدود ۲۵ تا ۳۰۰ ولت.

وسایل اندازه‌گیری دز

شارت‌بش فقط یکی از چندین عاملی است که دز تابش را تعیین می‌کنند. اینکه وسیله اندازه‌گیری شارت‌بش لزوماً دز را اندازه نمی‌گیرد در مثال زیر دیده می‌شود.



شکل ۱۵.۹ خطوط مشخصه پرتو ایکس حاصل از نمونه‌ای از آلومینیم. این طیف توان تفکیک زیاد آشکارساز Si (Li) را برای فوتونهای با انرژی کم نشان می‌دهد.

مثال ۲.۹

دو میدان تابش با چگالی انرژی یکسان را در نظر می‌گیریم. در یکی از این دو میدان شار فوق‌فوقنی ۱ MeV با ۲۰۰۰ فوتون در سانتی‌متر مربع بر ثانیه و در دیگری شار فوتونی ۲ MeV با شار ۱۰۰ فوتون در سانتی‌متر مربع بر ثانیه است. در صورتی که ضریب جذب انرژی ماهیچه نسبت به تابش گامای ۱ MeV برابر $0.0252 \text{ cm}^2/\text{g}$ ؛ ضریب جذب انرژی نسبت به گامای ۲ MeV برابر $0.0257 \text{ cm}^2/\text{g}$ فرض شود، آهنگهای دز این دو میدان تابشی با رابطه زیر داده می‌شود

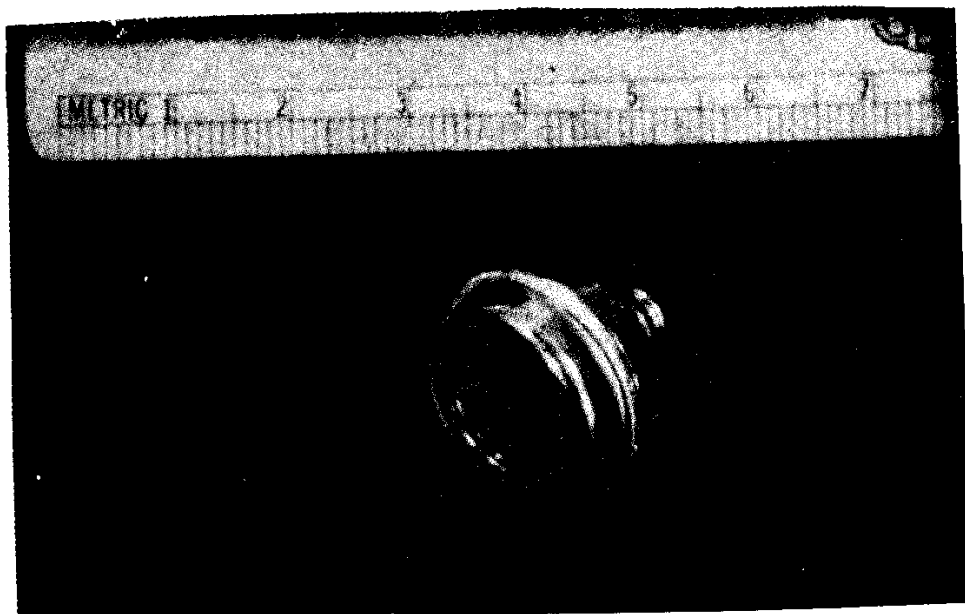
$$\dot{D} = \frac{\phi \text{ فوتون}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \times E \text{ MeV}/\text{فوتون} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \times \mu \text{ cm}^2/\text{g}}{10^{-3} \frac{\text{J}}{\text{g}} / \text{Gy}}$$

(۷.۹)

$$= 8.1 \times 10^{-10} \text{ Gy/s} \quad \text{برای تابش ۱ MeV}$$

$$= 7.6 \times 10^{-10} \text{ Gy/s} \quad \text{و برای فوتونهای ۲ MeV}$$

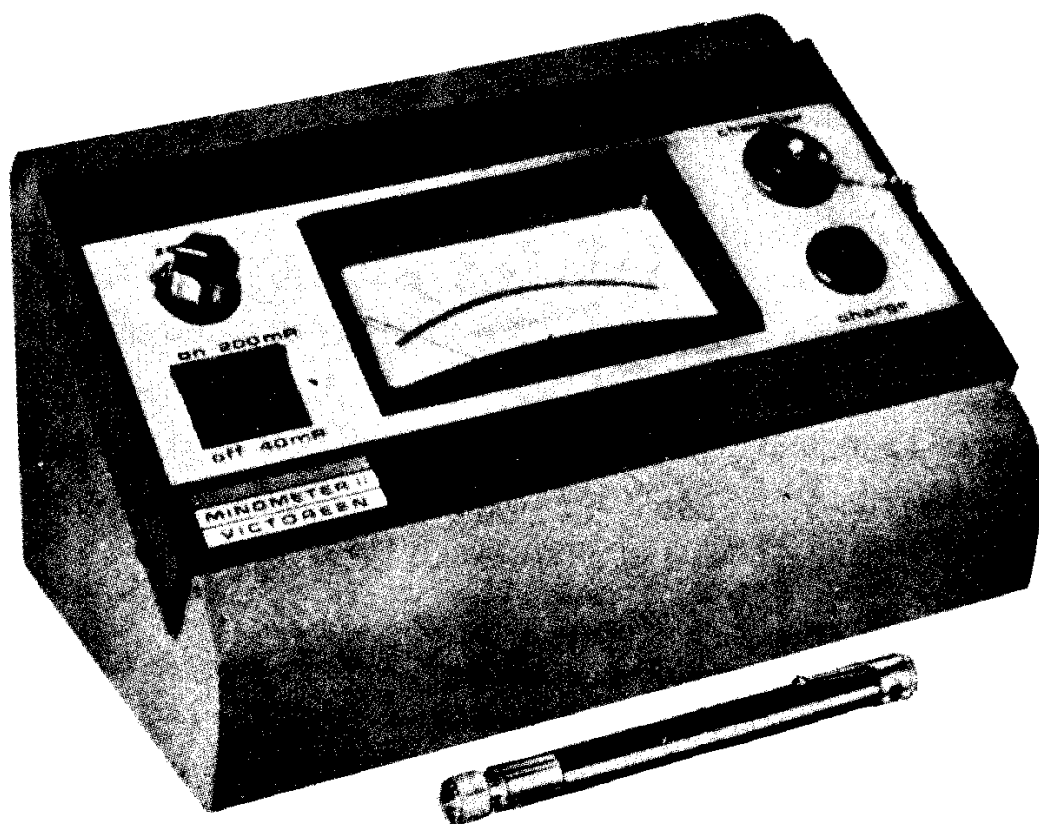
بنابراین آهنگهای دز این دو میدان تابشی تقریباً باهم برابر است. اما وسیله اندازه‌گیری شار، مثلاً شمارگر گایگر تسابش ۱ MeV را در حدود ۲۰ برابر بیشتر از تابش با انرژی زیاده‌تر نشان می‌دهد.



شکل ۱۶.۹ عکس آشکارساز حالت جامد لیتیم‌دار که درجه جلوی آن از جنس طلا به ضخامت $1/2 \mu$ است. این آشکارساز برای اندازه‌گیری ذره باردار و تابش الکترومغناطیسی به کار می‌رود. پرتوهای گاما با توان تفکیک زیاد ولی با بازده کم آشکارسازی می‌شوند، درحالی که هم توان تفکیک و هم بازده آشکارسازی ذرات بسیار بالاست.

دزسنج‌های جیبی

برای اندازه‌گیری دز تابش، واکنش وسیله اندازه‌گیری باید متناسب با انرژی جذب شده باشد. در فصل ۶ اتاقک یونش هوای آزاد را، که وسیله اصلی اندازه‌گیری تابش است، توصیف کردیم. در آن فصل همچنین نشان دادیم که هر اتاقک یونش با «دیواره هوا» را می‌توان بر اساس تعریف عملیاتی یکای پرتوگیری، یا رونتگن، ساخت و آن را برای اندازه‌گیری پرتوگیری به کار برد. این نوع اتاقک‌های یونش را، که به «دزسنج جیبی» معروف اند، می‌توان برای دیدبانی کارکنان به‌طور وسیعی به کار برد. دو نوع دزسنج جیبی متداول است: یکی نوع خازن است که در شکل ۲.۶ نشان داده شده است. این دزسنج از نوع قرائت غیرمستقیم است و در آن برای قرائت دز اندازه‌گیری شده از یک وسیله کمکی استفاده می‌شود. این وسیله کمکی را، که در واقع یک ولت‌سنج الکتروستاتیکی است و بر حسب رونتگن مدرج می‌شود، وسیله قرائت شارژ کننده می‌گویند (زیرا برای باردار کردن اتاقک نیز از آن استفاده می‌کنند). اصطلاح مینومتر اغلب به‌عنوان مترادف برای وسیله قرائت شارژ کننده به کار می‌رود. در شکل ۱۷.۹ عکس یک دز سنج جیبی و وسیله قرائت شارژ کننده آن دیده می‌شود. دزسنج‌های جیبی از نوع خازن تجارتی، پرتوگیرهای

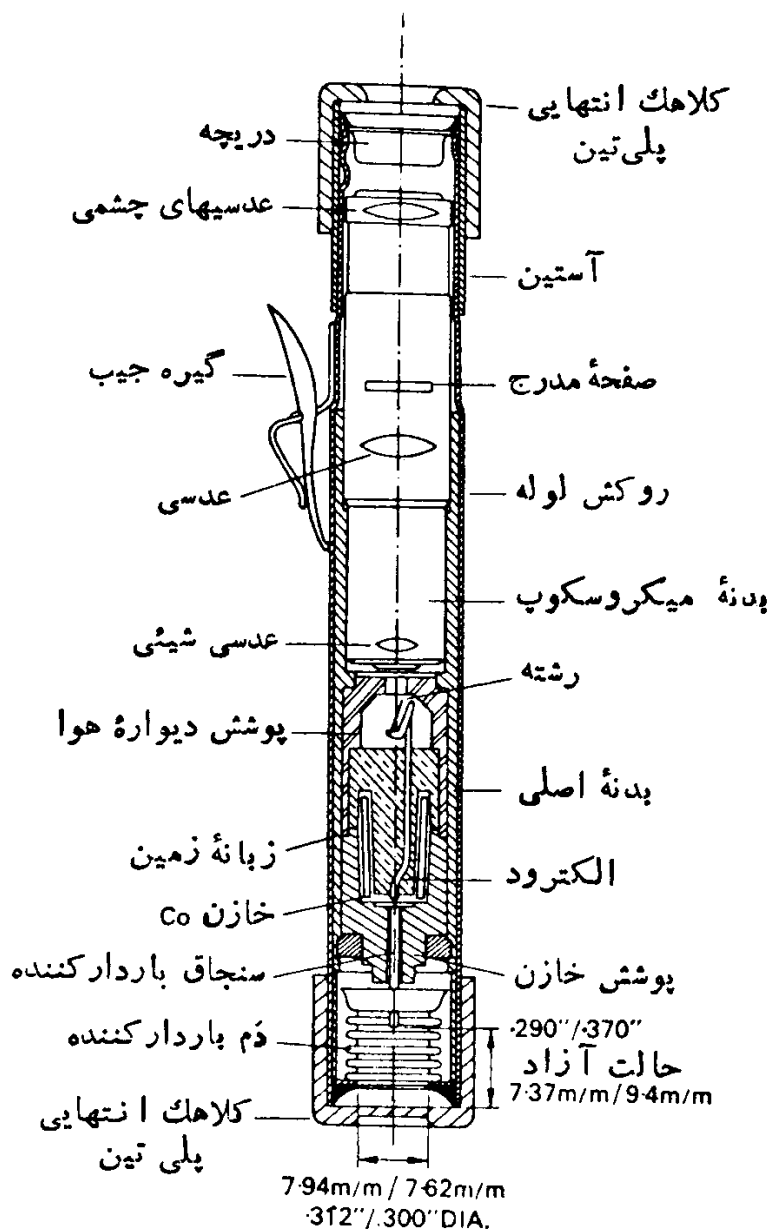


شکل ۱۷.۹ دزسنج جیبی از نوع خازن و وسیله قرائت شارژ کننده آن. این دزسنج پرتوهای ایکس و گاما را با خطای $\pm 15\%$ درصد در گستره انرژی از 30 keV تا 1.2 MeV و در گستره دز از صفر تا 200 mR اندازه می‌گیرد.

کل پرتوهای x و γ را تا 200 mR با دقتی در حدود $\pm 15\%$ درصد برای انرژیهای فوتونی بین حدود 0.05 MeV و 2 MeV اندازه می گیرند. برای انرژیهای فوتونی خارج از این گستره باید از ضرایب تصحیح که شرکت سازنده ارائه می کند استفاده شود. این نوع دزسنجها برای پرتوهای بتای با انرژی بیش از 1 MeV به کار می روند. با اندودن داخل اتاقک با عنصر بور می توان کاری کرد که دزسنج جیبی نسبت به نوترونهای گرمایی حساس شود. اما دزسنج جیبی استاندارد فقط برای سنجش تابشهای گاما و ایکس به کار می رود. این دزسنج با استفاده از پرتوهای گامای رادیوم ^{60}Co یا ^{137}Cs مدرج می شود. دزسنجهای جیبی، حتی هنگامی که در میدان تابشی قرار ندارند، به دلیل وجود تابش کیهانی و نشت بار از عایقی که الکتروود مرکزی را از الکتروود خارجی جدا می کند، به تدریج تخلیه می شوند. از دزسنجی که بیشتر از 5% مقیاس کامل در روز نشتی داشته باشد، نباید استفاده شود. معمولاً دو دزسنج جیبی را به طور همزمان به کار می برند. زیرا هر نوع بدکار کردن دستگاه همواره باعث می شود که مقدار دز زیادتر از حد واقعی نشان داده شود، که در این موارد مقدار کمتر این دو را به عنوان دز دقیقتر در نظر می گیرند. به دلیل نشت و احتمال بدکار کردن ناشی از افتادن دزسنج، معمولاً هر دزسنج جیبی را فقط برای یک روز به کار می برند. پس از خواندن دزسنج، محتوای اطلاعات آن پاک می شود و بنابراین لازم است دوباره باردار شود.

دزسنج جیبی دوم از نوع قرائت مستقیم است و بر اساس الکتروسکوپ زوررقی کار می کند (شکل ۱۸.۹). در این دزسنج رشته کوارتزی که تا پتانسیل حدود 200 V باردار می شود به طریق الکتروستاتیکی جابه جا می شود. تصویری از این رشته روی یک مقیاس می افتد و با عدسی واقع در انتهای دزسنج مشاهده می شود. وقتی دزسنج در معرض تابش قرار می گیرد، رشته کوارتز بار الکتریکی اش را از دست می دهد و به وضع اولیه خود بازمی گردد. مقدار تخلیه رشته و میزان جابه جا شدن آن با پرتودهی تابش متناسب است. مزیت دزسنج قرائت مستقیم در این است که پس از قرائت لازم نیست دوباره باردار شود. گستره دزسنجهای قرائت مستقیمی که به صورت تجارتي عرضه می شوند، از صفر تا 200 mR است که پرتوگیری از انرژیهای حدود 50 keV تا 2 MeV را با خطای $\pm 15\%$ درصد مقدار واقعی به دست می دهند. در این دزسنج باید از یک وسیله باردارکننده کمکی استفاده شود.

دزسنجهای جیبی، همچنانکه از اسمشان بر می آید، عمدتاً به عنوان وسایل دیدبانی کارکنان به کار می روند، و کسانی که ممکن است در معرض پرتوهای گاما یا x قرار بگیرند آنها را با خود همراه می برند. اما از این وسایل، با قراردادن آنها در نقاطی که باید دز پرتودهی در آنجا اندازه گیری شود، می توان به عنوان وسایل دیدبانی ناحیه ای استفاده کرد. برای این کار یک یا چند دزسنج را برای مدت حداکثر تا یک هفته در محل مورد نظر قرار می دهند. برای کاربردهای دیدبانی ناحیه ای اتاقکهای با حجم بیشتر وجود دارد (شکل ۱۹.۹) که از دزسنج جیبی خیلی حساسترند. این نوع اتاقکها، که اغلب آنها را

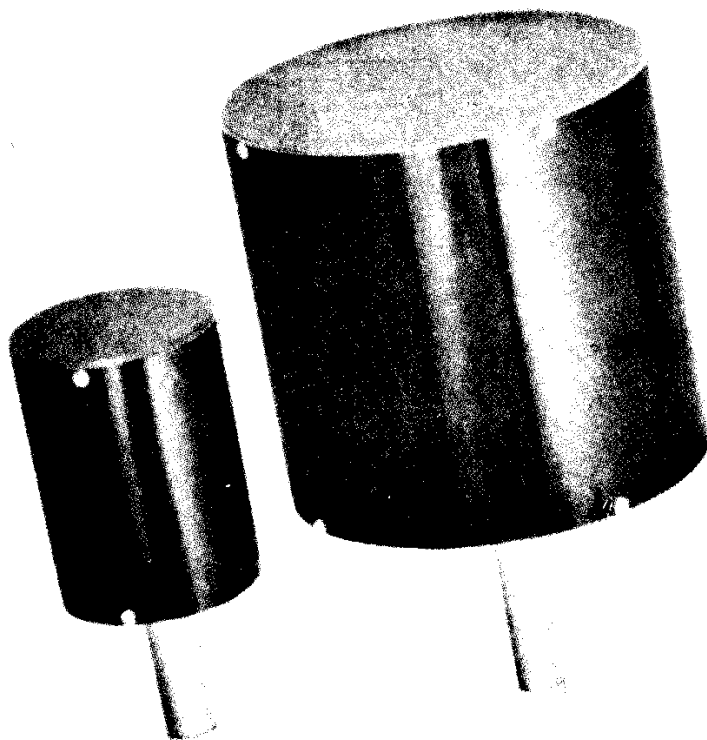


شکل ۱۸۰۹ سطح مقطع ساده‌ای از دزسنج جیبی قرائت مستقیم نوع الکتروسکوپ با رشته کواردتز. ویژگی‌های وابسته به انرژی این نوع دزسنج جیبی در شکل ۴۰۶ نشان داده شد.

اتاقکهای تابش سرگردان می‌گویند، درست مانند دزسنجهای جیبی نوع خازن مجهز به وسیله قرائت شارژکننده هستند، و مخصوصاً برای دیدبانی تابش پراکنده حاصل از دستگاههای پرتو X پزشکی و دندانپزشکی بسیار مفیدند.

فیلم بچ

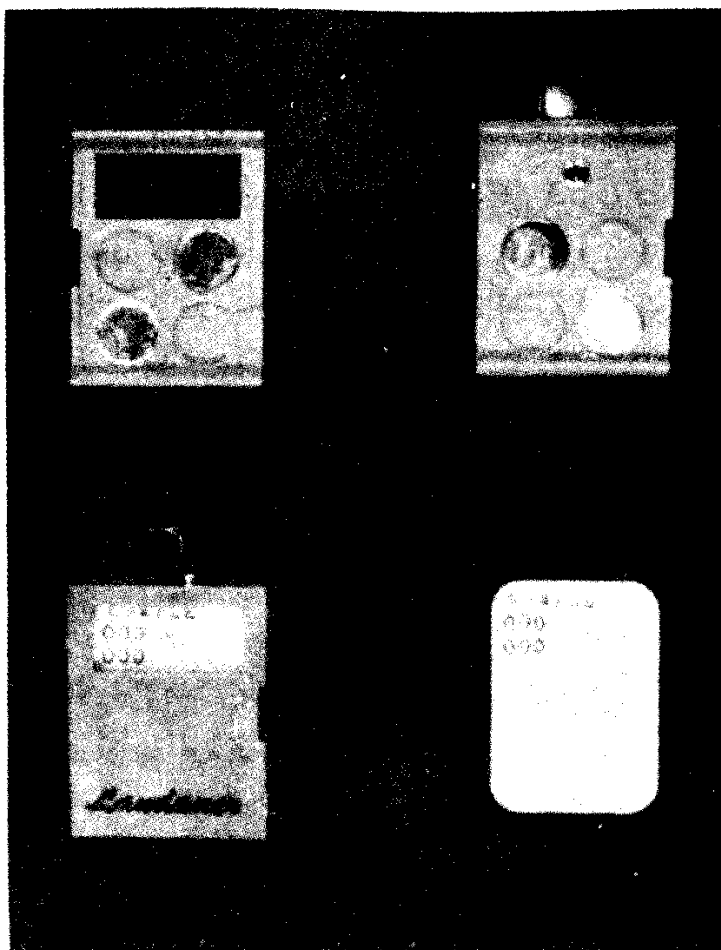
فیلم بچ یکی دیگر از وسایل دیدبانی شخصی است که کاربرد بسیار وسیعی دارد (شکل ۲۵۰۹). این وسیله متشکل است از یک بسته کوچک شامل دو قطعه فیلم (برای گاما و ایکس) یا سه قطعه فیلم (برای نوترونها، گاما، و ایکس) به اندازه فیلمهای عکسبرداری از



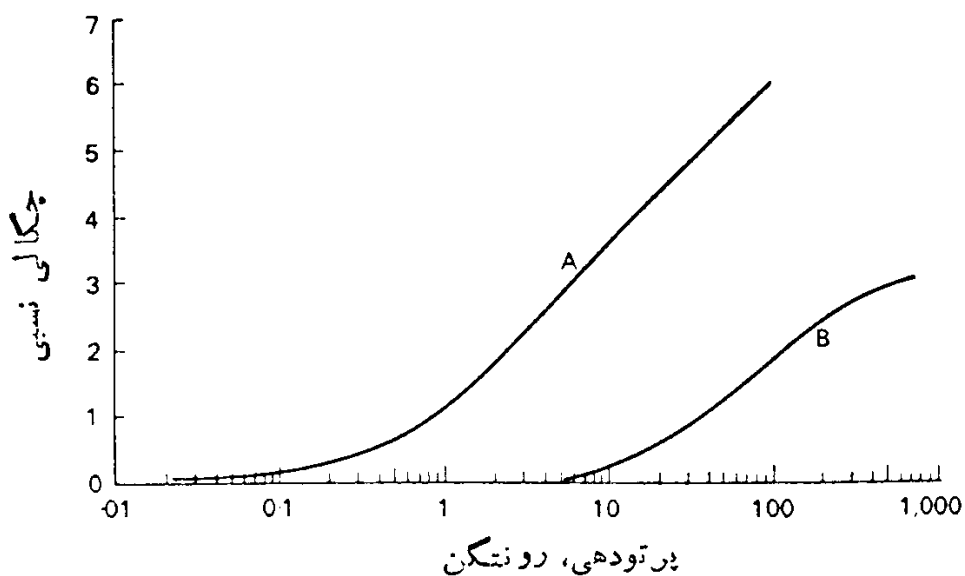
شکل ۱۹.۹ اتاقکهای تابش سرگردان، گستره اندازه گیری دز اتاقک کوچکتر از صفر تا 10 mR و گستره اتاقک بزرگتر که حساستر نیز هست از صفر تا 1 mR است. همراه با این اتاقکها وسیله «قرائت شارز کننده» شکل ۱۷.۹ به کار می رود.

دندانها که در یک کاغذ ضد نور پیچیده شده و در داخل یک پوشش فلزی یا پلاستیکی مناسب قرار گرفته است. دو قطعه فیلم مربوط به تابش گاما و ایکس شامل یک امولوسیون حساس و یک امولوسیون نسبتاً غیر حساس است. این بسته فیلم روی گستره پرتو دهی از حدود 10 mR تا 1800 R پرتوهای گامای ناشی از رادیوم قابل استفاده است. این فیلم در برابر تابش بتا نیز حساس است، و می تواند برای اندازه گیری دز بتاهایی که انرژی بیشینه آنها بیشتر از حدود 400 keV باشد و گستره پرتو دهی آنها از (5 mGy) تا (50 mrad) (تا 10 Gy) قرار داشته باشد به کار رود. با استفاده از تکنیکها و فیلم مناسب می توان دز نوترونهای گرمایی از 5 mrad تا (5 Gy) و دز نوترونهای تند از حدود $(40 \mu\text{Gy})$ تا 4 mrad (تا 1 Gy) را اندازه گیری کرد.

دزسنجی فیلم بیج بر این واقعیت مبتنی است که تابش یوننده به هالید نقره موجود در امولوسیون عکاسی می تواند و این عمل به تیره شدن فیلم می انجامد. میزان تیرگی فیلم را که چگالی اپتیکی فیلم نامیده می شود، می توان با یک چگالی سنج فوتوالکتریک که در آن قرائت به صورت لگاریتم نور عبور کرده از فیلم بیان می شود، به دقت اندازه گیری کرد. مقدار چگالی اپتیکی فیلم پس از پرتو گیری، به میزان پرتو گیری (شکل ۲۱.۹) وابسته است. با مقایسه چگالی اپتیکی فیلمی که شخص پرتو گرفته از آن استفاده کرده است با فیلمهایی که مقدار معلومی پرتو گرفته اند، می توان پرتو گیری فیلم شخص مورد نظر را معین



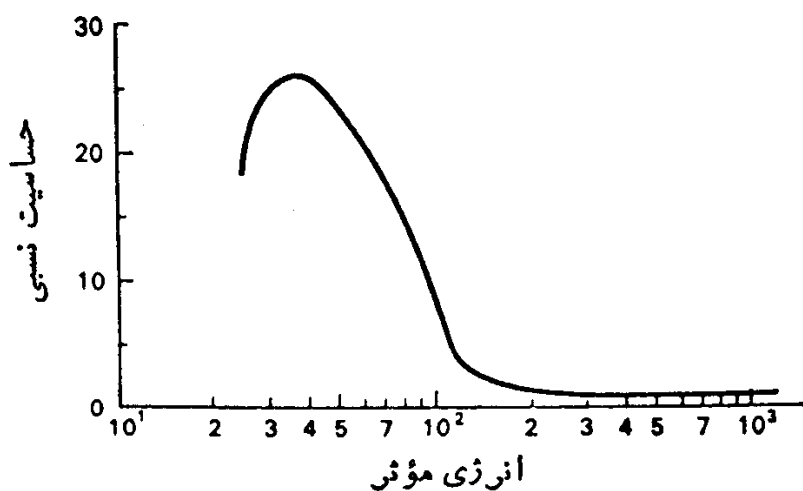
شکل ۲۰۰۹ دزسنج فیلم بچ پرتوهای بتا و ایکس. برای دزسنجی نوترون، بسته فیلم دیگری که نسبت به نوترون حساس باشد، همراه بایک صافسی اضافی از جنس کادمیم به فیلم بچ اضافه می‌شود.



شکل ۲۱۰۹ ارتباط بین پرتودهی تابش و چگالی اپتیکی. منحنی A نمودار پاسخ دزسنجی فیلم ۵۵۵ duPont و منحنی B پاسخ فیلم ۸۳۴ duPont در مقابل پرتوهای ^{60}Co است.

کرد. تغییرات اندکی درامولوسیونها تأثیر زیادی در پاسخ کمی آنها در برابر تابش دارد. چون فیلمهایی که در فیلم بجها به کار می‌روند، به صورت یک دسته مجموعه‌ای و یکجا تولید می‌شوند، و چون ممکن است هر دسته بادسته دیگر اندکی فرق داشته باشد، لازم است فیلمهای هر دسته به‌طور جداگانه مدرج شوند.

فیلمهای به‌کاررفته در دزسنجهای فیلم بچ، در گستره انرژی کم، یعنی از حدود 0.02 MeV به پایین کاملاً وابسته به انرژی هستند (شکل ۲۲.۹). این بستگی به انرژی ناشی از این واقعیت است که سطح مقطع فوتوالکتریکی نقره درامولوسیون با کاهش انرژی فوتون به پایینتر از حدود 200 keV ، خیلی سریعتر از سطح مقطع هوا یا بافت بدن افزایش می‌یابد. حساسیت بیشینه مشاهده شده در حدود $40-30 \text{ keV}$ است. پایینتر از این انرژی، به دلیل تضعیف تابش به وسیله پوشش کاغذی حساسیت فیلم کاهش می‌یابد. در نتیجه بستگی خیلی شدید به انرژی، دزسنجی فیلم برای پرتوهای ایکس کمتر از 200 keV بی‌فایده است، مگر اینکه فیلم با تابشی مدرج شود که توزیع انرژی آن با توزیع انرژی تابش تحت دیدبانی برابر باشد یا بستگی انرژی فیلم هم منظور شود. برای منظور کردن بستگی انرژی فیلم از صافی گزینشی استفاده می‌کنند. نگهدارنده فیلم بچ طوری ساخته می‌شود که تابش از طریق یک دریچه باز، یا از طریق خود نگهدارنده، و یا یکی از چندین صافی مختلف آلومینیم، کادمیم، قلع، نقره، و سرب به فیلم برسد. طرح و انتخاب دقیق صافی به نوع تابشی که باید دیدبانی شود بستگی دارد. در این صورت ارزیابی پرتوگیری، با بررسی نسبت چگالیهای اپتیکی پس از کاربرد هر یک از صافیهای مختلف انجام می‌شود. دز پرتو بتا از نسبت قرائت فیلم با دریچه باز به قرائت در پشت صافیها به دست می‌آید. اگر پرتو دهی فقط از نوع تابش بتا باشد، تیرگی فقط در سطح دریچه باز مشاهده خواهد شد. مثلاً برای تمیز پرتوهای گامای کم انرژی از پرتوهای بتا، تیرگی ناحیه دریچه باز را با تیرگی تحت دو صافی نازک مانند آلومینیم و نقره که ضخامت چگالشی آنها یکسان است و بنا بر این از نظر جذب پرتو بتا معادل یکدیگرند، مقایسه می‌کنیم. اما، عدد اتمی متفاوت باعث می‌شود



شکل ۲۲.۹ بستگی پاسخ دزسنج فیلم بچ نسبت به انرژی پرتوهای ایکس.

که پرتو γ کم انرژی در صافی نقره خیلی بیشتر از صافی آلومینیم جذب شود و بنا بر این میزان تیرگی فیلم با این دو صافی متفاوت باشد. تعبیر مخلوطی از تابش بتا-گاما با فیلم بچ، به دلیل توان نفوذ فوق العاده متفاوت این دو پرتو مشکل است. به همین دلیل، اطلاعات حاصل از دیدبانی پرتو بتا با فیلم بجها عمدتاً به صورت کیفی یا نیمه کمی برای ارزیابی پرتوگیری قابل استفاده است.

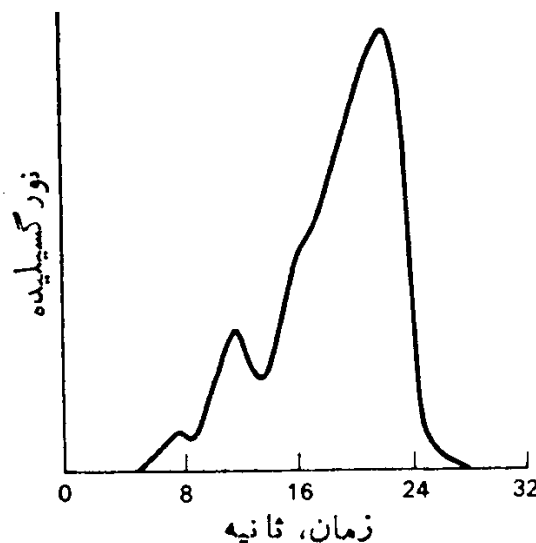
نوترونهاى تند با انرژی بیش از $1/2 \text{ MeV}$ را می توان با فیلم رد هسته ای مانند ایستمن کدک NTA که به فیلم بچ افزوده می شود دیدبانی کرد، وقتی که فیلم تحت تابش نوترونهاى تند قرار می گیرد، در اثر برخورد کسان با هسته های هیدروژن موجود در پوشش کاغذی امولوسیون و در پایه فیلم ردهای پس زنی پروتون تولید می شود. اگرچه با افزایش انرژی نوترون سطح مقطع پراکندگی (n, p) از ۱۳ بارن در 1 MeV به ۴٫۵ بارن در 1 MeV و به ۱ بارن در 10 MeV کاهش می یابد، پرتوهای پس زنی با انرژی پایینتر از حدود $1/2 \text{ MeV}$ توانایی تولید رد قابل تشخیص را نخواهند داشت، و در نتیجه آستانه در انرژی $1/2 \text{ MeV}$ خواهد بود. به دلیل اینکه تراکم اتمهای هیدروژن در فیلم در پوشش کاغذی تقریباً تفاوت محسوسی با بافت ندارد، پاسخی که فیلم به نوترونهاى تند می دهد تقریباً معادل پاسخ بافت موجود زنده است، و تعداد ردهای پروتون در واحد سطح فیلم با دز جذب شده متناسب است. پرتوگیری نوترون تند با بررسی فیلم ظاهر شده و با شمارش تعداد ردهای پروتون در هر سانتی متر مربع فیلم برآورد می شود. بیشینه مجاز آهنگ دز برای نوترونهاى تند برابر 1 mSv (100 mrem) در هفته است، که با چگالی یانگین حدود ۲۶۰۰ رد در هر سانتی متر مربع فیلم NTA برای نوترونهاى چشمه Pu-Be متناظر می شود. چون با عددی غوطه ور روغنی، سطحی در حدود $2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ دیده می شود، دز 100 mrem نوترون تند به طور متوسط با حدود يك رد پس زنی پروتون در هر میدان دید میکروسکوپی متناظر است.

نوترونهاى گرمایی نیز در نتیجه گیراندازی در نیتروژن موجود در فیلم نوترونی، طبق واکنش $^{14}\text{C}(n, p)^{14}\text{N}$ ، ردهای پس زنی پروتون تولید می کنند. اگرچه در این واکنش سطح مقطع نوترونهاى 2200 m/s برابر ۱٫۷۵ بارن است، ولی به دلیل تراکم کمتر نیتروژن در فیلم در مقایسه با تراکم هیدروژن، حساسیت این واکنش به ازای هر نوترون نسبت به واکنش پراکندگی (n, p) برای نوترونهاى تند کمتر خواهد بود. با وجود این، چون رد عمل نوترونهاى تند معمولاً قسمتی از يك میدان تابش مخلوط هستند که شامل نوترونهاى گرمایی (و تابش گاما) است، و چون شار مجاز نوترونهاى گرمایی خیلی بیشتر از نوترونهاى تند است، باید سهمی برای ردهای پروتون ناشی از نوترونهاى گرمایی نیز در نظر گرفته شود. هر فیلم بجی که برای کار در يك میدان تابش مخلوط، که نوترونها را هم شامل می شود، ساخته شده باشد همواره حداقل دو صافی فلزی با ضخامت چگالشی مساوی دارد که یکی از آنها کادمیم و دیگری معمولاً قلع است. کادمیم يك سطح مقطع خیلی بزرگ دارد که مقدار آن برای واکنش $^{113}\text{Cd}(n, \gamma)^{114}\text{Cd}$ با نوترونهاى 0.025 eV

برابر ۲۵۰۰ بارن و با نوترونهای 179 eV برابر ۷۴۰۰ بارن است. سطح مقطع گیراندازی قلع برای نوترونهای گرمایی بسیار کوچک است. در نتیجه، میدان نوترون گرمایی تحت صافی قلع يك چگالی رد خیلی زیاد از خود نشان می‌دهد، و تحت صافی کادمیم هیچ ردی در آن دیده نمی‌شود. از طرف دیگر، نوترونهای تند تحت هردو صافی چگالی رد یکسانی دارند. به دلیل واکنش (n, γ) در کادمیم، میدان نوترون گرمایی تحت صافی کادمیم ناحیه تیره‌تری روی فیلم پرتوگاما تولید می‌کند تا تحت صافی قلع. تابش گاما، درغیاب نوترونها، فیلم را تحت هردو صافی به يك اندازه تحت تأثیر قرار می‌دهد. با شمارش ردها و اندازه‌گیری چگالی فیلم پرتوگاما، می‌توان شار نوترون گرمایی را تعیین کرد و در تعیین شار نوترون تند نیز، چگالی رد زمینه نوترون گرمایی را در نظر گرفت. باید تأکید کرد که فیلم بجهای نوترونی معمولی نسبت به نوترونها در گستره انرژی فوق گرمایی تا $1/2\text{ MeV}$ حساس نیستند. اما اگر توزیع طیفی میدان نوترون معلوم باشد، می‌توان سهمی برای نوترونهای موجود در گستره غیر حساس فیلم بج در نظر گرفت.

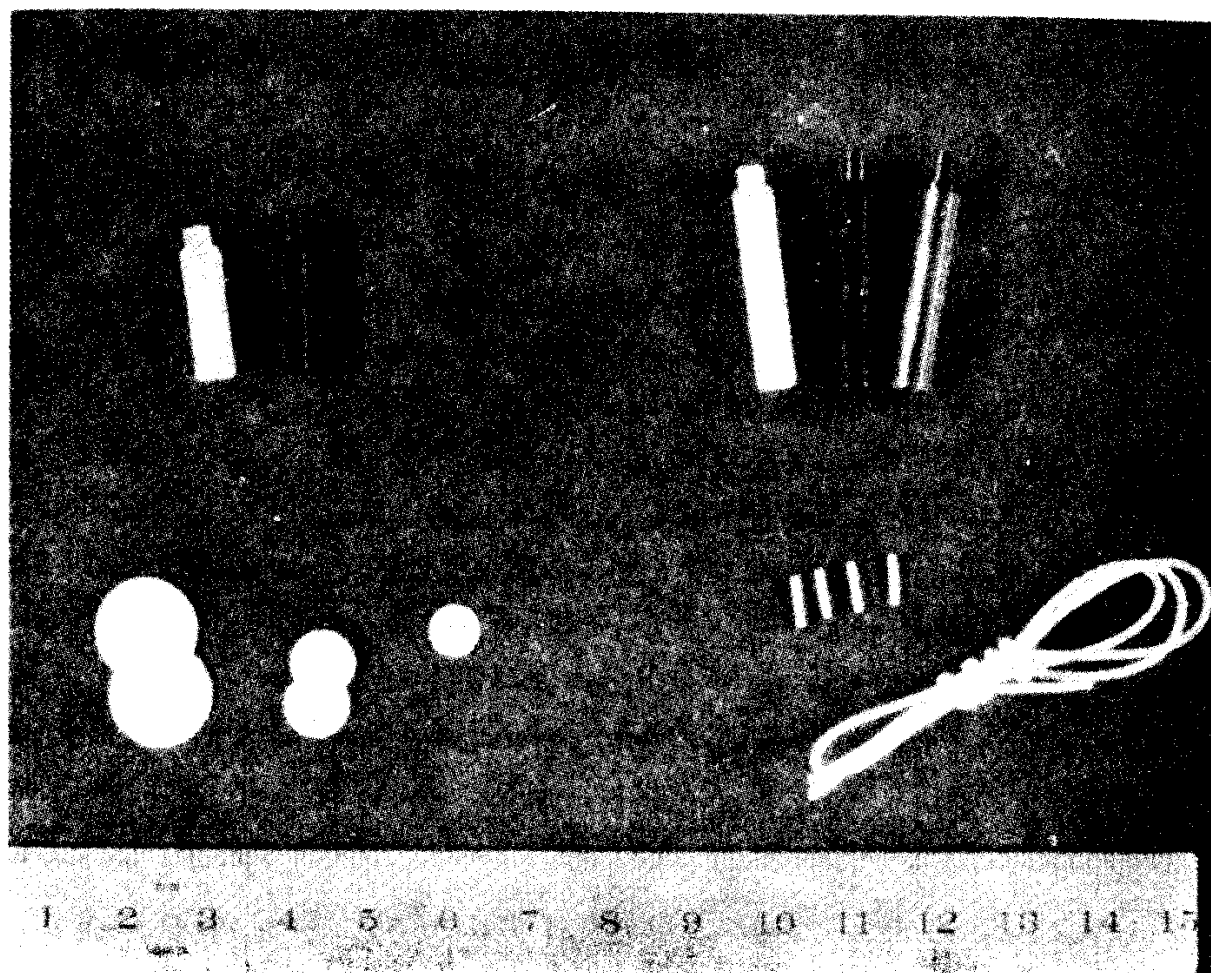
دزسنج گرمالیان

بیشتر بلورها، از جمله CaF_2 که حاوی Mn به صورت ناخالصی است و LiF ، بعد از قرار گرفتن در معرض تابش چنانچه گرم شوند از خود نور گسیل می‌کنند. این نوع بلورها را گرمالیان می‌گویند. در بلورهای گرمالیان، جذب انرژی تابش باعث برانگیختن آنها می‌شود که در اثر آن در بلور تعدادی الکترون آزاد و حفره پدید می‌آید. این حفره‌ها و الکترونهای آزاد را ناخالصیها یا ناکاملیهای شبکه بلوری به دام می‌اندازند، و بدین سان انرژی برانگیختگی در بلور حبس می‌شود. با گرم کردن بلور، این انرژی به صورت نور آزاد می‌شود. شکل ۲۳.۹ منحنی مشخصه تابانی LiF را که از گرم کردن یکنواخت بلور تابش

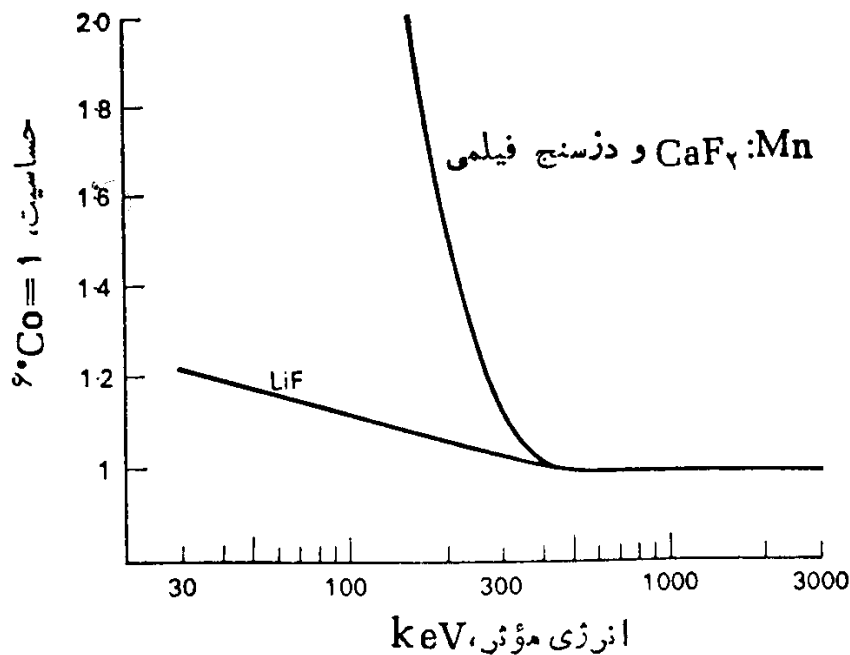


شکل ۲۳.۹ منحنی تابانی LiF که تحت تابش 100 R (1 Gy) قرار گرفته است. سطح زیر منحنی با مقدار کل پرتوگیری متناسب است.

دیده و اندازه گیری شدت نور گسیل شده بر حسب دما به دست آمده است، نشان می دهد دمای که در آن شدت نور بیشینه است، معیار انرژی بستگی الکترون به حفره در داخل دام است. وجود بیش از يك قله در منحنی تابانی حاکی از دامهای متفاوت با انرژیهای بستگی مخصوص به آنهاست. مقدار کل نور با تعداد الکترونهاي برانگیخته و به دام افتاده، و تعداد الکترونهاي برانگیخته با مقدار انرژی جذب شده از تابش متناسب است. از این رو، شدت نور گسیلیده از بلورهای گرمالیان با دز تابش نسبت مستقیم دارد. در عمل، مقدار بسیار کمی ماده گرمالیان، در حدود ۵۰ mg، داخل کپسول کوچکی گذاشته می شود (شکل ۲۴.۹) و پس از آن تحت تابش قرار می گیرد. برای قرائت نتیجه، ماده فسفرسان را به طریق الکتریکی گرم می کنند و شدت نور حاصل از آن را با يك لامپ تکثیر فوتونی، که سیگنال خروجی آن پس از تقویت به يك وسیله قرائت مناسب مثل ولت سنج رقمی داده می شود، اندازه



شکل ۲۴.۹ دزسنجهای گرمالیان. کپسولهای حاوی ۴۳ mg گرد LiF در بالا و سمت چپ، کپسولهای حاوی ۱۴۰ mg گرد LiF در بالا و سمت راست قرار دارند، اولین کپسول سمت راست از بالا با يك صافی انرژی پایین احاطه شده است. در پایین از چپ به راست به ترتیب قرصهای تفلون- LiF در دو اندازه مختلف و يك قرص CaF_2 به صورت تفلون- Mn ، میله های بسیار ریز LiF ، و يك رشته بلند تفلون- LiF که از آن میله های ریز بریده شده اند، دیده می شود.



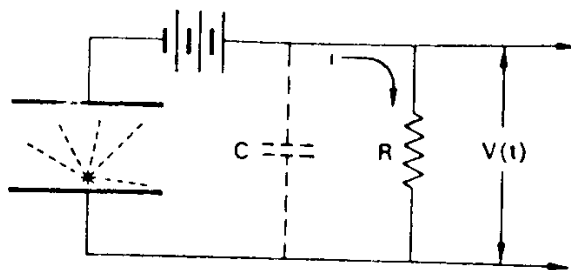
شکل ۲۵.۹ بستگی انرژی LiF در مقایسه با سایر دزسنجهای بدون حفاظ.

می گیرند. این وسیله، با اندازه گیری شدت نور گسیل شده از فسفرسانهایی که تحت دزهای تابشی معینی قرار گرفته اند، مدرج می شود. چون شدت نور با مقدار ماده فسفرسان و دز جذب شده متناسب است، مقدار ماده فسفرسان به کار رفته در اندازه گیری باید تا حد امکان به مقداری که برای مدرج کردن وسیله به کار رفته است نزدیک باشد.

دزسنجهای گرمالیان در گستره از حدود (۰.۱ mGy) تا حدود (۱۰۰۰۰۰ rad) (۱۰۰۰ Gy) در مقابل پرتوهای ایکس، گاما، بتا، الکترونها، و پروتونها از خود حساسیت نشان می دهند. چون عدد اتمی مؤثر LiF فسفرسان برابر ۸.۱ و عدد اتمی مؤثر بافت نرم در حدود ۷.۴ است، دزسنجهای گرمالیان نوع LiF تقریباً معادل بافت محسوب می شوند. پاسخ هر دزسنج گرمالیان به پرتوهای گامای با انرژی ۱۰۰ keV تا ۱.۳ MeV تقریباً مستقل از انرژی است. همان طور که در شکل ۲۵.۹ دیده می شود، پایینتر از انرژی ۱۰۰ keV، حساسیت دزسنج افزایش می یابد.

اتاقک جریان یون

چون پاسخ اتاقک جریان یون با مقدار انرژی جذب شده متناسب است، متخصصان فیزیک بهداشت برای اندازه گیری دز از این اتاقکها به طور وسیعی استفاده می کنند. این اتاقکها اساساً از یک محفظه با دو الکترود تشکیل می شوند که یک پتانسیل نسبتاً کم به دو سر آنها اعمال شده است؛ مقدار پتانسیل به قدری کم است که در گاز باعث تکثیر نشود (شکل ۲۶.۹). یونهای حاصل از تابش در اتاقک جمع آوری می شوند و در مدار خارجی جریان پیدا می کنند. از این رو، اتاقک یون مثل چشمه جریانی با مقاومت داخلی بی نهایت عمل می کند. اگرچه با قرار دادن آمپرسنجی در مدار خارجی می توان شدت جریان یونها را اندازه



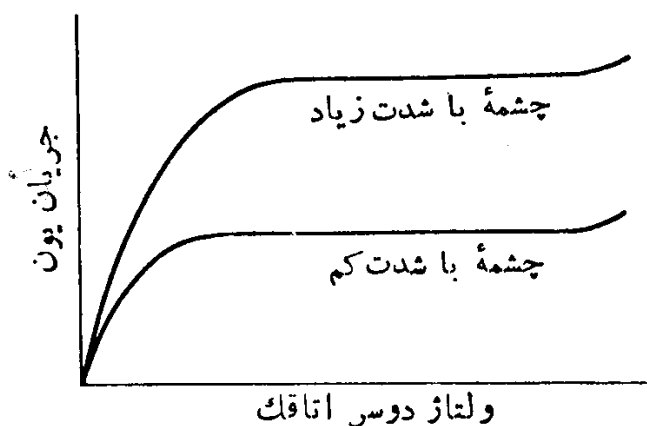
شکل ۲۶.۹ اساس کار اتاقک جریان یون. یونهای حاصل از تابش در اتاقک جمع‌آوری می‌شوند، و جریانی در مدار خارجی تولید می‌کنند. این جریان افت پتانسیل $V(t)$ را در دوسر مقاومت بسیار زیاد R موجب می‌شود. C ظرفیت کل اتاقک است.

گرفت، ولی چون جریان به دست آمده بسیار ضعیف است، در عمل همواره از این روش استفاده نمی‌کنند. در عوض، یک مقاومت بسیار بزرگ از مرتبه 10^{10} اهم در مدار قرار می‌دهند، و با یک الکترومتر بسیار حساس افت پتانسیل را در دوسر مقاومت R تعیین می‌کنند. بر اثر ظرفیت شمارگر و مدار وابسته به آن، C ، ولتاژ دوسر مقاومت پس از بستن مدار طبق معادله زیر بر حسب زمان تغییر می‌کند

$$V(t) = IR(1 - e^{-t/RC}) \quad (۸.۹)$$

که در آن حاصلضرب RC را ثابت زمانی مدار آشکارساز می‌گویند. این مقدار ثابت، سرعت واکنش آشکارساز را تعیین می‌کند. وقتی t برابر RC باشد، نماد در معادله (۸.۹) برابر واحد است و ولتاژ به ۶۳٪ مقدار نهایی خود می‌رسد. وقتی t از چندین ثابت زمانی بیشتر شود، وسیله اندازه‌گیری مقدار ولتاژ حالت پایایی را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که حساسیت آشکارساز با افزایش مقاومت، زیاد می‌شود. چون ظرفیت آشکارساز ثابت است، بنابراین در وسایلی که چندین گستره دارند (و این گستره‌ها با تغییر مقدار R حاصل می‌شوند) ثابت زمانی گستره‌های حساستر طولانی‌تر، و بنابراین پاسخ آنها نسبت به گستره‌های کمتر حساس‌تر است. ثابتهای زمانی در وسایلی که در فیزیک بهداشت به کار می‌روند تا حدود ۱۰ ثانیه تغییر می‌کند، ولی در وسایل آزمایشگاهی که در آنها سرعت پاسخ مهم نیست مقدار این ثابت ممکن است به ۱۰۰ ثانیه برسد.

هرگاه اتاقک جریان یون در معرض تابشهای با شدت متفاوت قرار بگیرد و ولتاژ اعمال شده به آن تغییر کند، دسته‌منحنیهای شکل ۲۷.۹ به دست می‌آید. جریان قسمت تخت منحنیها را جریان اشباع می‌گویند. هنگامی که اتاقک با ولتاژ قسمت تخت کار می‌کند تمامی یونهای تولید شده در اتاقک گردآوری می‌شوند. در مثال زیر، طرز کار اتاقک جریان یون و این واقعیت که بزرگی پاسخ با انرژی جذب شده متناسب است توضیح داده می‌شود.



شکل ۲۷.۹ تغییر جریان یونش با ولتاژ دوسر اتاقك برای سطوح مختلف تابش. قسمت تخت نمودار نشاندهنده جریان اشباع است.

مثال ۳.۹

يك اتاقك یونش بزرگ پر از هوا با دریچه‌ای به ضخامت 1 mg/cm^2 مفروض است. (الف) اگر 1200 ذره آلفا از ^{210}Po در هر دقیقه وارد این اتاقك شود، جریان یونهای تولید شده چقدر است؟ (ب) در صورتی که ضخامت دریچه به 3 mg/cm^2 افزایش یابد شدت جریان یونها چقدر خواهد شد؟

حل: شدت جریان یونهای تولید شده در اتاقك از معادله زیر به دست می‌آید

$$I = \frac{N \text{ ذره/s} \times E \text{ eV/ذره} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C/یون}}{w \text{ eV/یون}} \quad (9.9)$$

(الف) انرژی ذره آلفا پس از ورود به اتاقك از طریق دریچه برابر است با اختلاف میان انرژی جنبشی اولیه، یعنی 5.3 MeV ، و انرژی تلف شده ضمن عبور از دریچه. با فرض اینکه توان ایستاندگی دریچه پلاستیکی معادل توان ایستاندگی بافت باشد، با استفاده از معادلات (۱۴.۵) و (۱۶.۵) برد ذره آلفای 5.3 MeV را در پلاستیکی که دریچه از آن ساخته شده است برابر 5.1 mg/cm^2 به دست می‌آوریم. بنابراین انرژی جنبشی ذره پس از عبور از دریچه‌ای به مشخصات 1 mg/cm^2 برابر خواهد بود با

$$\frac{5.1 - 1}{5.1} \times 5.3 = 4.25 \text{ MeV}$$

و جریان یونهای حاصل از معادله (۹.۹) برابر است با

$$I = \frac{1.2 \times 10^2 \alpha/\text{min} \times 4.25 \times 10^6 \text{ eV}/\alpha \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C/یون}}{60 \text{ s/min} \times 35 \text{ eV/یون}}$$

$$= 3.9 \times 10^{-13} \text{ A}$$

(ب) اگر ضخامت دریچه به 3 mg/cm^2 افزایش یابد، انرژی ذره آلفایی که

به اتاقک یونش وارد می‌شود برابر است با

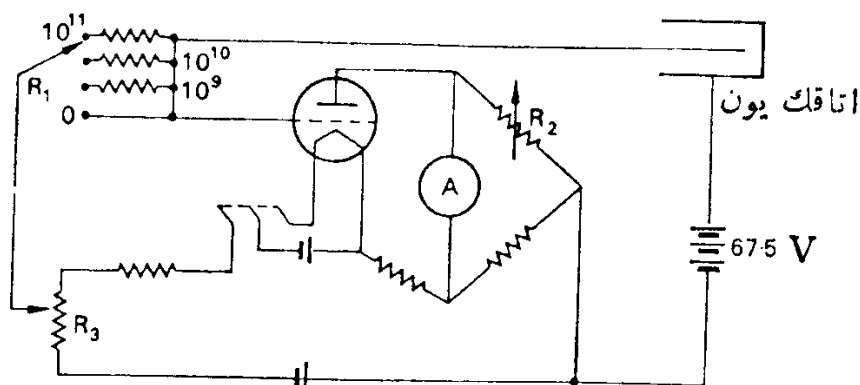
$$\frac{51-3}{51} \times 513 = 218 \text{ MeV}$$

و جریان یونی حاصل فقط برابر با $2 \times 10^{-13} \text{ A}$ خواهد شد. لازم به یادآوری است که در هر دو مورد ذرات آلفا با آهن‌گ یکسان وارد اتاقک یون می‌شوند. بنابراین، اگر تپ‌های منفرد شمارش شوند، آهن‌گ شمارش در هر دو مورد یکسان خواهد بود.

با توجه به ملاحظات الکترونیکی، مدار اصلی اتاقک یونش به صورت پل و تستون است (شکل ۲۸.۹)، و یک لامپ الکترومتر به عنوان یک مقاومت یکی از بازوهای آن را تشکیل می‌دهد. شبکه این لامپ به یکی از الکترودهای اتاقک یونش وصل شده است. بعد از اینکه جریان اتاقک یونش به صورت موازی از کنار پل گذشت، پل به حالت تعادل می‌رسد. با وصل کلید اتاقک یونش و برقراری جریان یون در مقاومت R_1 ، ولتاژ شبکه لامپ الکترومتر تغییر می‌کند و پل از حالت تعادل خارج و در نتیجه عقربه آمپرسنج منحرف می‌شود. مقدار انحراف عقربه آمپرسنج با ولتاژ سیگنال اعمال شده به شبکه لامپ، و این ولتاژ به نوبه خود با جریان یون، و جریان یون با آهن‌گ دز تابش متناسب است. به دلیل مشخصه‌های مدار، ولتاژ سیگنال ورودی به پل باید در حدود ۱ ولت باشد. جریان اتاقک معمولاً خیلی ضعیف است. شدت جریان یون که به حجم اتاقک، V ، چگالی هوا، ρ ، و آهن‌گ پرتو دهی X بستگی دارد، از رابطه زیر به دست می‌آید

$$i = \frac{V \text{ cm}^3 \times \rho \text{ kg/cm}^3 \times X \mu \text{C/kg.h} \times 10^{-6} \text{ A}/\mu \text{C.s}}{3.76 \times 10^3 \text{ s/h}} \quad (10.9)$$

در اتاقکی به حجم 400 cm^3 که از هوای معمولی پر شده باشد و با آهن‌گ پرتو دهی 25 mR/h ($25 \mu \text{C}/(\text{kg.h})$) تحت تابش قرار گیرد، جریان یونها بنا بر معادله (۱۰.۹) برابر $2 \times 10^{-13} \text{ A}$ به دست می‌آید. برای اینکه با این جریان افت ولتاژ دوسر



شکل ۲۸.۹ نموداری از مدار اسباب اندازه‌گیری اتاقک یونش. با تنظیم R_2 و R_3 و صفر شدن R_1 پل به تعادل می‌رسد. R_2 معمولاً در داخل جعبه قرار دارد و R_3 دکمه «صفر» است.

مقاومت برابر ۱ ولت شود، مقاومتی در حدود ۱۰۱۱ اهم لازم است. هرگاه این مقاومت به جای R_1 در حساسترین گستره اسباب به کار رود، برای اینکه اندازه گیریهای تمام - مقیاس، آهنگ دز ۱۰ و ۱۰۰ برابر را نشان دهند مقاومتی به ترتیب برابر ۱۰^۹ و ۱۰^{۱۰} اهم لازم خواهیم داشت. برای اینکه مقاومت تغییر نکند، باید این مقاومتیهای خیلی بزرگ در داخل شیشه سر بسته قرار بگیرند. تماس دست یا آلوده شدن اتصالات، یا هر عاملی که مقاومت میان شبکه و آند یا مقاومت میان شبکه و کاتد را کم کند، تأثیر خیلی زیادی بر حساسیت اسباب می گذارد. بنابراین، هنگام تعمیر باید نهایت دقت به عمل آید تا مقاومتیهای مدار الکترومتر تغییر نکنند.

بعضی از اسبابهای اتاقک یونش، مثل اتاقک نوع جونو، طوری ساخته شده اند که به طور گزینشی به تابش آلفا، بتا، گاما و بعضی دیگر، مثل اتاقک نوع کوتی پی، به پرتوهای گاما و بتا پاسخ می دهند. محدوده اندازه گیری آهنگ دز اتاقک یونشی تا چند صد $\mu C / (kg \cdot h)$ (یا چند هزار mR بر ساعت) می رسد که معمولاً در سه گستره قرار دارد. قرائتهای تمام - مقیاس ۶۰، ۶۰۰، ۶۰۰۰ $\mu C / (kg \cdot h)$ (۲۵، ۲۵۰، ۲۵۰۰ mR/h) تابش گاما را می توان به عنوان نمونه در نظر گرفت. اما وسایل اتاقک یونشی با حساسیت کمتر و همچنین انواع با حساسیت بیشتر نیز در بازار یافت می شود.

اندازه گیریهای نوترون

واکنشهای آشکارسازی

نوترونها هم مثل پرتوهای گاما، به طور مستقیم یوننده نیستند و باید با محیط دیگری واکنش کنند تا ذره یوننده اولیه تولید شود. به دلیل بستگی شدید آهنگ واکنش نوترون به سطح مقطع هر واکنش خاص، وابسته به انرژی نوترونهایی که می خواهیم اندازه بگیریم محیطهای آشکارسازی متفاوتی را به کار می بریم، یا توزیع انرژی نوترون را طوری تغییر می دهیم که با آشکارساز سازگار باشد. اکنون بعضی از واکنشهای اساسی آشکارسازی نوترون را که در فیزیک بهداشت به کار می روند توضیح می دهیم.

۱. واکنش ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$. بور که ممکن است فراوانی ایزوتوپ ${}^6\text{Li}$ در آن غنی شود، یا به صورت گاز BF_3 وارد شمارگر می شود یا به صورت لایه نازکی در سطوح داخلی لامپ آشکارساز قرار می گیرد. یونش حاصل از ذره آلفای تولید شده و هسته پس زده ${}^3\text{H}$ شمارش می شود.

۲. پراکندگی کشسان نوترونهای پرانرژی توسط اتمهای هیدروژن. پرتونهای پراکنده، همان ذرات یوننده اولیه هستند و یونشی که تولید می کنند آشکارسازی و اندازه گیری می شود.

۳. شکافت هسته ای، یا تولید شکافت پاره ها از طریق واکنش (n, f) در ماده شکافا. ماده شکافا به صورت لایه بسیار نازکی روی سطح داخلی لامپ شمارگر رسوب

داده می‌شود. گیراندازی نوترون و شکافته شدن هسته شکافا، شکافت پاره‌های با قدرت یونندگی بالا تولید می‌کند که به راحتی قابل آشکارسازی‌اند. واکنشهای شکافت تابع انرژی هستند، و برای بعضی از ایزوتوپهای شکافت پذیر انرژی آستانه وجود دارد که پایینتر از آن فرایند شکافت به وقوع نمی‌پیوندد.

۴. فعالسازی نوترونی: آشکارسازی آستانه‌ای. بسیاری از واکنشهای نوترونی ایزوتوپهای پرتوزا تولید می‌کنند. میزان پرتو زایی حاصل از واکنشهای نوترون به مقدار پرتو دهی کل نوترون بستگی دارد. با اندازه گیری فعالیت پرتو زایی حاصل و منظور کردن زمان واپاشی میان پرتو دهی و اندازه گیری، می‌توان پرتو دهی کل نوترون را محاسبه کرد. وانگهی، چون بسیاری از این واکنشهای فعالسازی آستانه انرژی دارند، می‌توان از آنها برای تعیین توزیع انرژی نوترون نیز استفاده کرد. در جدولهای ۳.۹ و ۴.۹ فهرست موادی که معمولاً برای این منظور به کار می‌روند آمده است. این تکنیک مخصوصاً برای اندازه گیری دز نوترون با آهنگهای بسیار زیاد، نظیر آنچه در حادثه بحرانی رخ می‌دهد مفید است. (حادثه بحرانی عبارت است از يك واکنش زنجیره‌ای کنترل نشده تصادفی که در آن در مدت زمان بسیار کوتاهی مقدار فوق‌العاده زیادی انرژی آزاد می‌شود.) برای

جدول ۳.۹ واکنشهای برگه‌های مختلف با نوترونهای گرمایی.

ماده برگه	هسته هدف	درصد فراوانی هدف*	واکنش هسته‌ای	هسته محصول	نیمه عمر محصول	سطح مقطع فعالسازی (بارن)
Ag	Ag-107	51.35	n, γ	Ag-108	2.3 m	44
Ag	Ag-109	48.65	n, γ	Ag-110	25 s	110
In, In-Al	In-115	95.77	n, γ	In-116 m	54 m	145
U (طبیعی)	U-235	71.5	n, f	F.P.	$T^{-1/2}$	582
Dy-Al	Dy-164	28.18	n, γ	Dy-165	2.32 h	2100
V	V-51	99.76	n, γ	V-52	3.77 m	4.5
Mn-Cu	Mn-55	80.00	n, γ	Mn-56	2.56 h	13.4
Cu	Cu-63	69.1	n, γ	Cu-64	12.8 h	4.3
Cu	Cu-65	30.9	n, γ	Cu-66	5.1 m	1.8
Al	Al-27	100	n, γ	Al-28	2.3 m	0.21
Au, Au-Al	Au-197	100	n, γ	Au-198	2.7 d	96
Rh	Rh-103	100	n, γ	Rh-104 m	4.4 m	12
Rh	Rh-103	100	n, γ	Rh-104	44 sec	140
Co, Co-Al	Co-59	100	n, γ	Co-60	5.27 y	36.3
NaCl	Na-23	100	n, γ	Na-24	15 h	0.53
Lu-Al	Lu-175	97.5	n, γ	Lu-176 m	3.7 h	35
B-Al	B-10	19.6	n, α	Li-7	پایدار	4010
Eu-Al	Eu-151	47.77	n, γ	Eu-152	9.2 h	1400
Pb	Pb-208	52.3	n, γ	Pb-209	3.2 h	.06 mb
Nb	Nb-93	100	n, γ	Nb-94 m	6.6 m	1.0

* این اطلاعات برای آلیاژها یا مواد مرکب تنظیم نشده است. این جدول برای مفیدترین واکنشهای نوترون گرمایی گردآوری شده است.

جدول ۴.۹ واکنشهای آستانه‌ای برگه‌های مختلف.

هسته هدف ماده برگه		درصد فراوانی هدف*	واکنش هسته‌ای	هسته محصول	نیمه عمر محصول	سطح مقطع مؤثر فعالسازی (بارن)	انرژی مؤثر ستانه (MeV)
Ni	Ni-58	67.76	n, p	Co-58	71.3 d	.42	2.9
Fe	Fe-54	5.84	n, p	Mn-54	314 d	.61	~3
Fe	Fe-56	91.68	n, p	Mn-56	2.58 h	.110	7.5
Ti	Ti-46	7.95	n, p	Sc-46	84.1 d	.23	5.5
$S, (NH_4)_2SO_4$	S-32	95.018	n, p	P-32	14.3 d	.30	2.9
Mg	Mg-24	78.60	n, p	Na-24	15 h	.060	6.3
Al	Al-27	100.0	n, α	Na-24	15 h	.130	8.7
Zr	Zr-90	51.46	$n, 2n$	Zr-89	3.3 d	1.6	14.0
In, In-Al	In-115	95.77	n, n'	In-115 m	4.5 h	0.2	1.0
NH_4I	I-127	100.0	$n, 2n$	I-126	13.3 d	.98	11.0
V	V-51	99.76	n, α	Sc-48	44 h	.08 mb	11.5
Th	Th-232	100.0	n, f	Mo-99	66 h	.060	1.75
U (415%)	U-238	.415	n, f	Mo-99	66 h	0.55	1.45
U (378 ppm)	U-238	.0378	n, f	Mo-99	66 h	0.55	1.45
Si-Al	Si-28	92.27	n, p	Al-28	2.3 m	.004	6.7

* این اطلاعات برای آلیاژها یا مواد مرکب تنظیم نشده است. این جدول برای مفیدترین واکنشهای آستانه‌ای نوترون‌ها گردآوری شده است.

اندازه‌گیری شارهای زیاد نوترون در فیزیک بهداشت، تعدادی آشکارساز آستانه‌ای با انرژیهای آستانه مختلف به صورت یک واحد بسته‌بندی شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. پرتودهی با نوترون‌ها موجب فعال شدن آشکارسازها می‌شود. چون فعالیت القایی در آشکارسازهای آستانه‌ای به شار نوترونهایی بستگی دارد که انرژی‌شان از انرژی آستانه بیشتر است، آهنگهای نسبی شمارش آشکارسازهای آستانه‌ای، پس از پرتودهی، به عنوان معیار توزیع طیفی نوترون‌ها به کار می‌رود، در حالی که فعالیت مطلق آشکارسازمعیاری از پرتودهی است. از مواد مختلفی می‌توان به عنوان آشکارساز آستانه‌ای استفاده کرد. در یک نوع دزسنج جیبی بحرانیات (شکل ۲۹.۹) ترکیبی از برگه‌های اندیم، اندیم با روکش کادمیم، طلا، طلا با روکش کادمیم، گوگرد، و مس با روکش کادمیم به کار می‌رود. با مقایسه نتایج فعالیت در هر کدام از این برگه‌ها می‌توان طیف نوترون را به بازه‌های مختلف انرژی به صورت زیر تجزیه کرد:

۰.۴ eV - انرژی گرمایی

۰.۴ eV - ۲ eV

۲ eV - ۱۰ eV

۱۰ eV - ۱ MeV

۱ MeV - ۲۰۹ MeV

انرژیهای بالاتر از ۲۰۹ MeV



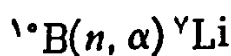
شکل ۲۹۰۹ دزسنج جیبی بحرانیت برای اندازه‌گیری شارهای نوترونی. در داخل این دزسنج شش برگه مختلف وجود دارد که پرتوهای القایی آنها، بعد از پرتوگیری از نوترون‌ها، به انرژی و فراوانی نسبی نوترون‌ها بستگی دارد.

از این رو، شار کل نوترون به شش گروه انرژی تقسیم می‌شود، و از این طریق یک راه حل نسبتاً دقیق برای محاسبه دز جذب شده به دست می‌آید. آشکارسازهای آستانه‌ای با پرتوگیری از یک باریکه مشخص نوترون، و اندازه‌گیری فعالیت القایی حاصل مدرج می‌شوند. (برای اندازه‌گیری پرتوهای گامای ناشی از یک حادثه بحرانی، یک دزسنج گرمایان را نیز می‌توان اضافه کرد.)

شمارش نوترون با شمارگر تناسبی

شمارش در ناحیه تناسبی، اندازه‌گیری نوترون‌ها را در حضور تابش گاما تسهیل می‌کند.

شمارگر نوترونی که برای این منظور به کار می رود از گاز BF_3 برای حصول واکنش (n, α) در بور ^{10}B استفاده می کند



سطح مقطع بور ۱۰ برای این واکنش بسیار بالاست (۴۰۱۵ بسارن برای نوترونهای گرمایی) و در نتیجه یک محیط آشکارسازی بسیار حساس تولید می شود. ذرات آلفای حاصل از این واکنش در درون آشکارساز تولید می شوند، به دلیل اختلاف زیادی که میان تپهای خروجی حاصل از ذرات آلفا و یونهای Li و تپهای حاصل از پرتوهای گاما وجود دارد، تمامی تپهای حاصل از گیراندازی نوترون در ^{10}B به استثنای تپهای آلفا و یونهای Li را به راحتی می توان به روش الکترونیکی جدا و از شمارش خارج کرد.

حساسیت آشکارساز نوترون BF_3 را می توان با استفاده از گاز BF_3 غنی شده از ^{10}B افزایش داد. نسبت ^{10}B در بور طبیعی در حدود ۱۹٫۸٪ است. اما می توان ایزوتوپهای ^{10}B را به حدی افزایش داد که گاز BF_3 حاوی ۹۶٪ ^{10}B به راحتی در اختیار فروشندگان قرار بگیرد. شمارگر BF_3 یک آشکارساز ساده و حساس برای نوترونهای گرمایی است و در فیزیک بهداشت برای اندازه گیری شار نوترون گرمایی به طور وسیع به کار می رود. وانگهی، چون ۱۰۰ mrem در هفته با ۶۸۰ نوترون گرمایی بر سانتی متر مربع بر ثانیه در ۴۰ ساعت متناظر است، اندازه گیری آهنگ دز را می توان به راحتی به آهنگ شمارش یک شمارگر مدرج با شار نوترون تبدیل کرد.

سطح مقطع گیراندازی واکنش $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ و بنا بر این آهنگ شمارش هر آشکارساز BF_3 به انرژی نوترون بستگی دارد. یک شار نوترون گرمایی ϕ نوترون بر سانتی متر مربع بر ثانیه با توزیع انرژی ماکسول - بولتزمن را با یک شمارگر BF_3 که در مجموع شامل N اتم ^{10}B است در نظر بگیریم. اگر جذب نوترون در دیواره شمارگر ناچیز و بازده ذاتی شمارش ۱۰۰٪ باشد، آهنگ شمارش از رابطه زیر به دست می آید

$$CR = N \int \phi(v) \sigma(v) dv \quad (11.9)$$

که در آن $\phi(v)$ شار نوترونهایی با سرعت v ، و $\sigma(v)$ سطح مقطع گیراندازی برای نوترونهای با همان سرعت است. با به کار بردن رابطه $\phi(v) = n(v)v$ که در آن $n(v)$ چگالی نوترونهایی با سرعت v cm/s بر حسب نوترون بر سانتی متر مکعب است؛ و با استفاده از معادله (۵۳.۵) و قراردادن $\sigma(v) = \sigma_0(v_0/v)$ در معادله (۱۱.۹) داریم

$$CR = N \sigma_0 v_0 \int n(v) dv \quad (12.9)$$

$$CR = N \sigma_0 v_0 n \quad (13.9)$$

از معادله (۱۳.۹) معلوم می شود که آهنگ شمارش هر شمارگر BF_3 با چگالی کل

نوترون‌ها در گستره اعتبار قانون $1/v$ (تا حدود 10000 eV) متناسب است. اگر میانگین سرعت نوترون (که نباید با سرعت متناظر با میانگین انرژی نوترون اشتباه شود) $\bar{v}$ باشد، داریم

$$\phi = n\bar{v} \quad (14.9)$$

یا $n = \phi / \bar{v}$. با قراردادن این مقدار n در معادله (۱۳.۹) و حل آن بر حسب ϕ نتیجه می‌شود

$$\phi = \frac{\bar{v}}{v_0} \times \frac{CR}{N\sigma_0} \quad (15.9)$$

در توزیع ماکسول - بولتزمن داریم $\bar{v}/v_0 = 2/\sqrt{\pi} = 1.128$. بنابراین برای نوترون‌های گرمایی، رابطه شار و آهنگ شمارش به صورت زیر است

$$\phi = \frac{1.128}{N\sigma_0} \times CR \quad (16.9)$$

مثال ۴.۹

آهنگ شمارش نوترون‌های گرمایی در یک اندازه‌گیری با شمارگر BF_3 که ابعاد داخلی آن 20 cm (بلندی) در 2 cm (قطر) است و با $^{10}\text{BF}_3$ ۹۶٪ غنی شده در فشار 20 cmHg پر شده است، برابر ۶۰۰ شمارش در هر دقیقه به دست آمده است. شار گرمایی آن چقدر است؟ حجم شمارگر برابر $\pi r^2 l$ یا 6283 cm^3 است. تعداد مول‌های BF_3 در این شمارگر برابر است با

$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{20/76 \text{ atm} \times 6283 \text{ l}}{0.082 \text{ l atm/mol K} \times 300 \text{ K}} = 672 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

تعداد اتم‌های ^{10}B در شمارگر از رابطه زیر به دست می‌آید

$$N = 0.96 \frac{\text{اتم } ^{10}\text{B}}{\text{مولکول}} \times 603 \times 10^{23} \frac{\text{مولکول}}{\text{mol}} \times 672 \times 10^{-4} \text{ mol} \\ = 389 \times 10^{20} \text{ اتم } ^{10}\text{B}$$

از معادله (۱۶.۹) خواهیم داشت

$$\phi = \frac{1.128}{389 \times 10^{20} \text{ atom} \times 49010 \times 10^{-21} \text{ cm}^2/\text{atom}} \times 10 \frac{\text{شمارش}}{\text{s}} \\ = 72 \frac{\text{نوترون}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

حساسیت هر آشکارساز تابش را می توان به صورت زیر تعریف کرد

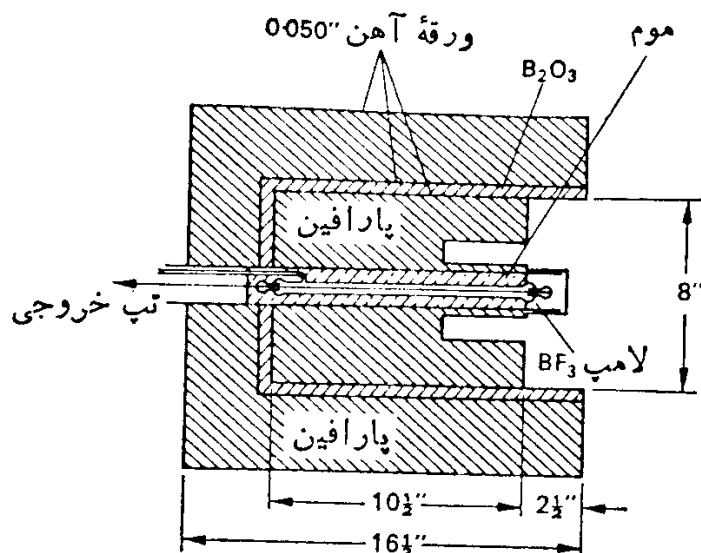
$$(۱۷.۹) \quad \text{حساسیت} = \frac{\text{آهنگ شمارش}}{\text{شار}}$$

حساسیت، S ، شمارگر BF_3 در این مثال به صورت زیر محاسبه می شود

$$S = \frac{CR}{\phi} = \frac{600 \text{ cpm}}{722 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}} = 83.3 \frac{\text{cpm}}{\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}}$$

شمارگر طویل

شمارگر BF_3 اگر با پارافین یا کندساز دیگری احاطه شود، می تواند برای نوترونیهای تند نیز قابل استفاده باشد. کندساز نوترونیهای تند را آنقدر کند می کند که 1°B آنها را گیر اندازی کند. آهنگ شمارش شمارگر کندساز BF_3 در میدان نوترونیهای تند با افزایش ضخامت کندساز زیاد می شود، و این عمل تا هنگامی که ضخامت پارافین به حدی برسد که کسر عمده ای از نوترونیهای گرمایی شده را جذب کند ادامه می یابد. فراتر از این ضخامت بهینه، آهنگ شمارش با افزایش بیشتر ضخامت کاهش می یابد. ضخامت دقیق مورد نیاز به انرژی نوترونها بستگی دارد. اگر ضخامت پارافین کندساز در حدود 6 cm باشد، به یک پاسخ تقریباً تخت در گستره ای از انرژی نوترون از حدود 10 keV تا بیشتر از 1 MeV منجر می شود. رویه بیرونی پارافین را می توان با ورقه نازکی از کادمیم پوشاند تا نوترونیهای گرمایی را جذب کند و به نوترونیهای تند اجازه بدهد که وارد پارافین شوند. تابش گیراندازی حاصل از جذب نوترونیهای گرمایی در کادمیم، تپهای بسیار کوچکی در شمارگر تولید می کنند، ولی این تپها آنقدر کوچک اند که در دستگاه ممیز جدا و از شمارش خارج خواهد شد. این شمارگر BF_3 را که در پارافین قرار دارد، به دلیل پاسخ طولانی مستقل از انرژی آن، شمارگر طویل می گویند، و در فیزیک بهداشت در گستره انرژی از 10 keV تا 500 keV مفیدترین وسیله به شمار می رود. اندازه گیری نوترونیهای با انرژیهای بیشتر به کمک شمارگر BF_3 مستلزم مقدار نسبتاً زیادی پارافین برای کند کردن نوترونهاست، و از این رو استفاده از آن در بسیاری کاربردهای فیزیک بهداشت غیر علمی است. یکی از این شمارگرها را که طبق گزارش از گستره 10 keV تا 5 MeV پاسخ نسبتاً یکنواختی دارد، در شکل ۳۰.۹ نشان داده ایم. پاسخ این شمارگر کاملاً جهتی است و طوری ساخته شده است که فقط نوترونیهایی که از وجه قدیمی شمارگر می آیند اندازه گیری می شوند. لایه بیرونی پارافین که بعد از B_2O_3 قرار دارد همانند یک حفاظ نوترونی را که از جهات خلفی می آیند حذف می کند. نوترونیهای کم انرژی، بعد از گرمایی شدن، می توانند از طریق هشت حفره موجود در وجه قدیمی به لامپ آشکارساز برسند. حساسیت این شمارگر تقریباً برابر ۱ شمارش در ثانیه به ازای هر نوترون در سانتی متر مربع است.



شکل ۳۰.۹ نمودار يك شمارگر طويل كه پاسخ آن در گستره از 10 keV تا 5 MeV تقريباً يكتنواخت است.

شمارگر پروتون پس‌زنی

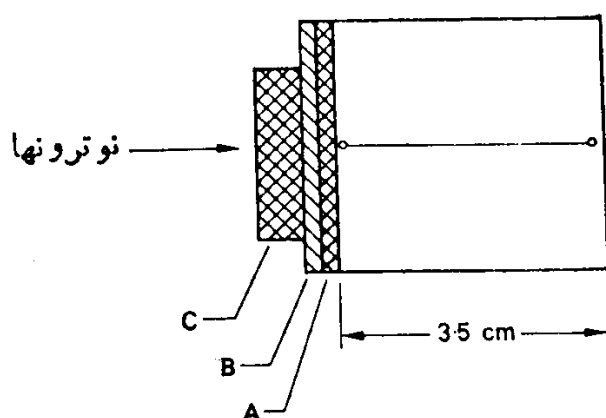
از هر شمارگر تناسبی که بتواند به پروتونهای پس‌زنی حاصل از برخورد نوترونهای تند با اتمهای هیدروژن پاسخ دهد می‌توان برای آشکارسازی نوترونهایی که انرژی آنها از 500 keV بیشتر باشد استفاده کرد. (پایینتر از این انرژی تپهای خروجی شمارگر خیلی ضعیف هستند و ثبت آنها مستلزم تقویت خیلی زیادی است.) چنین شمارگری را می‌توان به راحتی با استفاده از يك گاز هیدروژنی، مانند متان، تهیه کرد. این شمارگر را با ورقه نازکی از کادمیم می‌پوشانند تا نوترونهای گرمایی را جذب و از تشکیل تپهای ناشی از دوترونهای پس‌زنی که بعد از جذب نوترونهای گرمایی به وسیله هیدروژن تولید می‌شود، جلوگیری کند. مواد هیدروژنی هم ممکن است مثل پارافین یا پلی اتیلن جامد باشد و در دیواره شمارگر به کار رود. نوترونهای تند پروتونها را از این گونه جامدات خارج می‌کنند و پروتونها انرژی خود را در گاز شمارگر از دست می‌دهند. ماده هیدروژنی را وقتی که به عنوان چشمه پروتون به کار می‌رود، «تابشگر پروتون» می‌گویند. حساسیت شمارگر پروتون پس‌زنی در برابر نوترونهای تند خیلی کمتر از حساسیت شمارگر BF_3 در مقابل نوترونهای گرمایی است. این امر دو دلیل دارد: اول اینکه سطح مقطع هیدروژن برای پراکندگی نوترونهای تند خیلی کمتر از سطح مقطع گیراندازی ^{10}B برای نوترون کنداست، و دوم اینکه بخش بزرگی از توزیع انرژی پروتونها را پروتونهای کم انرژی تشکیل می‌دهد. برای نوترونهای تا انرژی حدود 10 MeV پراکندگی نوترون همسانگرد است. این گفته به این معنی است که انرژی پروتون پراکنده می‌تواند از صفر تا انرژی اولیه نوترون تغییر کند. بنا بر این، تپهای حاصل از پروتونهایی که در جریان برخورد انرژی زیادی به آنها نمی‌رسد به خاطر پیش‌ولت معکوس تابش گاما شمارش نمی‌شوند. بالاتر از این آستانه، پاسخ شمارگر تناسبی پروتون پس‌زنی عمدتاً بستگی به سطح مقطع پراکندگی هیدروژن دارد که آن هم وابسته به انرژی است.

دزسنجی نوترون

دز معادل (DE) نوترونها، همان طور که در جدول ۵.۹ دیده می شود، شدیداً به انرژی نوترونها بستگی دارد. بنابراین نمی توانیم به راحتی شار نوترون را به دز معادل تبدیل کنیم، مگر اینکه طیف توزیع انرژی نوترونها را بدانیم. البته توزیع انرژی نوترونهای گرمایی خالص معلوم است، و بنابراین شمارگر BF_3 را می توان مستقیماً بر حسب میلی رم در ساعت مدرج کرد. ولی برای نوترونهای پرانرژی نه شمارگر طویل کند شده با BF_3 ، با آن پاسخ «تخت» و مستقل از انرژی اش، و نه شمارگر ساده و تناسبی پروتون پس زنی، که پاسخ آن شدیداً به سطح مقطع پراکندگی وابسته است، برای دزسنجی نوترونهای تند مناسب نیستند.

نوترونهای تند: شمارگر هرست

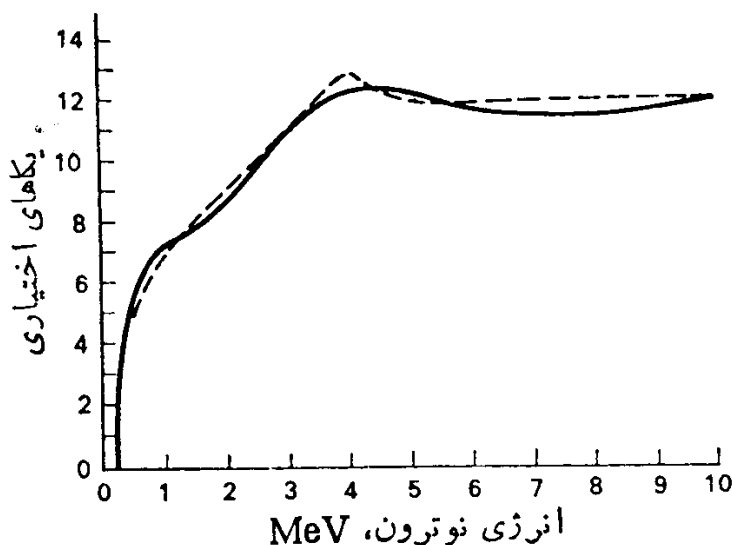
شمارگر تناسبی پروتون پس زنی را می توان با تغییراتی برای اندازه گیری آهنگ دز نوترونهای تند مورد استفاده قرار داد. با استفاده از ترکیبی از تابشگرهای مختلف پروتون و گازهای پرکننده، آن طور که در شکل ساده ۳۱.۹ دیده می شود، توزیع انرژی پروتونهای پس زنی که وارد قسمت گازی شمارگر تناسبی می شوند به گونه ای است که آهنگ شمارش حاصل با تغییرات دز قابل جذب در بافت بر حسب انرژی نوترون متناسب می شود. بنابراین، آهنگ شمارش حاصل از شمارگر تناسبی را می توان بر حسب میلی راد در ساعت برای نوترونهای تند مدرج کرد. در شکل ۳۲.۹ بستگی دز به انرژی را با پاسخ دزسنج آهنگ شمارش مقایسه کرده ایم. دزسنجهای نوترونهای تند که نسبت به گاما حساس نیستند و



شکل ۳۱.۹ نمودار ساده ای از دزسنج آهنگ شمارش نوترونهای تند. (A) پارافین (13 mg/cm^2)، (B) آلومینیم (29 mg/cm^2)، (C) پارافین (100 mg/cm^2)، برابر نسبت مساحت های پارافین $a_A/a_C = 29$ است. فشار گاز متان برابر 30 cm Hg است. پاسخ شمارگر کاملاً جهتی است و همان طور که در شکل نشان داده شده است باید به طرف باریکه نوترون تنظیم شود.

جدول ۵.۹ میانگین ضریب کیفیت و شار نوترونها که با دز (۱۰۰ mrem) ۱ mSv در ۴۰ ساعت کار در هفته متناظر است.

چگالی شار نوترون ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	$\overline{QF}$	انرژی نوترون (MeV)
۶۸۰	۲	(گرمایی) ۲.۵×10^{-3}
۶۸۰	۲	1×10^{-2}
۵۶۰	۲	1×10^{-6}
۵۶۰	۲	1×10^{-5}
۵۸۰	۲	1×10^{-4}
۶۸۰	۲	1×10^{-3}
۷۰۰	۲.۵	1×10^{-2}
۱۱۵	۷.۵	1×10^{-1}
۲۷	۱۱	۵×10^{-1}
۱۹	۱۱	۱
۲۰	۹	۲.۵
۱۶	۸	۵
۱۷	۷	۷
۱۷	۶.۵	۱۰
۱۲	۷.۵	۱۴
۱۱	۸	۲۰
۱۰	۷	۴۰
۱۱	۵.۵	۶۰
۱۴	۴	1×10^2
۱۳	۳.۵	۲×10^2
۱۱	۳.۵	۳×10^2
۱۰	۳.۵	۴×10^2



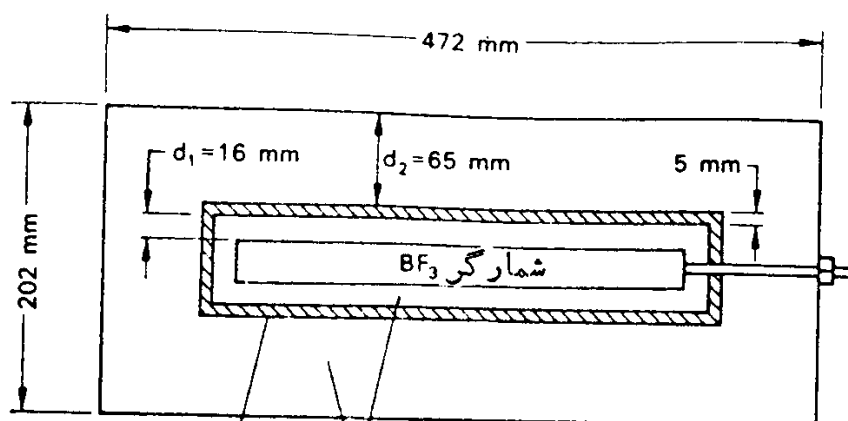
شکل ۳۲.۹ وابستگی انرژی پاسخ دزسنج آهنک شمارش هرست برای نوترونهاست. منحنی پیرنگ رابطه میان آهنک شمارش برای شار واحد و انرژی نوترون را نشان می‌دهد. منحنی خطچین آهنک دز متناظر به شار واحد را بر حسب انرژی نوترون نمایش می‌دهد.

بر اساس این اصل طراحی شده‌اند در بازار یافت می‌شوند. این دزسنجها، به دلیل همین نوع طراحی، فقط برای اندازه‌گیری نوترونها در گستره انرژی از ۲۰۰ eV تا ۱۴ MeV کاربرد دارند. تمامی شمارشهای ناشی از نوترونها با انرژی کمتر از ۲۰۰ eV به کمک دستگاههای ممیزی که برای تعیین پاسخ صحیح دز به کار می‌روند، حذف می‌شوند. پاسخ این دزسنجهای نوترون تند، در بالاتر از ۱۴ MeV، با آهنک دز جذب شده متناسب نیست.

اسباب اندازه‌گیری دز معادل نوترونها گرمایی وتند

با پوشاندن يك شمارگر تناسبی BF_3 ، به وسیله دولایه استوانه‌ای از کندساز پلی اتیلن که با پلاستیکی از جنس بور ازهم جدا شده‌اند (شکل ۳۳.۹)، می‌توان يك شمارگر نوترونی که آهنک شمارش آن با دز معادل در گستره انرژی ۲۵۰ eV تا ۱۰ MeV متناسب است تهیه کرد. قاعده‌های استوانه‌ها از جنس خود استوانه هستند. طرح این شمارگر مبتنی بر این فرضهای ساده است که تمامی نوترونهايي که هنگام ورود به شمارگر نخستین برخوردشان با لایه خارجی پلی اتیلن است درحفاظ پلاستیکی جذب می‌شوند و به مرحله آشکارسازی نمی‌رسند، و تمامی نوترونهايي که نخستین برخوردشان با لایه داخلی پلی اتیلن است با احتمال k آشکارسازی می‌شوند. بر اساس این فرضها، احتمال تولید يك تپ در اثر نوترونی با انرژی E که عمود بر محور طولی شمارگر فرود می‌آید با معادله زیر داده می‌شود

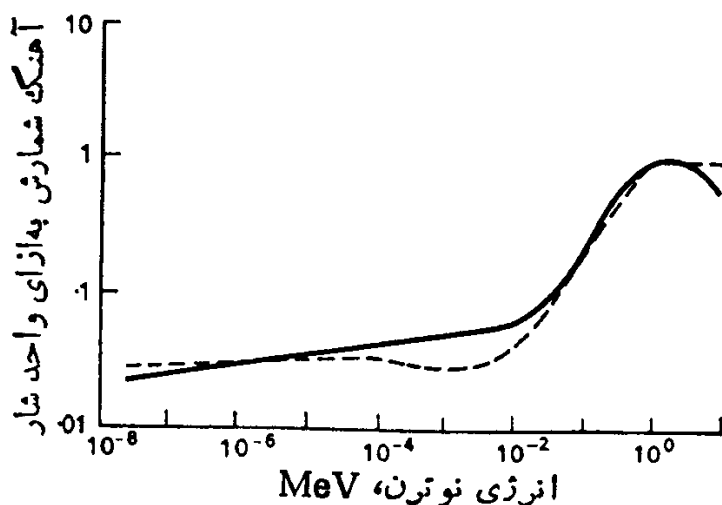
$$P = ke^{-\Sigma(E)d_2}(1 - e^{-\Sigma(E)d_1}) \quad (18.9)$$



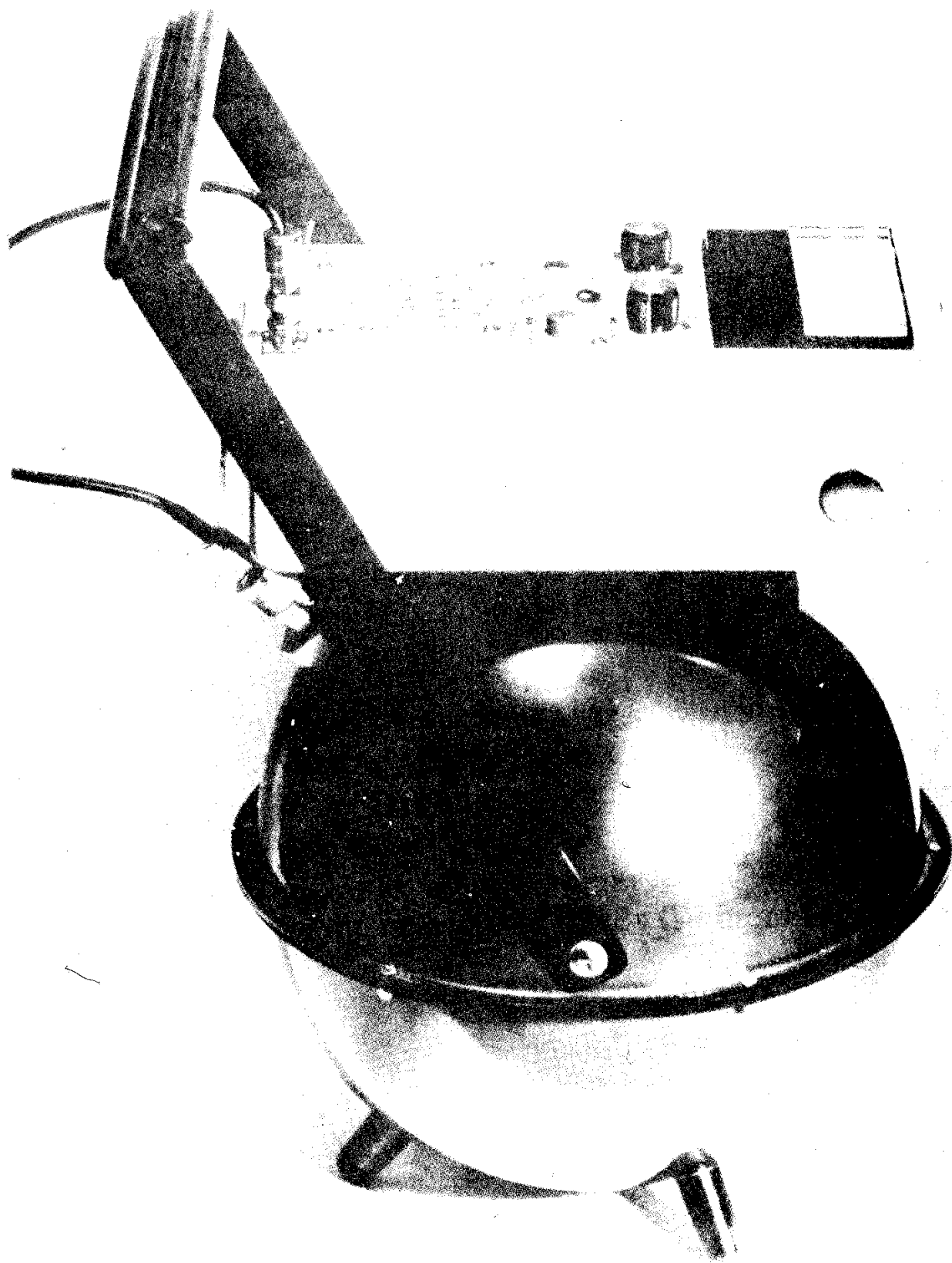
پلی اتیلن
یلاستیک پور با سوراخهایی که بالغ
بر ۱۱۳٪ سطح را در برمی گیرد

شکل ۳۳.۹ ساختمان شمارگر تعیین دز نوترونها. شمارگر BF_3 با مشخصات زیر در داخل پوشش پلی اتیلن قرار داده شده است: قطر خارجی برابر 30 mm ، طول مؤثر برابر 200 mm ، و طول کل برابر 300 mm ، این شمارگر با گاز BF_3 در فشار 600 mmHg پر شده است و غنای ^{10}B در آن ۹۴٪ است.

که در آن $\Sigma(E)$ سطح مقطع ماکروسکوپیک کل پراکندگی برای نوترون با انرژی E ، و d_1 و d_2 ضخامت لایه‌های داخلی و خارجی کندسازهای پلی اتیلن است. با تغییر d_1 و d_2 پاسخ انرژی تغییر می‌کند. به ازای $d_1 = 16\text{ mm}$ و $d_2 = 32\text{ mm}$ ، پاسخ شمارگر (در محدوده $\pm 15\%$ درصد) به منحنی دز وابسته به انرژی نوترون بر حسب برم به ازای هر نوترون در cm^2 (شکل ۳۴.۹) خیلی نزدیک می‌شود. یک نمونه تجاری که براساس این طرح ساخته شده است، حساسیتی برابر 12 cpm به ازای هر $\mu\text{Sv/h}$ (یا 120 cpm به ازای هر



شکل ۳۴.۹ منحنی پاسخ وابسته به انرژی شمارگر دز نوترون (خط پر) که در شکل ۳۳.۹ نشان داده شده است. منحنی خط چین نمودار دز معادل به ازای واحد شار است. پاسخ ایده آل برابر ۷۶ شمارش در ثانیه به ازای هر میلی رم در ساعت است.



شکل ۳۵.۹ سنجه کروی برای اندازه گیری دز معادل نوترون.

(mrem/h) و گستره ای برابر (۱۰۰-۱۰۰۰ mrem) یا $1-1000 \mu\text{Sv}$ در ساعت دارد. سنجه های تجارتی اندازه گیری در نوترون (شکل ۳۵.۹) که می توانند آهنگهای دز

از $1 \mu\text{Sv}$ در ساعت (1 mrem/h) تا 100 mSv (10000 mrem) در ساعت را اندازه بگیرند، یک آشکارساز نوترون گرمایی دارند که با کندساز کروی یا نیم کروی پوشانده شده است. از یک بلور سوسوزن کوچک ${}^6\text{Li I(Eu)}$ (به ابعاد تقریباً $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$) که در مرکز قرار دارد، یا یک شمارگر ${}^{10}\text{BF}_3$ در داخل کندساز می‌توان به عنوان آشکارساز نوترون‌ها استفاده کرد. اما چون لامپ ${}^{10}\text{BF}_3$ کمتر از بلور سوسوزن نسبت به پرتوهای گاما حساس است، آشکارساز ${}^{10}\text{BF}_3$ متداولترین آشکارسازی است که در سنج‌های اندازه‌گیری دز معادل نوترون به کار می‌رود. پاسخ یک سنج کروی دز معادل نوترون، وقتی قطر کره 30 cm است، تقریباً با آهن‌گداز ناشی از نوترون‌های با انرژی گرمایی تا انرژی حدود 15 MeV متناسب است. از این رو، این نوع سنج دز معادل نوترون را می‌توان با نوترون‌هایی که انرژی آنها در این گستره قرار دارد مدرج کرد. کره‌هایی که قطرشان کمتر از 30 cm است، نسبت به نوترون‌های با انرژی کمتر حساسترند. چون پاسخ وابسته به انرژی دستگاه به ابعاد کندساز کروی بستگی دارد، می‌توان توزیع انرژی یک میدان نوترونی را با انجام تعدادی اندازه‌گیری به کمک کره‌هایی در اندازه‌های مختلف مشخص کرد. کره‌هایی که برای این روش طیف‌نمایی نوترون‌ها به کار می‌روند را عموماً «کره‌های بونر» می‌گویند. قطر این کره‌ها از 5 cm تا 30 cm تغییر می‌کند.

دزسنج نوترونی آلبدو

با استفاده از فیلم رد هسته‌ای که در آن نوترون پروتونی را از یک مولکول درامولوسیون فیلم خارج می‌کند و پروتون ردی در فیلم برجای می‌گذارد، می‌توان دیدبانی کارکنان را در مقابل نوترون‌ها تأمین کرد. اما عیب عمده این تکنیک الزامات آستانه انرژی نوترون است. پروتون‌های پس‌زنی آنقدر انرژی ندارند که اثرهای قابل تشخیصی در فیلم تولید کنند، مگر آنکه انرژی نوترون از حدود $1/2 \text{ MeV}$ بیشتر باشد. این نقص را می‌توان با استفاده از دزسنج‌های گرماییان که حساسیت آنها بر اثر نوترون‌های پس‌پراکنده از بدن افزایش می‌یابد، برطرف کرد. چون بدن انسان هیدروژن بسیار زیادی دارد، کسر عمده‌ای از نوترون‌های تند با انرژی متوسط را می‌توان تا انرژی‌های فوق گرمایی کند و پس‌پراکنده کرد، به گونه‌ای که بتوانند با ماده گرماییان حساس در برابر نوترون برهم‌کنش کنند. دیدبان نوترونی از این نوع را دزسنج نوترونی آلبدو می‌گویند. این نوع دزسنج‌های آلبدو، مخصوصاً در گستره انرژی نوترون از حدود 20 eV (انرژی قطع Cd) تا حدود 500 keV مفید هستند.

چون آشکارساز گرماییان (TLD) حساس به نوترون نسبت به تابش گاما نیز حساس است و بدن پاسخ می‌دهد، و چون نوترون‌ها تقریباً همواره با تابش گاما همراه هستند، همراه با هر TLD حساس به نوترون یک TLD غیر حساس نسبت به نوترون‌ها هم به کار می‌رود. گرماییانی ناشی از گاماها را می‌توان به صورت جداگانه تعیین و آن را از گرماییانی کل آشکارساز حساس به نوترون کم کرد. برای تمیز میان گرماییانی نوترون‌ها و گاماها در این

روش، از ماده ${}^6\text{LiF TLD}$ به عنوان آشکارساز حساس به نوترون و از ${}^7\text{LiF}$ به عنوان دزسنج غیر حساس به نوترون استفاده می شود. هر دوی این مواد TLD پاسخ نسبتاً یکسانی در مقابل تابش گاما دارند. به همین دلیل، برای به دست آوردن گرمایی خالص نوترونها، باید گرمایی گامای تراشه ${}^7\text{LiF}$ را از گرمایی تراشه ${}^6\text{LiF}$ کم کرد. با این روش گرمایی تفاضلی، می توان دز نوترونی (10 mrem) 1 mSv را در یک میدان گامای (200 mrem) 2 mSv اندازه گیری کرد.

دزسنجهای نوترونی نوع آلوده شدیداً وابسته به انرژی هستند، و پاسخ آنها با ضربی در حدود ۱۵ در گستره انرژی نوترونی از ۱۰۰ تا 10 MeV تغییر می کند. به همین دلیل، این نوع دزسنجها را باید با چشمه نوترونی خاصی درجه بندی کرد که طیف توزیع انرژی آن تا حد ممکن به توزیع انرژی نوترونهايي که باید دیدبانی شوند نزدیک باشد.

درجه بندی

وسایل سنجش و برآورد در فیزیک بهداشت با قرار گرفتن در معرض یک میدان تابش معلوم مدرج می شوند، و سپس نتیجه اندازه گیری موضوع مورد بررسی با میدان تابش معلوم مقایسه می شود. این میدانهای معلوم، با چشمه های تابشی مدرجی تجهیز می شوند که درجه بندی آنها در آزمایشگاه ملی استاندارد انجام می شود. چون وسایل فیزیک بهداشت غالباً در شرایط متفاوتی به کار می روند، در هر درجه بندی کامل، علاوه بر درجه بندی تحت شرایطی که وسیله مورد نظر برای کار در آن ساخته شده است، باید پاسخ این وسیله به تمام تابشها و شرایطی که در عمل ممکن است برای آن پیش بیاید در نظر گرفته شود. به دلیل وابستگی به انرژی، وابستگی به جهت، و تأثیر احتمالی تابش پراکنده بر کار وسیله، شرایطی که تحت آن وسیله مدرج می شود باید در گزارش مربوط به درجه بندی قید شود.

پرتوهای گاما

یکی از متداولترین چشمه ها برای مدرج کردن وسایل اندازه گیری پرتوگاما، رادیم (معمولاً یکی از نمکهای رادیم مثل RaBr) است که در حالت تعادل با دخترهسته های در یک کپسول پلاتین - ایریدیم سر بسته قرار می گیرد. تابش گامای حاصل از این چشمه، همان طور که در جدول ۶.۹ دیده می شود، چند انرژی است و عمدتاً از گذارهای Ra B (${}^{214}\text{Pb}$) به Ra C (${}^{214}\text{Bi}$) و به $\text{Ra C}'$ (${}^{214}\text{Po}$) تولید می شود. چون نیمه عمر این گذارها به ترتیب ۲۶۸ و ۱۹۷ دقیقه است، شرط تعادل را تعادل میان رادیم و دخترهسته اش را دون تعیین می کند. چشمه های رادیم در دفتر ملی استانداردها (در ایالات متحده) با مقایسه خروجی تابش گامای چشمه مجهول، تحت شرایط اندازه گیری استاندارد، با خروجی تابش گامای یک چشمه استاندارد مدرج می شوند.

بامعلوم بودن مقدار رادیم و ابعاد فیزیکی کپسول، می توان آهننگ پرتودهی گاما را در فواصل مختلف از چشمه محاسبه کرد. آهننگ پرتودهی يك چشمه رادیم که حاوی m میلی گرم رادیم در کپسولی به ضخامت t میلی متر باشد، در فاصله d سانتی متر از چشمه از رابطه زیر به دست می آید

$$\dot{X} = \frac{2.24 \times 10^{-3} me^{-\mu t}}{d^2} \text{ C/kg} \cdot \text{h} \quad (19.9 \text{ الف})$$

که در آن μ ضریب جذب خطی ماده کپسول است (μ برای پلاتین برابر $19/\text{mm}$ است). اگر پرتودهی بر حسب رونتگن بیان شود، آهننگ پرتودهی متناظر به صورت زیر خواهد بود

$$\dot{R} = \frac{9.1 me^{-\mu t}}{d^2} \text{ R/h} \quad (19.9 \text{ ب})$$

آهننگ پرتودهی تابشی ۱ میلی گرم ^{226}Ra در تعادل با دخترهسته هایش در فاصله ۱ متری برابر 825 mR/h ($212 \mu\text{C/kg}$) در ساعت است. فاصله از چشمه برای هر آهننگ پرتودهی لازم دیگر، به کمک قانون عکس مجذور محاسبه می شود. از این رو اگر چشمه ای حاوی 100 mg رادیم در کپسولی از پلاتین به ضخامت 5 mm داشته باشیم، آهننگ پرتودهی در فاصله ۱ متری از آن برابر 825 mR/h ($212 \mu\text{C/kg}$) در ساعت خواهد بود. برای درجه بندی نقطه میانی (125 mR/h) ($32 \mu\text{C/kg}$) در ساعت، روی مقیاس دستگاهی که حداکثر 25 mR/h ($6.4 \mu\text{C/kg}$) در ساعت را می تواند اندازه بگیرد، آشکارساز را باید در فاصله ای که به صورت زیر محاسبه می شود قرارداد

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

$$\frac{212}{32} = \frac{d_2^2}{1} \quad (20.9)$$

$$d_2 = 2.6 \text{ m}$$

قانون عکس مجذور، که در آن بنا به فرض چشمه رادیم يك چشمه نقطه ای است، در فواصلی که تقریباً ۱۰ برابر بزرگترین بعد خطی چشمه هستند به کار می رود. پراکندگی از کف، سقف، و دیوارهای اتاقی که در آن درجه بندی انجام می شود، به کاهشی در آهننگ دز تابش منجر می شود که کندتر از کاهش پیش بینی شده توسط قانون عکس مجذور است. این نکته را می توان با اندازه گیری آهننگ دز پرتو گاما بایک اتاقک یونش یا يك شمارگر مدرج در فواصل مختلف بررسی کرد. اگر قانون عکس مجذور صادق باشد، نمودار لگاریتمی آهننگ

جدول ۶.۹ طیف تقریبی پرتوهای گامای رادیم و محصولات واپاشی آن در حالت تعادل.

گذار	تعداد کوانتومها در هر تبدیل رادیم	فوتون / MeV
$Ra \rightarrow Rn$	۰.۰۱۲	۰.۱۸۴
$Ra\ B \rightarrow Ra\ C$	۰.۱۱۵	۰.۲۴۱
	۰.۲۵۸	۰.۲۹۴
	۰.۴۵۰	۰.۳۵۰
$Ra\ C \rightarrow Ra\ C'$	۰.۶۵۸	۰.۶۰۷
	۰.۰۶۵	۰.۷۶۶
	۰.۰۶۷	۰.۹۳۳
	۰.۲۰۶	۱.۱۲۰
	۰.۰۶۳	۱.۲۳۸
	۰.۰۶۴	۱.۳۷۹
	۰.۲۵۸	۱.۷۶۱
	۰.۰۷۴	۲.۱۹۸
	کل = ۲.۳	$\bar{E} = ۰.۷$

دز بر حسب لگاریتم فاصله (یا آهنگ دز بر حسب فاصله روی کاغذ لگاریتمی) به صورت خط راستی با شیب ۲ - خواهد بود. شیب کمتر از این مقدار، بر وجود مقادیر زیادی تابش پراکنده دلالت خواهد داشت.

برای درجه بندی وسایل اندازه گیری پرتو گاما، غیر از رادیم از چشمه های دیگری نیز می توان استفاده کرد که در میان آنها ^{60}Co و ^{137}Cs بیشتر متداول اند. فعالیت ویژه این چشمه ها باید خیلی زیاد باشد تا چشمه به اندازه کافی (از لحاظ ابعاد فیزیکی) کوچک شود، به گونه ای که بتوان آن را «نقطه» در نظر گرفت. قدرت اسمی چشمه های ^{60}Co و ^{137}Cs

به ترتیب برابر $9.2 \times 10^{-3} \mu\text{C/kg}$ در ساعت به ازای هر MBq (1.32 R/h) به ازای هر Ci) و $2.3 \times 10^{-3} \mu\text{C/kg}$ در ساعت به ازای هر MBq (0.33 R/h) به ازای هر Ci) در فاصله ۱ متری است. اما چون این چشمه ها نیز باید در کپسول سر بسته باشند، برای محاسبه تضعیف تابش در کپسول باید نوع کپسول مشخص باشد. هنگام استفاده از این چشمه، خروجی تابش باید بایک وسیله قبلاً مدرج شده اندازه گیری شود. باید توجه داشت که چون هر دوی این ایزوتوپهای پرتوزا نیمه عمر نسبتاً کوتاهی دارند (53 سال برای ^{60}Co و 30 سال برای ^{137}Cs)، باید در اندازه گیریهای مربوط به چشمه اصلی یا محاسبات مربوط به واپاشی ماده پرتوزا، ضرایب تصحیح لازم اعمال شود.

پرتوهای بتا

مشخصه های پاسخ دز در اکثر وسایل اندازه گیری قابل حمل پرتوهای بتا شدیداً وابسته به انرژی هستند. در نتیجه، معمولاً این گونه وسایل تنها برای آشکارسازی تابش بتا به کار می روند نه برای اندازه گیری آهنگ دز آنها. بنابراین، چنین وسایلی عموماً برای اندازه گیری دز پرتو بتا مدرج نمی شوند. اگر آهنگ دز پرتو بتا مورد نظر باشد، باید از یک چشمه بی نهایت ضخیم با فعالیت ویژه مشخص استفاده کرد. آهنگ دز سطحی که برابر نصف آهنگ دز محیط بی نهایت بزرگ با همان فعالیت ویژه است، به راحتی محاسبه می شود. چشمه پرتو بتایی که اغلب برای درجه بندی آهنگ دز به کار می رود، یک تیغه بی نهایت ضخیم (به ضخامت حدود 5 mm) از اورانیوم فلزی است، که آهنگ دز پرتو بتا در سطح آن برابر (240 mrad/h) (24 mGy/h) است.

پرتوهای آلفا

وسایل بررسی قابل حملی که برای اندازه گیری آلودگی آلفا به کار می روند معمولاً نتیجه اندازه گیری را بر حسب یکاهای آهنگ شمارش به دست می دهند. چشمه های درجه بندی این وسایل اکثر آقرصهای فلزی هستند که مقدار معینی ایزوتوپ پرتوای آلفا گسیل روی سطحشان آب کاری کرده اند. این چشمه ها را که فهرست شان در جدول ۷.۹ آمده است می توان از بازار یا آزمایشگاههای استاندارد ملی تهیه کرد.

نوترونها

معمولاً برای نوترونها تندهای چشمه های درجه بندی که محتوی Ra-Be ، Po-Be و Pu-Be هستند استفاده می شود. در جدول ۵.۵ بهره نوترونی تقریبی هر یک از این چشمه ها آمده است. آهنگ دقیق نوترونها تندهای خارج شونده را معمولاً عرضه کنندگان چشمه بر حسب نوترون در ثانیه معین می کنند. برای مقایسه متقابل چشمه ها، می توان از شمارگر طولی

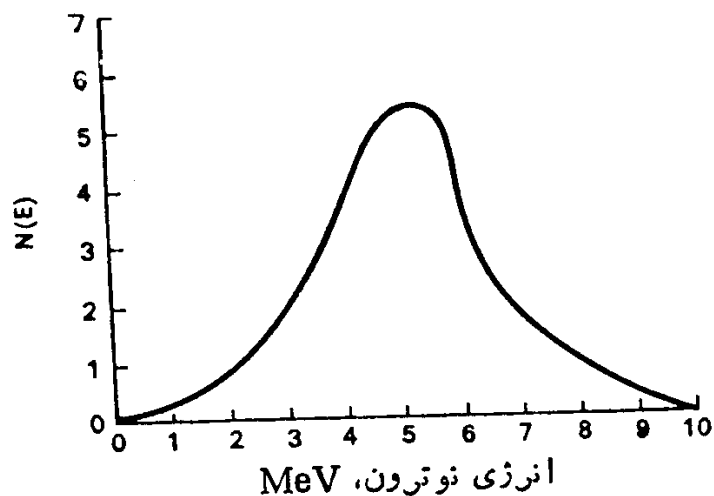
جدول ۷.۹ چشمه‌های استاندارد برای درجه‌بندی سنجش‌افزار پرتوهای آلفا.

نوکلید پرتوزا	انرژی آلفا (MeV)	نیمه‌عمر
^{235}U	۴۳۷-۴۳۶	$7.1 \times 10^8 \text{ y}$
^{239}Pu	۵۱۱-۵۱۶	$2.44 \times 10^4 \text{ y}$
^{210}Po	۵.۳	۱۳۸.۴ d
^{241}Am	۵.۴۴-۵.۴۹	۴۳۲ y

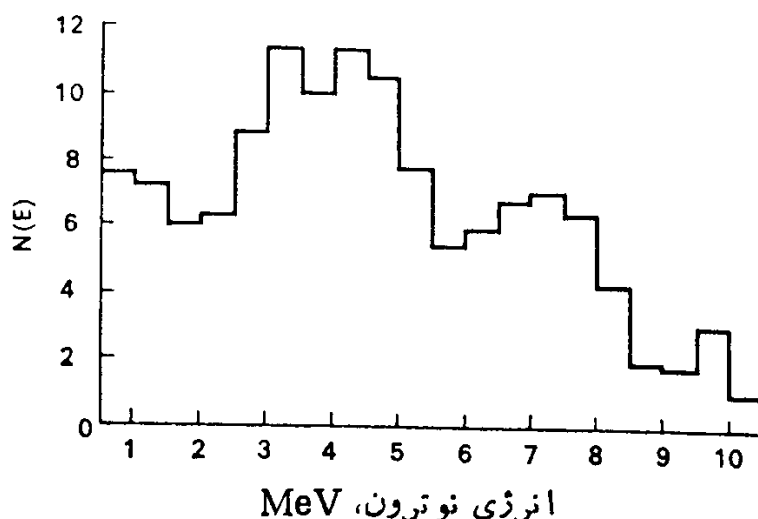
هانسون و مک کین با دقت $\pm 5\%$ درصد استفاده کرد. شار نوترون در فاصله d از چشمه، با فرض اینکه چشمه «نقطه‌ای» باشد، از رابطه زیر محاسبه می‌شود

$$\phi = \frac{N \text{ نوترون/s}}{4\pi d^2 \text{ cm}^2} \quad (21.9)$$

تمامی چشمه‌های نوترون، نوترونهای تند تولید می‌کنند. برای سه چشمه واکنشی (α, n) که در بالا به آنها اشاره شد، انرژی نوترونها در گستره از $1/2 \text{ MeV}$ تا 10 MeV قرار دارد و میانگین انرژی آنها در حدود $4-5 \text{ MeV}$ است (شکل‌های ۲۱.۵ و ۳۶.۹، و ۳۷.۹). در مواردی که برای درجه‌بندی وسیله اندازه‌گیری دز معادل نوترون از چشمه نوترون تند استفاده می‌شود، باید طیف انرژی نوترون در نظر گرفته شود. به عنوان مثال،



شکل ۳۶.۹ طیف انرژی نوترونهای ناشی از $\text{Ra-Be}(\alpha, n)$. طیف نوترون با اندازه‌گیری طول ردها در آمولوسیون هسته‌ای تعیین شده است.



شکل ۳۷.۹ طیف انرژی نوترونهاي ناشي از Pu-Be (α, n). برای اندازه گیری انرژی از امولسیونهای هسته‌ای استفاده شده است.

چشمه نوترون Pu-Be را در نظر می‌گیریم (شکل ۳۷.۹)، و شار متناظر با $25 \mu\text{Sv/h}$ (2.5 mrem/h) یا 1 mSv (100 mrem) را برای هفته‌ای ۴۰ ساعت کار تعیین می‌کنیم. توزیع طیفی این مورد در جدول ۸.۹ آمده است. با استفاده از این داده‌ها و مقادیر مناسب QF برای انرژی‌های مختلف نوترون، شار معادل دز $25 \mu\text{Sv/h}$ (2.5 mrem/h) را برابر ۲۰ نوترون بر سانتی متر مربع در هر ثانیه به دست می‌آوریم. اگر نوترونهاي تک انرژی مورد نظر باشند، باید یکی از چشمه‌های (γ, n) جدول ۴.۵ را مورد استفاده قرارداد. در صورتی که برای درجه بندی استفاده از نوترونهاي گرمایی لازم باشد، نوترونهاي تند گسیل شده از چشمه نوترون باید گرمایی شوند. این کار با قراردادن چشمه در داخل پارافین به راحتی عملی می‌شود. اما، باید تأکید کرد که تمامی نوترونهاي تند گرمایی نمی‌شوند. باریکه نوترونی که از کندساز بیرون می‌آید چند انرژی است، و کندساز فقط بخش کم انرژی طیف نوترونی را به طرف انرژی‌های گرمایی سوق می‌دهد. اگر کندساز خیلی نازک باشد باریکه نوترون سرشار از نوترونهاي تند خواهد بود؛ اما اگر کندساز خیلی ضخیم باشد نسبت نوترونهاي گرمایی به نوترونهاي تند افزایش و در عوض شدت باریکه نوترون کاهش می‌یابد. ضخامت مناسب پارافین برای بیشینه سازی شدت نوترونهاي گرمایی از هر چشمه درجه بندی در حدود ۱۰ cm است. با این ضخامت، شار گرمایی در فاصله ۲ متری چشمه تقریباً ۴۰٪ شار نوترونهاي تندی است که بدون کندساز پارافینی به دست می‌آید. هرگاه نسبت تقریباً ثابتی از نوترونهاي گرمایی به نوترونهاي تند مورد نظر باشد ضخامت کندساز پارافین باید بیشتر از ۱۰ cm باشد.

نسبت دقیق نوترونهاي گرمایی به نوترونهاي تند را می‌توان با استفاده از نوترونها برای فعال کردن یک برگه طلای ساده و یک برگه طلا با پوشش کادمیم تعیین کرد. به دلیل قطع ناگهانی جذب کادمیم در حدود ۰.۴ eV، فعالیت القایی در برگه با پوشش کادمیم فقط

جدول ۸.۹ داده‌های لازم برای محاسبه آهنگ دز معادل جهت نوترونهای Pu-Be.

بازه انرژی E_i	میانگین انرژی $\bar{E}_i$	کسرنوترونها f_i در E_i	$\bar{E}_i \times f_i$	شار ϕ_i متناظر با $25 \mu\text{Sv/h}$	$\phi_i \times f_i$
0-0.5	0.25	0.038	0.0095	82	3.12
0.5-1	0.75	0.049	0.0368	23	1.13
1-1.5	1.25	0.045	0.0563	19	0.86
1.5-2	1.75	0.042	0.0735	19	0.80
2-2.5	2.25	0.046	0.1035	20	0.92
2.5-3	2.75	0.062	0.1705	20	1.24
3-3.5	3.25	0.077	0.2503	18	1.39
3.5-4	3.75	0.083	0.3113	18	1.49
4-4.5	4.25	0.082	0.3485	17	1.39
4.5-5	4.75	0.076	0.3610	17	1.29
5-5.5	5.25	0.057	0.2993	16	0.91
5.5-6	5.75	0.042	0.2415	16	0.67
6-6.5	6.25	0.042	0.2625	17	0.71
6.5-7	6.75	0.052	0.3510	17	0.89
7-7.5	7.25	0.054	0.3915	17	0.93
7.5-8	7.75	0.051	0.3953	17	0.84
8-8.5	8.25	0.038	0.3135	17	0.64
8.5-9	8.75	0.017	0.1488	17	0.29
9-9.5	9.25	0.018	0.1665	17	0.30
9.5-10	9.75	0.022	0.2145	17	0.37
10-10.5	10.25	0.007	0.0718	17	0.11
		1.000	4.5774	$\Sigma = 20.29$	

$$25 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \left(25 \frac{\text{mrem}}{\text{h}} \right) \text{شار متناظر} = \frac{\Sigma \phi_i f_i}{\Sigma f_i} = \gamma_0 \frac{\text{نوترون}}{\text{cm}^2/\text{s}}$$

$$\text{میانگین انرژی نوترون} = \frac{\Sigma E_i f_i}{\Sigma f_i} = 4.6 \text{ MeV}$$

ناشی از نوترونهایی است که انرژی آنها بیشتر از ۴ eV است، درحالی که این فعالیت دربرگه بدون پوشش، ناشی از نوترونهای گرمایی و نوترونهای تند هر دو است. نسبت کادمیم، که به صورت زیر تعریف می شود

$$\text{نسبت Cd} = \frac{\text{فعالیت برگه بدون پوشش}}{\text{فعالیت برگه با پوشش}} \quad (22.9)$$

معیاری از خلوص میدان نوترون گرمایی است. شار گرمایی رامسی توان با استفاده از اندازه گیریهای فعالیت برگه طلا با کمک معادله (۶۰.۵) محاسبه کرد.

دقت

دقت لازم برای وسایل فیزیك بهداشت بستگی به این دارد که تا چه حد کمیت مورد اندازه گیری به مقدار مجاز قانونی آن کمیت یا به بیشینه مقادیری که ICRP توصیه کرده است نزدیک است. هنگامی که اندازه گیریها در سطح ۱۰۵ مقدار بیشینه مجاز یا کمتر انجام می شود، معمولاً دقت ± 200 درصد قابل قبول است. به دلیل محافظه کاری فوق العاده زیادی که در توصیه های ICRP به کار رفته است، معمولاً دقت ± 30 درصد برای مقادیر نزدیک به سطوح مجاز بیشینه پذیرفته می شود. برای مقادیر خیلی بیشتر از بیشینه ها، دقت وسایل نباید خیلی بدتر از ± 30 درصد باشد، زیرا معالجات پزشکی افراد بیش پر تو گرفته شدیداً تحت تأثیر دز دریافتی (و همچنین علائم و نشانه های کلینیکی) آنهاست. در این بحث، باید وسایل فیزیك بهداشت از وسایل اندازه گیری تابش که برای درجه بندی ماشینهای مولد تابش در پرتوشناسی پزشکی به کار می روند کاملاً متمایز باشند. دقت این وسایل برای تابشهای مورد اندازه گیری، باید در حدود ± 30 درصد یا بهتر باشد.

آمار شمارش

توزیعها

تبدیل های پرتوزا و سایر واکنشهای هسته ای به صورت کتره ای به وقوع می پیوندد، و بنابراین از لحاظ کمی باید بر اساس قواعد آماری آنها را مورد بررسی قرارداد. توزیع نمونه ای يك جمعیت از رویدادهایی را که به صورت کتره ای اتفاق می افتند توزیع دو جمله ای می گویند، و مقدار آن از بسط دو جمله ای به دست می آید

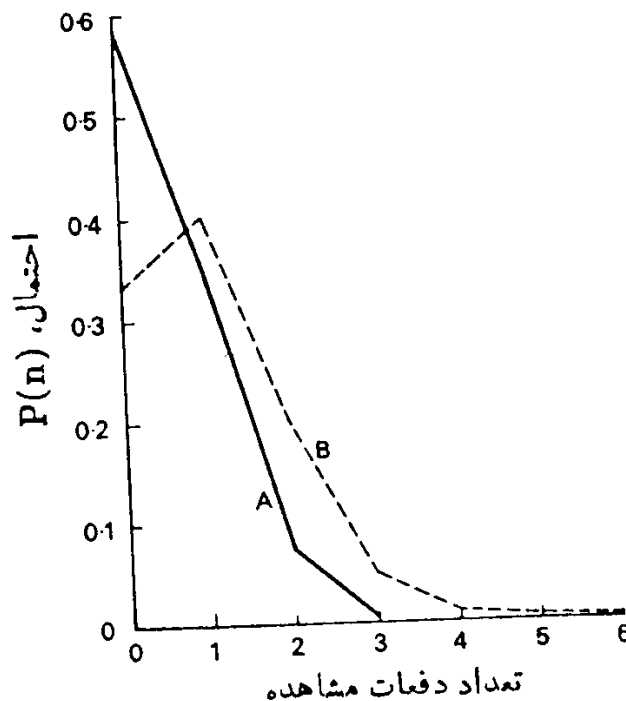
$$(p+q)^n = p^n + n p^{n-1} q + \frac{n(n-1)}{2!} p^{n-2} q^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!} p^{n-3} q^3 + \dots \quad (23.9)$$

که در آن p احتمال میانگین تحقق يك رویداد، q احتمال میانگین عدم تحقق همان رویداد است، به طوری که $p+q=1$ ، و n تعداد شانسهای تحقق رویداد است. احتمال دقیق تحقق n رویداد با اولین جمله بسط دو جمله ای، و احتمال تحقق $n-1$ رویداد با دومین جمله به دست می آید و به همین ترتیب تا به آخر. به عنوان مثال، احتمال مشاهده ۳ بار ۱ در سه تاس ریزی متوالی، که در آن احتمال میانگین مشاهده ۱ برابر $1/6$ است، از جمله اول بسط $(1/6 + 5/6)^3$ به دست می آید

$$\begin{aligned}
 (1/6 + 5/6)^3 &= (1/6)^3 + 3(1/6)^2(5/6) + \frac{3 \times 2}{2!} (1/6)(5/6)^2 \\
 &\quad + \frac{3 \times 2 \times 1}{3!} (5/6)^3 \\
 &= 1/216 + 15/216 + 75/216 + 125/216 = 1
 \end{aligned}$$

همین طور، احتمال مشاهده دو بار ۱، یک بار ۱، و عدم مشاهده ۱ به ترتیب از جملات دوم و سوم و چهارم و برابر $15/216$ ، $75/216$ و $125/216$ به دست می آید. نمودار این احتمالات (شکل ۳۸.۹ منحنی A) نشان می دهد که توزیع آنها بسیار نامتقارن است. اگر همین محاسبات را برای تعیین احتمال مشاهده شش ۱، پنج ۱، چهار ۱، سه ۱، دو ۱، یک ۱، و عدم مشاهده ۱ در ۶ بار تاس ریزی انجام دهیم، یعنی $(1/6 + 5/6)^6$ ، منحنی B در شکل ۳۸.۹ به دست می آید. از مقایسه دو منحنی A و B معلوم می شود که منحنی B متقارن تر است، یعنی با افزایش n منحنی نمایش توزیع نیز حول خط مرکزی متقارن تر می شود. در حالتی که n بی نهایت شود، منحنی بهنجار و ناقوسی شکل به دست می آید. اگر $n \geq 30$ باشد، در عمل تفاوت منحنی توزیع نمونه ای دو جمله ای از منحنی بهنجار قابل تشخیص نیست. توزیع بهنجار که از رابطه زیر به دست می آید

$$p(n) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2\sigma^2}} \quad (24.9)$$



شکل ۳۸.۹ نمودار احتمال مشاهده خال ۱ در سه دفعه تاس ریزی متوالی (منحنی A)، و نمودار احتمال مشاهده خال ۱ در شش دفعه تاس ریزی متوالی (منحنی B).

يك پارامتر در توزیع بهنجار، معادله (۲۴.۹)، دیده می‌شود. توزیع پواسون، معادله (۲۷.۹)، فقط يك پارامتر دارد که آن هم مقدار میانگین است. انحراف معیار توزیع پواسون برابر است با جذر میانگین شمارشها در هر فاصله اندازه‌گیری

$$\sigma (\text{پواسون}) = \sqrt{n} \quad (29.9)$$

هنگامی که رویدادهایی چون واپاشی پرتوزا یا سایر رویدادهای هسته‌ای را شمارش می‌کنیم، «بزرگی» نمونه را طول دلخواهی از زمان تعیین می‌کنند که در آن این اندازه‌گیری انجام می‌شود. n در معادله (۲۹.۹) برابر با تعداد کل رویدادهایی است که در طول زمان مشاهده روی می‌دهند، و از این رو، آهنگ میانگین همین بازه زمانی است. بنا بر این، اگر ۱۰۰۰۰ شمارش را در يك بازه شمارش ۱۰ دقیقه‌ای مشاهده کنیم، انحراف معیار مشاهده برابر $\sqrt{10000} = 100$ شماره در ۱۰ دقیقه خواهد بود. این اندازه‌گیری يك مقدار میانگین ۱۰۰۰۰ شمارش را برای بازه اندازه‌گیری ۱۰ دقیقه‌ای نشان می‌دهد. یکی از ویژگیهای عمده توزیع پواسون در عمل این است که وقتی $n \geq 20$ باشد، این توزیع از توزیع بهنجار همین میانگین و انحراف معیار برابر با جذر میانگین غیر قابل تشخیص است. تحت این شرایط کلیه آزمونهای آماری معتبر در توزیع بهنجار، نظیر آزمون t ، معیار χ^2 ، و آزمون نسبت واریانس (که آزمون F نیز نامیده می‌شود) را می‌توان برای توزیعهای پواسون نیز به کار برد. با آنکه تمامی این آزمونها در اندازه‌گیریهای پرتوزایی به کار می‌روند اما بررسی کامل آنها از گنجایش این کتاب خارج است. تفصیل و کاربرد این آزمونها را می‌توان در مراجع پیشنهادی پایان این فصل مطالعه کرد. در مثال بالا که در آن ۱۰۰۰۰ شمارش در خلال ۱۰ دقیقه شمارش ثبت شده است، آهنگ شمارش میانگین بر حسب شمارش در دقیقه و انحراف معیار آهنگ میانگین از رابطه زیر به دست می‌آید

$$r \pm \sigma_r = \frac{n}{t} \pm \frac{\sqrt{n}}{t} \quad (30.9)$$

و چون

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{n}}{t} = \sqrt{\left(\frac{n}{t} \cdot \frac{1}{t}\right)} = \sqrt{\left(r \cdot \frac{1}{t}\right)}$$

داریم

$$r \pm \sigma_r = r \pm \sqrt{\frac{r}{t}} \quad (31.9)$$

که مقدار عددی 10000 ± 10 cpm را به دست می‌دهد. اگر فعالیت در بازه ۱ دقیقه‌ای

اندازه‌گیری شود و ۱۰۰۰ شمارش به دست آید، نتیجه برابر $1000 \pm \sqrt{1000}$ یا 1000 ± 32 cpm می‌شود. خطای محتمل نسبی که به صورت زیر تعریف می‌شود

$$\text{خطای محتمل نسبی} = \frac{\sqrt{n}}{n} \quad (32.9)$$

در شمارش ۱ دقیقه‌ای برابر ۳۲٪ و در شمارش ۱۰ دقیقه‌ای فقط برابر ۱٪ خواهد بود. بنابراین میزان دقت هر اندازه‌گیری شمارشی معین به مقدار کل شمارش بستگی دارد. در اندازه‌گیریهای پرتوزایی معمولاً باید شمارش زمینه نیز منظور شود. از این رو، در این اندازه‌گیریها آهنگ شمارش خالص عبارت است از اختلاف میان آهنگ شمارش ناخالص (به انضمام آهنگ شمارش زمینه) و آهنگ شمارش زمینه مورد نظر. هر یک از این آهنگهای شمارش، انحراف معیار مربوط به خود را دارد. انحراف معیار آهنگ شمارش خالص برابر است با

$$\sigma_n = \sqrt{(\sigma_g^2 + \sigma_{bg}^2)} = \sqrt{\left(\frac{r_g}{t_g} + \frac{r_{bg}}{t_{bg}}\right)} \quad (33.9)$$

که در آن، σ_g انحراف معیار آهنگ شمارش ناخالص، σ_{bg} انحراف معیار آهنگ شمارش زمینه، r_g آهنگ شمارش ناخالص، r_{bg} آهنگ شمارش زمینه، t_g زمان اندازه‌گیری شمارش ناخالص، و t_{bg} زمان اندازه‌گیری شمارش زمینه است.

مثال ۵.۹

اگر شمارش ناخالص یک نمونه به مدت ۵ دقیقه برابر ۵۱۰ و شمارش ۱ ساعتی زمینه برابر ۲۴۰۰ شمارش باشد، آهنگ شمارش خالص نمونه و انحراف معیار آهنگ شمارش خالص نمونه چقدر است؟

حل:

$$r_n = \frac{\text{شمارش } 510}{\text{دقیقه } 5} - \frac{\text{شمارش } 2400}{\text{دقیقه } 60} = 102 \text{ cpm} - 40 \text{ cpm}$$

$$= 62 \text{ cpm}$$

$$\sigma_n = \sqrt{\left(\frac{102}{5} + \frac{40}{60}\right)} = 4.6$$

$$62 \pm 4.6 \text{ cpm}$$

انحراف معیار، معیار پراکندگی رویدادهای کتره‌ای حول مقدار میانگین است. اگر

تعداد خیلی زیادی آزمایش تکراری انجام می‌دادیم، چنانکه در بالا اشاره شد، ۶۸٪ از مشاهدات در فاصله بین ± ۱ انحراف معیار از مقدار میانگین قرار می‌گرفتند. به همین دلیل، می‌توان گفت که حد اطمینان یک انحراف معیار ۶۸٪ است. به طور مشابه، حد اطمینان دو انحراف معیار برابر ۹۶٪ است. اگر داده‌های موجود در فاصله بین دو انحراف معیار از مقدار میانگین را گزارش کنیم، با احتمال ۹۶٪ اطمینان داریم که مقدار درست بین حدود مفروض قرار می‌گیرد. در جدول زیر، چندین حد اطمینان همراه با تعداد انحراف معیارهای متناظر با آنها آمده است:

تعداد انحراف معیار	حد اطمینان
۰.۶۷۴۵	۵۰٪
۱.۰	۶۸٪
۱.۶۴۵	۹۰٪
۱.۹۶۰	۹۵٪
۲.۰	۹۶٪
۲.۵۷۵	۹۹٪

مثال ۶.۹

در یک اندازه‌گیری مقدماتی که در مدت زمان کوتاهی انجام شده، آهنگ شمارش ناخالص برابر ۵۵ cpm به دست آمده است. آهنگ شمارش زمینه در طی شمارش ۱ ساعته برابر ۲۵ cpm است. برای اینکه با اطمینان ۹۶٪ آهنگ شمارش خالص اندازه‌گیری شده در فاصله ۱۰٪ از آهنگ شمارش واقعی قرار گیرد، چه مدت زمانی نمونه باید شمارش شود؟ حل: آهنگ شمارش خالص برآورد شده ۳۰ cpm و ۱۰٪ آن برابر با ۳ cpm است. چون حد اطمینان باید ۹۶٪ باشد، خطای مجاز ± ۳ cpm بالغ بر دو انحراف معیار خواهد بود. بنابراین، یک انحراف معیار برابر ۱.۵ cpm خواهد شد. با استفاده از این مقدار و قرار دادن آن و سایر مقادیر معلوم در معادله (۳۳.۹) به این نتیجه می‌رسیم

$$۱.۵ = \sqrt{\left(\frac{۵۵}{t_g} + \frac{۲۵}{۶۰}\right)}$$

$$t_g = ۳۰.۱ \text{ min}$$

اختلاف بین میانگینها

در اندازه گیریهای شمارش تقریباً همواره اختلاف میان دو آهنگ شمارش مورد نظر ماست. به عنوان مثال، اختلاف میان آهنگ شمارش نمونه و زمینه یا اختلاف میان آهنگ شمارشهای خاص دو نمونه را می توان ذکر کرد. اگر این اختلاف خیلی زیاد باشد ما به طور مشهودی می دانیم که يك اختلاف واقعی میان دو نمونه وجود دارد. اما اگر این اختلاف کم باشد، آنگاه به این دلیل که واپاشی پرتوزا يك فرایند کتره ای است که در آن ما می دانیم که ۹۶٪ اندازه گیریها میان مقدار واقعی و بعلاوه و منهای دو انحراف معیار قرار می گیرند، ما نمی توانیم به طور مشهودی نتیجه گیری کنیم که اختلاف مشاهده شده صرفاً ناشی از خطاهای نمونه گیری کتره ای است، و دو اندازه گیری در واقع دو نمونه از يك جمعیت هستند یا نه. برای کمک به نتیجه گیری، از آزمون آماری هدفدار مبتنی بر فرضیه صفر استفاده می کنیم. در این فرضیه فرض می شود که هیچ اختلافی میان دو اندازه گیری وجود ندارد. بر این اساس، ما احتمال یافتن اختلاف میان دو آهنگ شمارش میانگین را برابر با یا بزرگتر از آنچه در واقع مشاهده می شود محاسبه می کنیم. به علاوه، ما به طور دلخواه حدی برای این احتمال در نظر می گیریم. اگر احتمال محاسبه شده دستیابی تصادفی به اختلاف اندازه گیری شده بزرگتر از این حد باشد، نتیجه می گیریم که بین دو آهنگ شمارش اختلافی وجود ندارد، و دو نمونه از يك جمعیت انتخاب شده اند. ولی اگر احتمال یافتن اختلاف اندازه گیری شده در میان نمونه های يك جمعیت از مقدار محاسبه شده کمتر باشد، فرضیه صفر را رد می کنیم و می گوئیم که اختلاف میان دو میانگین از لحاظ آماری بامعنی است؛ یعنی نمونه ها در واقع با هم فرق دارند. دو حد اختیاری بامعنی بودن که در محاسبات آماری به طور وسیع به کار می روند عبارت اند از ۱٪ و ۵٪. این گفته به این معنی است که اگر ما حد ۱٪ را اختیار کنیم، احتمال دستیابی کتره ای به اختلافی میان دو نمونه از يك جمعیت به همان اندازه اختلافی که در اندازه گیریهای دو نمونه مشاهده می شود از ۱٪ بیشتر باشد، فرضیه صفر را می پذیریم و می گوئیم که هیچ اختلافی بین دو نمونه وجود ندارد. اما اگر احتمال محاسبه شده برابر ۱٪ یا کمتر باشد، معلوم می شود که اختلاف در اینجا بامعنی است. باید تأکید کرد که حد یا سطح بامعنی بودن کاملاً اختیاری است، و شخص آزمایشگر آن را تعیین می کند. آزمایشگر ناچار نیست که خود را به سطوح ۱٪ یا ۵٪ محدود کند، در صورت لزوم می تواند سطح ۱۰٪ یا هر سطح مناسب دیگری را به کار ببرد. اما اگر به جای ۱٪ یا ۵٪ از سطح ۱۰٪ استفاده کند، احتمال اینکه يك اختلاف ظاهری را که واقعیت ندارد بپذیرد بیشتر می شود. بنابراین، هنگام خواندن و تعبیر کردن داده های تجربی، دانستن سطح احتمالی که آزمایشگر به عنوان محکی برای بامعنی بودن از آن استفاده کرده است مهم است.

تعیین بامعنی بودن اختلاف میان میانگینها مبتنی بر این واقعیت است که در يك جمعیت با توزیع بهنجار نه تنها میانگینهای نمونه های جمعیت به صورت بهنجار حول میانگینهای واقعی توزیع شده اند، بلکه توزیع اختلاف میان میانگینها نیز بهنجار است. اگر بخواهیم تعداد خیلی زیادی نمونه مکرر از يك جمعیت را رسم کنیم، میانگین هر نمونه را حساب

می‌کنیم، میانگین نمونه دوم M_2 را از میانگین نمونه اول M_1 کم و اختلافات آنها را رسم می‌کنیم، در این صورت منحنی بهنجاری حول میانگین صفر به دست می‌آوریم که انحراف معیار آن خطای معیار اختلاف میان میانگینها نامیده می‌شود. برای برآورد خطای معیار اختلاف میانگینهای دو نمونه، از معادله (۳۳.۹) که شکل کلیتر آن به صورت زیر است استفاده می‌کنیم

$$\sigma_{\text{diff}} = \sqrt{(\sigma_{M_1}^2 + \sigma_{M_2}^2)} \quad (33.9)$$

که در آن σ_M^2 مجذور خطای معیار مقدار میانگین است. در اندازه‌گیریهای شمارش، این خطای معیار میانگین با معادله (۳۱.۹) که خطای معیار آهنگ شمارش میانگین را به دست می‌دهد، داده می‌شود

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{r}{t}} \quad (35.9)$$

با استفاده از آزمون t معلوم می‌شود که اختلاف میان دو مقدار میانگین اندازه‌گیری شده، بر حسب خطای معیار اختلاف میان میانگینها، چقدر با صفر تفاوت دارد

$$t = \frac{|M_1 - M_2|}{\sigma_{\text{diff}}} = \frac{|M_1 - M_2|}{\sqrt{r_1/t_1 + r_2/t_2}} \quad (36.9)$$

مثال ۷.۹

نمونه‌ای از یک آب آشامیدنی برای مدت ۱۰ دقیقه شمارش شده و ۵۳۰ شمارش به دست آمده است. آهنگ زمینه، در یک شمارش ۳۰ دقیقه‌ای، برابر ۵۰ cpm بوده است. آیا در سطح اطمینان ۹۵٪ می‌توان فعالیتی به این آب نسبت داد؟
حل:

$$M_1 = \frac{530 \text{ شمارش}}{10 \text{ دقیقه}} = 53 \text{ cpm} \quad t_1 = 10 \text{ min}$$

$$M_2 = 50 \text{ cpm} \quad t_2 = 30 \text{ min}$$

$$t = \frac{53 - 50}{\sqrt{(53/10 + 50/30)}} = 1.13$$

این نتیجه نشان می‌دهد که اختلاف اندازه‌گیری شده به اندازه ۱.۱۳ انحراف معیار با صفر اختلاف دارد. از جدول مساحت زیر منحنی بهنجار معلوم می‌شود که ۱.۱۳ انحراف معیار شامل ۳۷٪ مساحت در هر طرف مقدار میانگین است، یعنی ۷۴٪ مساحت بین ± 1.13

انحراف معیار قرارداد دارد. این نتیجه را این طور تعبیر می کنیم که اگر دو نمونه از يك جمعیت باشند با احتمال ۲۶ درصد انتظار می رود که با اختلافی برابر ۱۰۱۳ انحراف معیار یا بزرگتر رو به رو شویم. بنابراین، اختلاف بین دو نمونه بامعنی نیست. برای اینکه اختلاف در سطح اطمینان ۹۵٪ بامعنی باشد، اختلاف میان دو میانگین باید به قدری بزرگ باشد که فقط در ۵ درصد موارد مشاهده شود.

بهینه سازی زمان شمارش

به منظور کمینه سازی عدم قطعیت آماری آهنگ شمارش خالص، می توان زمان موجود برای تعیین آهنگ شمارش خالص يك نمونه را به زمان شمارش زمینه و زمان شمارش نمونه تقسیم کرد. انحراف معیار آهنگ شمارش خالص از معادله (۳۳.۹) به دست می آید

$$\sigma_n = \sqrt{\left(\frac{r_g}{t_g} + \frac{r_{bg}}{t_{bg}}\right)} \quad [33.9]$$

که با مجذور کردن آن داریم

$$\sigma_n^2 = \frac{r_g}{t_g} + \frac{r_{bg}}{t_{bg}} \quad (37.9)$$

و با مشتق گیری از رابطه بالا نسبت به t خواهیم داشت

$$2\sigma_n d\sigma_n = -r_g t_g^{-2} dt_g - r_{bg} t_{bg}^{-2} dt_{bg} \quad (38.9)$$

برای اینکه t کمینه شود، قرار می دهیم

$$0 = \frac{r_g}{t_g^2} dt_g - \frac{r_{bg}}{t_{bg}^2} dt_{bg} \quad (39.9)$$

از آن حاصل می شود

$$\frac{r_g}{t_g^2} dt_g = -\frac{r_{bg}}{t_{bg}^2} dt_{bg} \quad (40.9)$$

چون زمان شمارش کل t ثابت است، داریم

$$t = t_g + t_{bg} \quad (41.9)$$

$$dt_g + dt_{bg} = 0 \quad (۲۲.۹)$$

با مرتب کردن معادله (۲۰.۹) و استفاده از معادله (۲۲.۹) نتیجه می شود

$$\frac{r_g/t_g^{\gamma}}{-r_{bg}/t_{bg}^{\gamma}} = \frac{dt_{bg}}{dt_g} = \frac{dt_{bg}}{-dt_{bg}} = -1 \quad (۲۳.۹)$$

که به تقسیم بهینه زمان شمارش کل بین زمان شمارش نمونه و زمان شمارش زمینه منجر می شود

$$\frac{t_g}{t - t_g} = \sqrt{\frac{r_g}{r_{bg}}} \quad (۲۴.۹)$$

مثال ۸.۹

مجموع زمان شمارش نمونه و زمان شمارش زمینه برابر ۱ ساعت است. اندازه گیریهای مقدماتی نشان می دهد که زمینه در حدود ۱۵ شمارش در دقیقه و آهنگ شمارش نمونه در حدود ۲۲ cpm است. برای اینکه خطای آماری شمارش به حداقل برسد، اندازه گیری نمونه و زمینه چه مدت باید به طول انجامد؟
حل: با استفاده از معادله (۲۴.۹) داریم

$$\frac{t_g}{60 - t_g} = \sqrt{\frac{22}{15}}$$

$$t_g = ۳۳ \text{ min}$$

$$t_{bg} = 60 - t_g = ۲۷ \text{ min}$$

میانگینهای وزنی

غالباً چندین نمونه مختلف از یک محل یا یک مجموعه انتخاب می شود، و در این صورت مقداری که به مجموعه نسبت داده می شود، میانگین چندین نمونه است. به عنوان مثال، چگالی میانگین فعالیت در یک دریاچه یا رودخانه را می توان با استفاده از تعدادی نمونه که از آن گرفته می شود تعیین کرد. ولی این روش از لحاظ آماری فقط در صورتی که تمامی اندازه گیریها با درجه یکسانی از دقت نسبی انجام شده باشند معتبر خواهد بود. اگر دقت اندازه گیریها متفاوت باشد، برای رسیدن به بهترین برآورد از میانگین واقعی، باید به

اندازه‌گیریهای دقیقتر وزن بیشتری نسبت بدهیم. در مثال زیر، روش تعیین میانگین وزنی توضیح داده می‌شود.

مثال ۹.۹

برای تعیین فعالیت يك استخر، ۴ نمونه از آن برداشته شد، و آهنگهای شمارش در کمتر این نمونه‌ها به صورت 95 ± 3 ، 105 ± 10 ، 92 ± 6 و 118 ± 12 به دست آمده است. میانگین و انحراف معیار مربوط به این داده‌ها برابر 103 ± 11.2 است. خطای معیار میانگین از رابطه زیر برابر $6.5 \pm$ به دست می‌آید

$$\sigma_M = \frac{\sigma}{\sqrt{(n-1)}} \quad (45.9)$$

که در آن، σ انحراف معیار توزیع و n تعداد نمونه‌هاست. طبق این محاسبه، بهترین تخمین آهنگ شمارش میانگین برابر 103 ± 6.5 است. اما باید توجه داشت که میزان دقت این اندازه‌گیریهای چهارگانه فوق‌العاده متفاوت است، و از ۳۲٪ برای اولی تا ۱۵۲٪ برای آخری تغییر می‌کند. در محاسبات بالا برای به دست آوردن میانگین اهمیت یکسانی به تمام این مقادیر داده شده است. اما به دلیل اختلاف فوق‌العاده زیاد در دقتها، به مقدار اول باید وزن بیشتری نسبت به مقدار آخر داده شود. این عمل موزون‌سازی به صورت زیر انجام می‌شود:

ضریب وزن را به صورت زیر تعریف می‌کنیم

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (46.9)$$

در این صورت میانگین وزنی از رابطه زیر به دست می‌آید

$$M_w = \frac{\sum w_i M_i}{\sum w_i} \quad (47.9)$$

و خطای معیار میانگین وزنی با رابطه زیر داده می‌شود

$$\sigma_{M_w} = \sqrt{\frac{1}{w_1 + w_2 + \dots + w_n}} \quad (48.9)$$

داده‌های این مثال را در جدول صفحه بعد می‌آوریم:

$M_i \pm \sigma_i$	σ_i^2	$w_i = 1/\sigma_i^2$	$w_i \times M_i$
95 ± 3	9	0.1111	10.556
105 ± 10	100	0.0100	1.055
94 ± 6	36	0.0278	2.611
118 ± 12	144	0.0070	0.882
		$\Sigma w_i = 0.1559$	$\Sigma w_i M_i = 15.104$
		$M_w = \frac{15.104}{0.1559} = 96.85$	
		$\sigma_{Mw} = \sqrt{\frac{1}{0.1559}} = 2.54$	

بنابراین، بهترین برآورد میانگین واقعی برابر 96.85 ± 2.5 است.

مسائل

۱. اگر فعالیت میانگین یک نمونه استاندارد برابر ۱۰۰۰ cpm باشد،
 - (الف) احتمال مشاهده دقیقاً ۴۰۰ شمارش در دقیقه چقدر است؟
 - (ب) احتمال اندازه‌گیری ۳۹۰-۴۱۰ شمارش در دقیقه چقدر است؟
۲. شمارش یک نمونه در ۱۰ دقیقه برابر ۵۶۰، و شمارش زمینه در ۱۵ دقیقه برابر ۳۹۰ است.
 - (الف) انحراف معیار آهنگهای شمارش ناخالص و زمینه چقدر است؟
 - (ب) انحراف معیار آهنگ شمارش خالص چقدر است؟
 - (ج) حدود اطمینان ۹۰٪ و ۹۹٪ در آهنگ شمارش خالص چقدر است؟
۳. آهنگ شمارش زمینه در یک شمارش ۶۰ دقیقه‌ای برابر ۳۰ cpm است. در شمارش ۵ دقیقه‌ای یک نمونه، شمارش ناخالص برابر ۱۷۰ به دست آمده است.
 - (الف) در حد اطمینان ۹۰٪ آیا فعالیتی در نمونه وجود دارد؟
 - (ب) آیا در حد اطمینان ۹۵٪ فعالیتی در نمونه وجود دارد؟
۴. با استفاده از یک نمونه با طول عمر بلند دو اندازه‌گیری برای آزمایش طرز کار یک شمارگر معین انجام شده است. نتیجه آزمون در اندازه‌گیری اول ۱۰۲۱۰ شمارش در ۱۰ دقیقه و در اندازه‌گیری دوم ۴۹۹۵ شمارش در ۵ دقیقه بوده است. آیا طرز کار شمارگر رضایتبخش است؟

۵. در شمارش يك دقیقه‌ای يك فعاليت ناخالص ۳۵ شمارش به دست آمده است. اگر زمینه ۱۵۶۰ شمارش در ۶ دقیقه باشد، برای اینکه آهنگ شمارش در حد اطمینان ۹۵٪ در محدوده ± 10 درصد فعاليت واقعی قرار داشته باشد، نمونه چه مدت زمانی باید شمارش شود؟

۶. آهنگ شمارش میانگین نمونه‌ای که برای مدت ۱۵ دقیقه شمارش شده است برابر ۳۲ cpm، و آهنگ شمارش زمینه در يك شمارش ۱۰ دقیقه‌ای برابر ۱۵ cpm است.

(الف) در حد اطمینان ۹۵٪ آهنگ شمارش خالص چقدر است؟
(ب) خطای محتمل (نسبی) در فاصله ± 1 انحراف معیار از آهنگ شمارش خالص چقدر است؟

۷. آهنگ شمارش ناخالص نمونه‌ای (بر مبنای يك شمارش دو دقیقه‌ای) برابر ۳۵ cpm برآورده شده است. آهنگ شمارش زمینه در يك شمارش ۱ ساعتی برابر ۱۰ cpm است. اگر بخواهیم با حد اطمینان ۹۵٪ آهنگ شمارش خالص در فاصله بین ± 5 درصد آهنگ شمارش خالص واقعی قرار داشته باشد، چه مدت زمانی این نمونه باید شمارش شود؟
۸. (الف) شمارش ناخالص ۱ دقیقه‌ای نمونه‌ای برابر ۱۰۰ و شمارش زمینه در طول ۱ دقیقه برابر ۵۰ است. آهنگ شمارش خالص این نمونه در حد اطمینان ۹۰٪ چقدر است؟

(ب) اگر نمونه و زمینه هر کدام برای ۱۰ دقیقه شمارش شوند و به ترتیب آهنگهای شمارش ۱۰۰ و ۵۰ cpm را به دست بدهند، آهنگ شمارش خالص در حد اطمینان ۹۵٪ چقدر است؟

۹. آهنگ شمارش متوسط يك شمارگر حفاظ‌گذاری شده و با شمارش زمینه کم برابر ۲ cpm است. احتمال آنکه این شمارگر در شمارش ۱ دقیقه‌ای شمارشهای زیر را ثبت کند چقدر است؟

(الف) ۲ شمارش

(ب) ۴ شمارش

(ج) صفر شمارش

۱۰. يك نمونه از آب رودخانه در نزدیکی لوله تخلیه پسماندهای يك آزمایشگاه پرتوزا، و نمونه دیگری در بالای محل تخلیه برداشته شده است. این دو نمونه برای ۱۰ دقیقه شمارش می‌شوند و به ترتیب ۲۲۵ و ۲۱۰ cpm به دست می‌دهند. در حد اطمینان ۹۹٪، آب پایین رودخانه پرتوزاتر است یا آب بالای رودخانه؟

۱۱. آهنگ شمارش میانگین واقعی يك نمونه استاندارد برابر ۵۰ cpm است.

(الف) احتمال مشاهده دقیقاً ۵۰ شمارش در ۱ دقیقه چیست؟

(ب) احتمال مشاهده ۴۷-۴۳ شمارش در ۱ دقیقه چقدر است؟

(ج) احتمال مشاهده بیشتر از ۵۷ شمارش در ۱ دقیقه چقدر است؟

۱۲. يك اتاقك یونش دریچه‌ای به ضخامت 2 mg/cm^2 دارد. هرگاه چشمه ^{210}Po با فعالیت (370 Bq) $1 \mu\text{Ci}$ در فاصله ۱ سانتی‌متری جلوی این دریچه طوری قرار بگیرد که هندسه شمارش شامل ۲۵٪ باشد، جریان یونشی اشباع را حساب کنید.

۱۳. يك اتاقك یونش بادیواره «هوا» و پر از هوا به حجم 100 cm^3 ، هنگامی که در میدان پرتوایکس می‌گیرد، جریان اشباعی به شدت 10^{-12} A تولید می‌کند. اگر دما 27°C و فشار جو 740 mmHg باشد، آهنگ پرتودهی تابش چقدر است؟

۱۴. (الف) چه مقاومتی به‌طور متوالی با اتاقك یونش مسئله ۱۳ قرار بگیرد تا افت ولتاژی برابر 10 mV ایجاد کند؟

(ب) اگر ظرفیت اتاقك $250 \mu\text{F}$ باشد، ثابت زمانی مدار آشکارساز چقدر است؟

(ج) چقدر طول می‌کشد تا این سنج به ۹۹٪ جریان اشباع را اندازه بگیرد؟

۱۵. ظرفیت يك دزسنج جیبی $5 \mu\text{F}$ و حجم حساس آن 1.5 cm^3 است. مقدار ولتاژ باردار کننده چقدر باشد تا این دزسنج بتواند در گستره $(0-515 \mu\text{C/kg})$ $(0-200 \text{ mR})$ به کار رود؟ هنگامی که دزسنج مقدار 200 mR را اندازه می‌گیرد، ولتاژ دوسر آن باید نصف ولتاژ باردار کننده باشد.

۱۶. ظرفیت يك لامپ گایگر $25 \mu\text{F}$ و زمان لازم برای گردآوری تمام یونهای مثبت 10^{-6} s $221 \times$ است. برای اینکه تپهای خروجی تیز باشند، باید ثابت زمانی مدار آشکارساز به $50 \mu\text{s}$ محدود شود.

(الف) مقدار مقاومت متوالی چقدر است؟

(ب) اگر در هر تپ گایگر تعداد 10^8 زوج یون تولید شود، حد بالای تپ ولتاژ خروجی چقدر است؟

۱۷. زمان تفکیک يك شمارگر گایگر $250 \mu\text{s}$ است. اگر آهنگ شمارش 30000 cpm باشد، چه کسری از شمارشها بر اثر زمان مرگ شمارگر ناشمرده می‌ماند؟

۱۸. این واقعیت که تکثیر گازی در شمارگر تناسبی خیلی کمتر از شمارگر گایگر است، به این معنی است که حساسیت ورودی تقویت کننده تپ مورد استفاده در شمارگر تناسبی باید کمتر از حساسیت ورودی تقویت کننده تپ مورد استفاده در شمارگر گایگر باشد. حساسیت ورودی تقویت کننده‌ای را که در يك شمارگر تناسبی گازی بدون دریچه نیمکره به قطر ۲ اینچ به کار می‌رود حساب کنید. ظرفیت شمارگر $20 \mu\text{F}$ است و تقویت گاز در آن به $10^3 \times 5$ بالغ می‌شود. فرض کنید که تپ خروجی در حد نصف ارتفاع بیشینه‌اش «سرچین» می‌شود.

۱۹. مطلوب است حساسیت يك آشکارساز نوترون گرمایی به حجم 50 cm^3 که با گاز $^{10}\text{BF}_3$ 96° درصد غنی شده با فشار کل 70 cmHg پر شده است.

۲۰. اگر لامپ BF_3 مسئله ۱۳ به عنوان اتاقك یونش جریان به کار رود، جریان اشباعی ناشی از شار گرمایی 10^9 نوترون در cm^2/s چقدر است؟

۳۱. چقدر طول می‌کشد که حساسیت آشکارساز BF_3 در مسئله ۱۹ به اندازه ۱۰٪ کاهش یابد؟
۳۲. حساسیت یک اتاقک یون که با فشار 760 mmHg از گاز CH_4 پر شده است، در برابر نوترونهای 1 MeV و 10 MeV (برحسب آمپر نوترون در cm^2/s) چقدر است؟ حجم اتاقک 500 cm^3 است.
۳۳. یک چشمه ${}^{60}\text{Co}$ با فعالیت 1000 MBq (27 mCi) ناپدید شده است. یک وسیله بررسی که حساسیت آن در برابر تابش بالاتر از زمینه برابر 0.05 mR/h ($0.13 \mu\text{C/kg}$) در ساعت است، در چه فاصله‌ای از این چشمه می‌تواند آن را آشکارسازی کند؟
۳۴. شار نوترون گرمایی ناشی از یک چشمه استاندارد نوترون کند ${}^{252}\text{Cf}$ ، با تابش دهی به یک برگه طلا به قطر ۱ سانتی‌متر و به ضخامت 0.13 cm به مدت ۷ روز و در فاصله 100 cm از این چشمه، تعیین می‌شود. برگه طلا بلافاصله پس از پایان دوره پرتوگیری، اندازه‌گیری می‌شود و فعالیت آن برابر 100 Bq (2.7 nCi) به دست می‌آید. شار گرمایی در نقطه‌ای که برگه تابش می‌گیرد چقدر است؟ سطح مقطع فعالسازی طلا برابر 985 barn است.
۳۵. یک شمارگر نوترون گرمایی به قطر ۱ سانتی‌متر و طول ۱۰ سانتی‌متر با گاز BF_3 در فشار جو و دمای 20°C پر شده است. هنگامی که شمارگر در شار نوترون گرمایی 1000 ($E_{\text{mp}} = 0.025 \text{ eV}$) نوترون بر سانتی‌متر مربع در ثانیه قرار می‌گیرد، آهنگ شمارش آن چقدر است؟

حفاظت در برابر تابش خارجی

اصول پایه

عمل حفاظت در برابر تابش جنبه خاصی از کنترل خطرات بهداشت محیط است که با استفاده از امکانات فنی انجام می شود. در محیط صنعتی، معمولاً سعی می شود که کانون خطر را به کلی از میان بردارند، همان طور که ابتدا به جای بنزن از کربن تتراکلرید و سپس به جای کربن تتراکلرید از تری کلرو اتیلن به عنوان حلال در روغن-زدایی از قطعات ماشینی استفاده کردند. اگر حذف کانون خطر عملی نباشد، سعی می کنند آن را محصور کنند و بدین ترتیب از آسیب رسانی آن به انسانها جلوگیری می شود. اگر هیچیک از این دو راه حل عملی نبود، آن وقت انسانها را منزوی می کنند و آنها را از خطر دور نگه می دارند. چگونگی کاربرد دقیق این اصول کلی، در مورد حفاظت در برابر تابش، به تکتک موارد حفاظتی بستگی پیدا می کند. در کار حفاظت در برابر تابش، آسانترین است که مسئله را به دو بخش تقسیم کنیم: حفاظت در برابر تابش خارجی؛ و حفاظت در برابر آلودگی شخصی ناشی از ورود ماده پرتوزا به داخل بدن همراه با تنفس، غذا، و یا در اثر تماس.

فنون حفاظت در برابر تابش خارجی

تابش خارجی عبارت است از تابشی که از ماشینهای پرتو x و دیگر دستگاههایی که مشخصاً

برای تولید تابش طراحی شده‌اند، یا از دستگاه‌هایی مانند میکروسکوپ الکترونی که تولید پرتو x از اثرات جانبی آنهاست، و همچنین از ایزوتوپهای پرتوزا سرچشمه می‌گیرد. اگر خنثی‌سازی و از بین بردن چشمه تابش عملی نباشد، آنگاه با به کار بردن همزمان یکی دو روش از فنون سه‌گانه زیر می‌توان پرتوگیری افراد را در برابر تابش خارجی تحت کنترل درآورد:

۱. به حداقل رساندن زمان پرتوگیری،
۲. به حداکثر رساندن فاصله از چشمه تابش،
۳. حفاظ‌گذاری پیرامون چشمه تابش.

زمان

اگرچه بسیاری از اثرات زیست‌شناختی تابش به آهنگ دز بستگی دارد، ولی در موارد مربوط به کنترل محیط می‌توان رابطه متقابل زیر را معتبر دانست

$$\text{دز کل} = \text{زمان پرتوگیری} \times \text{آهنگ دز}$$

برای مقادیری از دز کل که بزرگی آنها از مرتبه مقدار RPG یا دو برابر آن است، هیچگونه اطلاعات آزمایشگاهی یا کلینیکی که این فرض را نقض کند وجود ندارد. بنا بر این، اگر لازم باشد که در میدان تابش نسبتاً شدید کار کنیم، مانند وقتی که یک سیکلوترون پرتوزا شده در اثر جذب نوترون را تعمیر، و یا وقتی که یک چشمه پرتو نگاری را دستکاری می‌کنیم، با محدود کردن زمان پرتوگیری می‌توان کار مورد نظر را طبق موازین ایمنی تابش انجام داد، به طوری که حاصل ضرب آهنگ دز در زمان پرتوگیری از مقدار دز مجاز بیشینه تجاوز نکند. برای مثال، در مورد شخصی که حرفه‌اش پرتو نگاری است و باید ۵ روز در هفته در میدان تابش 25 mSv/h (25 mrem/h) کار کند، با محدود کردن کار روزانه این شخص به ۴۸ min می‌توان از پرتوگیری بیش از حد مجاز جلوگیری کرد. در این صورت، کل دز روزانه او فقط در حدود 20 mSv (20 mrem) خواهد شد. اگر حجم کار مستلزم پرتوگیری طولانی‌تر باشد، یا باید یک پرتو نگار دیگر استخدام کرد یا اینکه با تغییر طرح عملیات باید شدت میدان تابش را کاهش داد.

فاصله

بدیهی است که با افزایش فاصله از یک چشمه تابش، میزان پرتوگیری تابشی کاهش می‌یابد. این نکته، هنگامی که به صورت کمی بیان شود، به ابزار نیرومندی در خدمت ایمنی تابش مبدل می‌شود. در زیر، چشمه تابشی را به سه شکل نقطه‌ای، خطی، و صفحه‌ای در نظر می‌گیریم و میزان دز حاصل از آنها را بر حسب فاصله محاسبه می‌کنیم.

برای یک چشمه نقطه‌ای، تغییرات آهنگ دز بر حسب فاصله به صورت ساده قانون

عکس مجذور، معادله (۲۰.۹)، داده می‌شود. به عنوان نمونه، قدرت چشمه کبالت ۶۰ که در هر فروپاشی یک فوتون 1.17 MeV و یک فوتون 1.31 MeV از خود گسیل می‌کند، تقریباً از معادله (۱۷.۶) به دست می‌آید

$$\begin{aligned}\Gamma &= 3.76 \times 10^{-9} \sum f_i E_i \frac{(\text{C/kg})\text{m}^2}{\text{MBq}\cdot\text{h}} \\ &= 3.76 \times 10^{-9} (1 \times 1.17 + 1 \times 1.31) \\ &= 9 \times 10^{-9} \frac{(\text{C/kg})\text{m}^2}{\text{MBq}\cdot\text{h}} \left(1.3 \frac{\text{R}\cdot\text{m}^2}{\text{Ci}\cdot\text{h}} \right)\end{aligned}$$

برای یک چشمه 37 MBq (100 mCi)، آهنگ پرتودهی در فاصله ۱ متری در حدود 130 mR/h ($335 \mu\text{C/kg}\cdot\text{h}$) است. اگر پرتونگاری بخواهد هر روزه ۱ ساعت با این چشمه کار کند، آهنگ دزبیشینه‌اش نباید از 20 mrem/h (2 mSv/h) تجاوز کند. این محدودیت را با استفاده از ابزار کار تماس از دور که طول آن طبق محاسبه قانون عکس مجذور، معادله (۲۰.۹)، دستکم 2.5 m است می‌توان مراعات کرد.

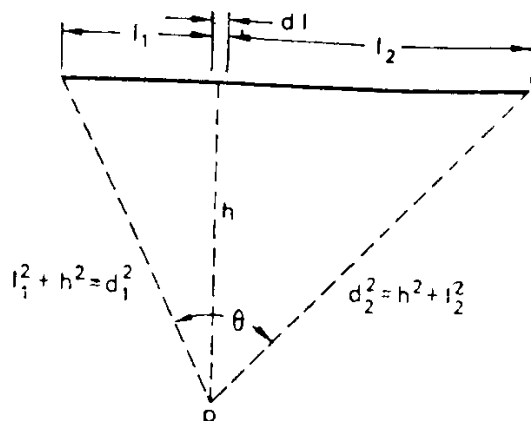
اگر بخواهیم عمل پرتونگاری را در یک انتهای اتاق که به این کار اختصاص دارد انجام دهیم، یا باید مانعی نرده‌ای در مقابل چشمه قرار دهیم که در خارج از آن آهنگ دز از بیشینه آهنگ مجاز هفتگی تجاوز نکند، یا اگر این کار به علت محدودیت فضا امکان نداشته باشد باید حفاظی در برابر آن قرار دهیم. در صورتی که از مانع نرده‌ای استفاده شود، فاصله آن تا چشمه باید چنان باشد که آهنگ دز از مقدار زیر بیشتر نشود

$$\frac{1 \text{ mSv/w}}{40 \text{ h/w}} = 0.025 \text{ mSv/h} (2.5 \text{ mrem/h})$$

با استفاده از قانون عکس مجذور، این فاصله برابر 2.2 m به دست می‌آید. در مورد یک چشمه تابش خطی، مانند لوله حامل پسماند مایعی آلوده، محاسبه تغییرات آهنگ دز بر حسب فاصله از لحاظ ریاضی پیچیدگی بیشتری دارد. اگر تراکم خطی فعالیت چشمه گاما گسیلی به قدرت Γ برابر با C_i مگابکرل یا میلی کوری در واحد طول باشد، آهنگ دز در نقطه p که به فاصله h از طول بی نهایت کوچک dl قرار دارد (شکل ۱۰.۱۰)، عبارت است از

$$dD_p = \frac{\Gamma \times C_i \times dl}{l^2 + h^2} \quad (10.10)$$

و آهنگ دز ناشی از فعالیت کل طول لوله چنین می‌شود

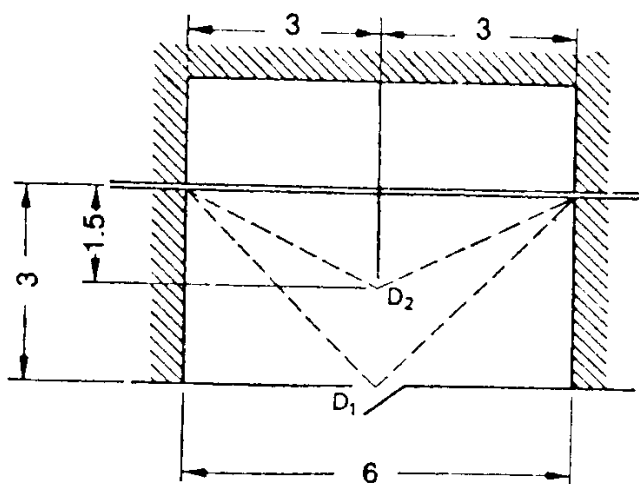


شکل ۱۰۱۵ نمایش هندسی يك چشمه خطی، با فعالیت C_i میلی کوری در واحد طول، برای محاسبه آهنگ دزگاما در يك نقطه به فاصله b از چشمه.

$$\begin{aligned} D_p &= \Gamma C_l \int_0^{l_1} \frac{dl}{l^2 + h^2} + \Gamma C_l \int_0^{l_2} \frac{dl}{l^2 + h^2} \\ &= \frac{\Gamma C_l}{h} \left(\tan^{-1} \frac{l_1}{h} + \tan^{-1} \frac{l_2}{h} \right) \\ &= \frac{\Gamma \times C_l \times \theta}{h} \quad (2.10) \end{aligned}$$

مثال ۱۰۱۵

يك جریان آب خنك كنده كه از لولهٔ بساريكي مي گذرد، داراي فعاليت پرتوزايي ^{24}Na است و در اتاقی به پهنای 6 m در معرض دید قرار می گیرد. درب اتاق در وسط دیوار 6 m تری و در فاصله 3 m از لوله قرار دارد (شکل ۲.۱۰). در صورتی که تراکم خطی فعاليت برابر 100 MBq/m باشد،



شکل ۲.۱۰ طرح اتاق مربوط به مثال ۱.۱۰.

(الف) آهنگ دز معادل را در محل درب اتاق ($\dot{H}_1$) پیدا کنید.
حل: برای ^{24}Na ، طبق جدول ۳.۶، در فاصله ۱ متری داریم

$$\Gamma = 1.28 \times 10^{-8} \text{ X/h} \cdot \text{MBq}$$

آهنگ پرتو دهی در فاصله ۳ m از لوله، عبارت است از

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= \frac{2\Gamma C_l}{h} \tan^{-1} \frac{l}{h} \\ &= \frac{2 \times 1.28 \times 10^{-8} \times 100}{3} \tan^{-1} \frac{3}{3} \\ &= 8.53 \times 10^{-7} \times \frac{\pi}{4} = 6.7 \times 10^{-7} \text{ X/h} \end{aligned}$$

هر واحد X پرتو دهی به دز ۳۴ گری در هوا منجر می شود. چون ضریب کیفیت پرتو گاما برابر یک است، به ازای هر گری یک سیورت خواهیم داشت. بنابراین، آهنگ دز معادل در محل درب اتاق چنین است

$$\begin{aligned} \dot{H}_1 &= 6.7 \times 10^{-7} \text{ X/h} \times 34 \text{ Gy/X} \times 1 \text{ Sv/Gy} \\ &= 0.023 \times 10^{-2} \text{ Sv/h} \\ &= 0.023 \text{ mSv/h} (2.3 \text{ mrem/h}) \end{aligned}$$

(ب) آهنگ دز معادل در نقطه D_2 یا نقطه وسط فاصله بین درب و لوله، که به فاصله ۱.۵ m از لوله قرار دارد، چقدر است؟
نسبت بین دو آهنگ دز معادل، $\dot{H}_1$ در فاصله ۱.۵ m و $\dot{H}_2$ در فاصله ۳ m از لوله، عبارت است از

$$\begin{aligned} \frac{\dot{H}_1}{\dot{H}_2} &= \frac{2\Gamma C_l/h_1 \times \theta_1}{2\Gamma C_l/h_2 \times \theta_2} \\ \frac{\dot{H}_1}{\dot{H}_2} &= \frac{h_2}{h_1} \times \frac{\theta_1}{\theta_2} \quad (3.10) \end{aligned}$$

در این مثال، داریم

$$\theta_2 = 2 \tan^{-1} \frac{3}{1.5} = 1.107 \text{ rad} \quad \text{و} \quad \theta_1 = 2 \tan^{-1} \frac{3}{3} = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$$

پس از قرار دادن مقادیر معلوم در معادله (۳.۱۰)، حاصل می شود

$$\frac{0.023}{\dot{H}_\gamma} = \frac{1.5}{3} \times \frac{\pi/2}{1.4\pi}$$

$$\dot{H}_\gamma = 0.128 \text{ mSv/h} (12.8 \text{ mrem/h})$$

متخصصان فیزیک بهداشت در بسیاری از موارد به این نتیجه می‌رسند که داشتن یک رابطه کمی میان آهنگ دز و فاصله از یک چشمه تابش صفحه‌ای بسیار مفید است. فرض می‌کنیم که چشمه‌ای نازک به شعاع r متر و تراکم سطحی C_a مگا بکرل بر متر مربع از یک گسیلنده گاما که قدرت آن در فاصله ۱ متری $\Gamma X/h \cdot \text{MBq}$ است، در اختیار داشته باشیم (شکل ۳.۱۵). در این صورت، چون پرتو دهی X ۱ متناظر با 34 Gy دز در هواست و همچنین چون در مورد تابش گاما داریم $QF = 1$ ، آهنگ دز معادل در نقطه p که روی محور مرکزی صفحه چشمه و به فاصله h از صفحه قرار دارد، عبارت است از

$$\dot{H} = \int_0^R \frac{\Gamma \frac{X \cdot m^2}{\text{MBq} \cdot h} \times 34 \text{ Gy/X} \times 1 \text{ Sv/Gy} \times C_a \text{ MBq/m}^2 \times 2\pi r \, dr}{r^2 + h^2}$$

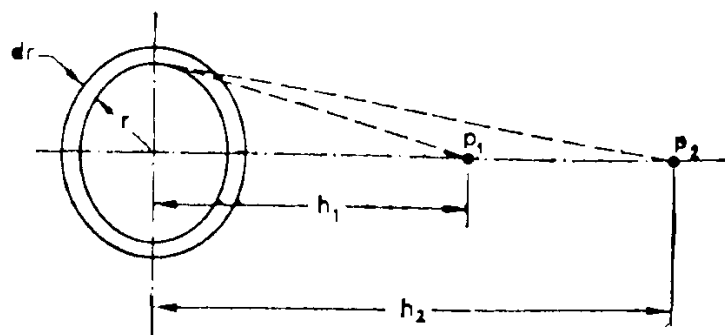
$$= 34\pi \times \Gamma \times C_a \times \ln \frac{R^2 + h^2}{h^2} \text{ Sv/h} \quad (4.10)$$

چنانچه فعالیت بر حسب کوری و Γ در ۱ متری بر حسب رونتگن بر کوری در ساعت داده شود، چون پرتو دهی R ۱ متناظر با دز معادل 1 rem است، آهنگ دز معادل چنین می‌شود

$$\dot{H} = \pi \times \Gamma \frac{R \cdot m^2}{\text{Ci} \cdot h} \times C_a \text{ Ci/m}^2 \times \ln \frac{R^2 + h^2}{h^2} \quad (5.10)$$

نسبت آهنگ دز معادل در فاصله h_1 به آهنگ دز معادل در هر فاصله دیگر، h_2 ، چنین خواهد شد

$$\frac{\dot{H}_1}{\dot{H}_2} = \frac{\ln[(R^2 + h_1^2)/h_1^2]}{\ln[(R^2 + h_2^2)/h_2^2]} \quad (6.10)$$



شکل ۳.۱۵ نمایش هندسی یک چشمه صفحه‌ای برای محاسبه تغییرات آهنگ دز بر حسب فاصله از چشمه.

مثال ۲.۱۰

مقدار ۵۰ MBq از محلول $^{24}\text{NaCl}$ روی سطح قرصی به قطر ۵۰ cm پخش شده است. آهنگ دز معادل پرتوهای گاما در نقاطی به ارتفاع (الف) ۳۰ cm، (ب) ۱ m از صفحه چقدر است؟

حل: (الف) با توجه به جدول ۳.۶، ثابت گسیل ویژه پرتو گاما برای ^{24}Na در ۱ متری چشمه عبارت است از $X/MBq \cdot h = 1.28 \times 10^{-4}$. تراکم سطحی در این مسئله عبارت است از $C_a = 50 \text{ MBq} / \pi (0.25 \text{ m})^2 = 25465 \text{ MBq/m}^2$. پس از قرار دادن مقادیر معلوم در معادله (۴.۱۰)، حاصل می شود

$$\dot{H} = 34\pi \times 1.28 \times 10^{-4} \times 25465 \times \ln \frac{0.25^2 + 0.32^2}{0.32^2}$$

$$= 1.84 \times 10^{-4} \text{ Sv/h}$$

$$= 0.184 \text{ mSv/h} (18.4 \text{ mrem/h})$$

(ب) همچنین با قرار دادن مقادیر معلوم در معادله (۴.۱۰)، به دست خواهد آمد

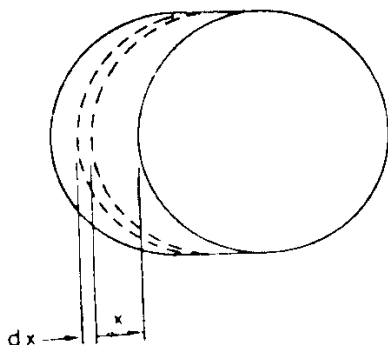
$$\frac{0.184}{\dot{H}_2} = \frac{\ln[(0.25^2 + 0.32^2)/0.32^2]}{\ln[(0.25^2 + 1^2)/1^2]}$$

$$\dot{H}_2 = 0.021 \text{ mSv/h} (2.1 \text{ mrem/h})$$

آهنگ پرتو دهی يك چشمه ضخیم، که شامل توزیع یکنواختی از ایزوتوپ گسیلنده گاماست، با استفاده از فعالیت سطحی مؤثر و پس از در نظر گرفتن جذب در خود چشمه، قابل تخمین است. تیغه بزرگی به ضخامت t m و با فعالیت یکنواخت $C_v \text{ MBq/m}^3$ را مطابق شکل ۴.۱۰ در نظر می گیریم. ضرب چذاب خطی تیغه μ است. فعالیت ناشی از پرتو زایی لایه dx که در عمق x قرار دارد، در سطح تیغه عبارت است از

$$d(C_a) = C_v \cdot dx \cdot e^{-\mu x} \quad (7.10)$$

با انتگرال گرفتن از این معادله در کل ضخامت تیغه t ، فعالیت سطحی مؤثر چنین می شود



شکل ۴.۱۰ نمایش هندسی شرایط فیزیکی در محاسبه معادله (۷.۱۰).

$$C_a = \int_0^t C_v e^{-\mu x} dx = \frac{C_v}{\mu} (1 - e^{-\mu t}) \quad (۸.۱۰)$$

پس از قرار دادن معادله (۸.۱۰) در معادله (۴.۱۰)، حاصل می شود

$$\dot{H} = 34 \pi \Gamma \frac{C_v}{\mu} (1 - e^{-\mu t}) \ln \frac{R^2 + h^2}{h^2} Sv/h \quad (۹.۱۰)$$

هنگامی که فعالیت بر حسب کوری و Γ در ۱ متری بر حسب رونتگن بر کوری در ساعت بیان شود، معادله بالا به صورت زیر درمی آید

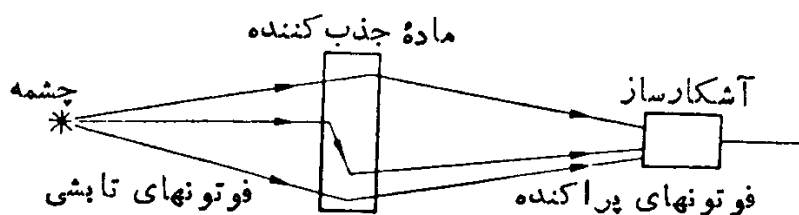
$$\dot{H} = \pi \Gamma \frac{C_v}{\mu} (1 - e^{-\mu t}) \ln \frac{R^2 + h^2}{h^2} \text{rem/h} \quad (۱۰.۱۰)$$

حفاظ گذاری

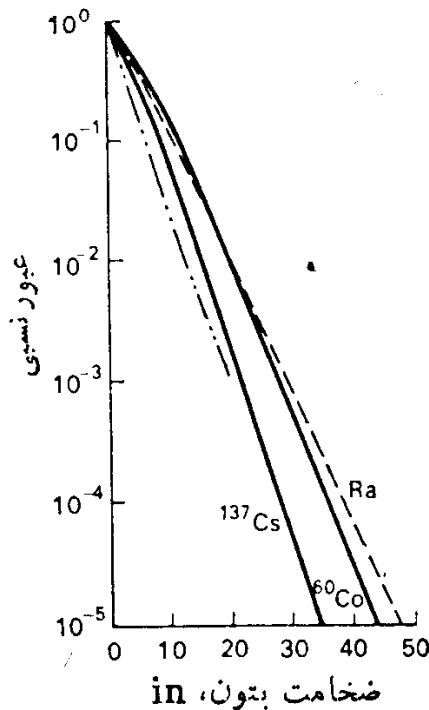
در فصل ۵ دیدیم که در شرایط هندسی خوب، تضعیف باریکه ای از پرتوهای گاما را می توان از معادله زیر به دست آورد

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad [۱۹.۵]$$

اما در شرایط هندسی بد، یعنی در حالتی که با باریکه ای گسترده و یا با جذب کننده ای خیلی ضخیم کار می کنیم، معادله (۱۹.۵) ضخامت حفاظ را کمتر از مقدار لازم برآورد می کند. زیرا در محاسبه این معادله فرض شده است که هر فوتونی که با حفاظ برهم کنش کند از باریکه خارج خواهد شد، و در نتیجه به آشکارساز نمی رسد تا شمارش شود. در شرایط هندسی بد (شکل ۵.۱۰)، دیگر چنین فرضی معتبر نیست. در این حالت، ممکن است تعداد قابل توجهی از فوتونها پس از پراکندگی به آشکارساز برسند. به عبارت دیگر، ممکن است فوتونهایی که در اثر پراکندگی از باریکه خارج شده بودند، در برخورد دوم و پراکندگی مجدد به درون باریکه باز گردند و به آشکارساز برسند. این اثر را می توان به کمک نمودارهای تضعیف شکل ۶.۱۰، برای باریکه نازک و باریکه پهن حاصل از چشمه ^{60}Co در حفاظ بتون، به روشنی نشان داد. شکل ۶.۱۰ نشان می دهد که در شرایط هندسی خوب، برای اینکه ۱۰٪



شکل ۵.۱۰ جذب گاما در شرایط «هندسی بد» که تأثیر فوتونهای پراکنده را بر آشکارساز نشان می دهد.

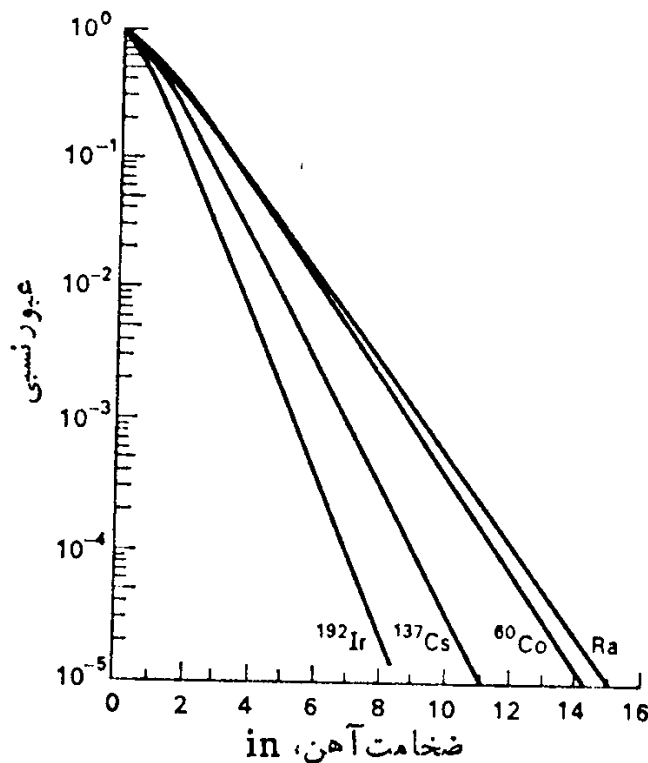


شکل ۶۰۱۰ عبور نسبی پرتوهای گامای حاصل از ^{137}Cs ، ^{60}Co و Ra (در حال تعادل یا محصولات واپاشی) از بتون. منحنی خط - نقطه عبور پرتوهای ^{60}Co را در شرایط هندسی خوب نشان می‌دهد. منحنیهای دیگر به عبور باریکه‌های پهن مربوط می‌شوند.

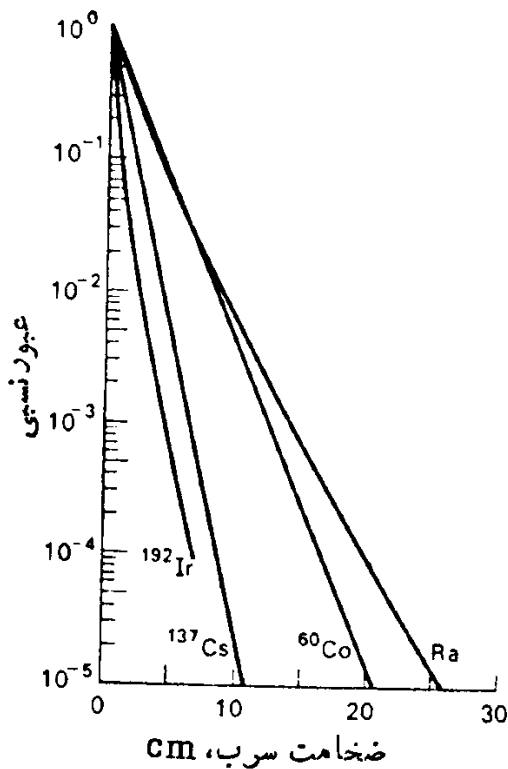
زیر پرتوهای گامای تابشی عبور داده شود، ضخامت حفاظ بتونی باید در حدود 7 in باشد. اما از سوی دیگر، اگر باریکه پهن باشد، چنین ضخامتی حدود ۲۵٪ از پرتوهای تابشی را از خود عبور خواهد داد. برای اینکه فقط ۱۰٪ از پرتوهای باریکه پهن عبور داده شود، لازم است که ضخامت بتون به حدود 11 in برسد. هنگام طراحی حفاظ برای یک باریکه پهن تابشی، در صورت در دسترس داشتن اطلاعات تجربی، باید از این گونه اطلاعات در طرح حفاظ‌گذاری استفاده کرد. منحنیهای تضعیف برای باریکه‌های پهن ناشی از چشمه‌های رادیوم، ^{60}Co و ^{137}Cs در حفاظهای بتونی، آهنی، و سربی را در شکل‌های ۶۰۱۰، ۷۰۱۰ و ۸۰۱۰ نشان داده‌ایم. هنگامی که اطلاعات تجربی مربوط به باریکه‌های پهن در دسترس نباشد، ضخامت حفاظ در شرایط هندسی بد را می‌توان با تعدیل معادله (۱۹۰۵)، از طریق استفاده از ضریب تولید و انباشت B ، بر آورد کرد

$$I = B \times I_0 e^{-\mu x} \quad (11.10)$$

ضریب تولید و انباشت را که همواره بزرگتر از ۱ است، می‌توان به صورت نسبت شدت مجموع پرتوهای اولیه و پراکنده در هر نقطه از باریکه به شدت پرتوهای اولیه در همان نقطه، تعریف کرد. ضریب تولید و انباشت را هم در مورد شار تابشی و هم در مورد دز تابشی می‌شود به کار برد. ضرایب تولید و انباشت را برای انرژیهای مختلف پرتوگاما و برای اجسام مختلف جذب کننده محاسبه کرده‌اند. برخی از این مقادیر در شکل‌های ۹۰۱۰ و ۱۰۰۱۰ نموده شده‌اند.

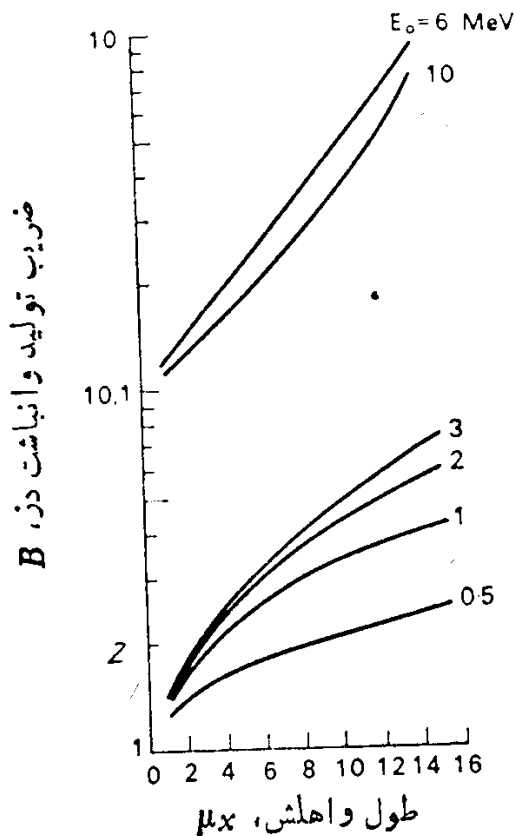


شکل ۷۰۱۵ تضعیف باریکه‌های پهن پرتوهای گامای ناشی از ^{192}Ir ، ^{137}Cs ، ^{60}Co و رادیم در حفاظ آهنی.

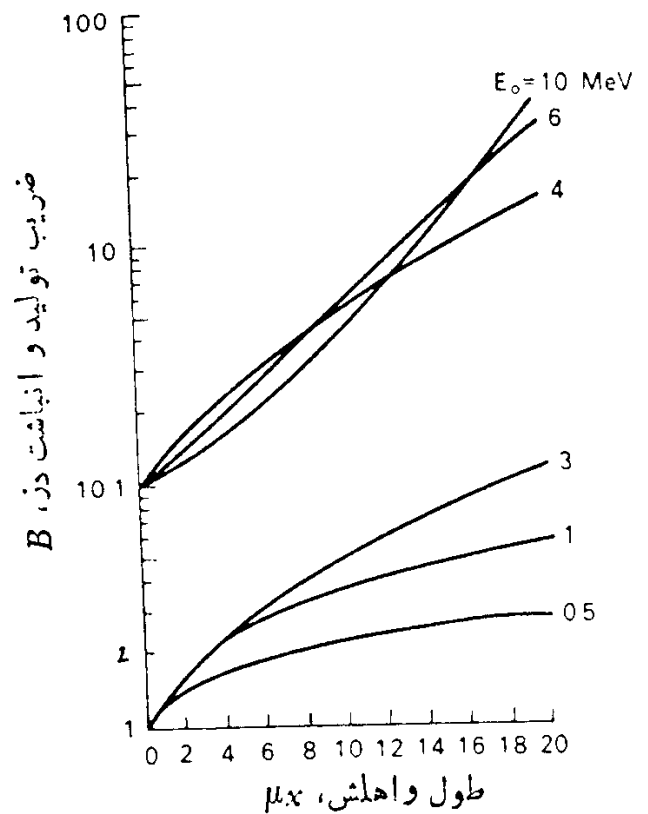


شکل ۸۰۱۵ تضعیف باریکه‌های پهن پرتوهای گامای ناشی از ^{192}Ir ، ^{137}Cs ، ^{60}Co و رادیم در حفاظ سربی.

در این منحنیها، ضخامت حفاظ بر حسب طول واهلش مشخص شده است. یکای طول واهلش برابر با ضخامتی از حفاظ است که شدت يك باریکه نازك را به $1/e$ شدت اولیه اش کاهش می‌دهد. بنابراین، مقدار عددی یکای طول واهلش برابر با عکس ضریب



شکل ۱۰.۱۰ ضریب تولید و انباشت دز
در سرب برای یک چشمه صفحه‌ای تکر استای
پرتو گاما با انرژی E_0 .



شکل ۹.۱۰ ضریب تولید و انباشت دز
در سرب برای یک چشمه نقطه‌ای همسانگرد
پرتو گاما با انرژی E_0 .

جذب می‌شود. کاربرد ضریب تولید و انباشت را، در تعیین ضخامت حفاظ، با مثالهای زیر نشان داده‌ایم.

مثال ۳.۱۰

می‌خواهیم که چشمه‌ای از ^{137}Cs با فعالیت $(1 \text{ Ci}) = 3.7 \times 10^{10} \text{ MBq}$ را، هنگامی که مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، در یک محفظه سربی کروی انبار کنیم. ضخامت سرب چقدر باید باشد تا آهنگ دز معادل در فاصله ۱ متری چشمه از $(25 \text{ mrem/h}) = 25 \mu\text{Sv/h}$ تجاوز نکند؟ فرض کنید که چشمه آنقدر کوچک است که می‌توان آن را «نقطه» در نظر گرفت.

حل: جدول ۳.۶ گسیل ویژه پرتوگامای حاصل از ^{137}Cs را در ۱ متری برابر $(0.33 \text{ R}\cdot\text{m}^2/\text{Ci}\cdot\text{h}) = 2.3 \times 10^{-9} \text{ X}\cdot\text{m}^2/\text{MBq}\cdot\text{h}$ به دست می‌دهد. بنابراین، آهنگ پرتودهی چشمه بدون حفاظ در ۱ متری عبارت است از

$$\dot{X} = 3.7 \times 10^{10} \text{ MBq} \times 2.3 \times 10^{-9} \frac{\text{X}\cdot\text{m}^2}{\text{MBq}\cdot\text{h}} / (1 \text{ m})^2$$

$$= 8.5 \times 10^{-5} \text{ X/h} (0.33 \text{ R/h})$$

چون در امور مربوط به حفاظت در برابر تابش، پرتو دهی X را به صورت دز معادل 34 Sv در نظر می گیرند، مقدار $8.5 \times 10^{-5} X/h$ متناظر با $2.89 \times 10^{-3} \text{ Sv/h}$ یا $2890 \mu\text{Sv/h}$ خواهد شد. اگر تولید و انباشت در نظر گرفته نشود، ضخامت لازم برای سرب از معادله (۱۹.۵) و با استفاده از ضریب تضعیف پرتوهای گامای 1.661 MeV در سرب (بنا بر جدول ۲.۵ داریم $\mu = 1.24 \text{ cm}^{-1}$) به دست می آید

$$I = I_0 \times e^{-\mu t}$$

$$25 = 2890 \times e^{-1.24 t}$$

$$t = 3.84 \text{ cm}$$

در اینجا چون افزایش ضخامت ناشی از تولید و انباشت را در نظر نگرفته ایم، ضخامت حفاظ کمتر از حد لازم برآورد شده است.

در شکل های ۹.۱۵ و ۱۰.۱۵ ملاحظه می شود که ضریب تولید و انباشت به ضخامت حفاظ بستگی دارد. چون ضخامت حفاظ را هنوز نمی دانیم، معادله (۱۱.۱۵) دو مجهول دارد که یکی ضریب تولید و انباشت B و دیگری ضخامت حفاظ t است. در تعیین ضخامت مناسب برای حفاظ، ضخامتی را برآورد می کنیم، و آنگاه مقدار برآورد شده را در معادله (۱۱.۱۵) می گذاریم تا معلوم شود که این مقدار آهنگ دز را به میزان لازم کاهش خواهد داد یا نه. حداقل ضخامت حفاظ را با فرض تضعیف باریکه نازک حساب می کنیم و آنگاه ضخامتی معادل یک نیم - لایه (1 HVL)، به خاطر تولید و انباشت، بدان می افزاییم. ضخامت نیم - لایه سرب برای پرتوهای گامای 1.661 MeV چنین می شود

$$\text{HVL} = \frac{0.693}{1.24} \text{ cm}^{-1} = 0.56 \text{ cm}$$

بنابراین، ضخامت برآورد شده حفاظ عبارت است از $3.84 + 0.56 = 4.4 \text{ cm}$ که معادل 4.4×1.24 یا ۵.۵ برابر طول واهلش است. ضریب تولید و انباشت دز را با استفاده از درونیابی شکل ۹.۱۵، برای پرتوهای گامای 1.661 MeV و برای حفاظی سربی با این ضخامت، برابر ۲.۱۲ به دست می آوریم. پس از قراردادن این مقادیر B و t در معادله (۹.۱۵)، حاصل می شود

$$I = 2890 \times 2.12 \times e^{-1.24 \times 4.4}$$

$$= 25.2 \mu\text{Sv/h} \quad (2.52 \text{ mrem/h})$$

این کاهش آهنگ دز پرتو گاما که در این محاسبه به دست می آید، درست در همان حدود مقدار مطلوب 2.5 mR/h است. بنابراین، با این مقدار 4.4 cm که در بالا حساب شد،

می توان حدود ضخامت حفاظ را بدرستی برآورد کرد. در این مثال، با استفاده از روش آزمون و خطا، مقدار درست ضخامت را پس از یکبار آزمایش به دست آوردیم. اگر در این محاسبه، با توجه به ضخامت برآورد شده حفاظ، آهنگ دزتابش نزدیک به مقدار مورد نظر به دست نمی آمد، باید از طریق آزمون و خطا آنقدر به برآورد ضخامت ادامه می دادیم تا ضخامتی که آهنگ دز را به میزان مطلوب کاهش می دهد حاصل می شد.

مثال ۴.۱۰

یک محفظه انبارنده سربی کروی شکل طراحی کنید که بتواند آهنگ پرتودهی ناشی از ۱ کوری ^{24}Na را، در ۱ متری چشمه، به 10 mR/h کاهش دهد.
حل: در فروپاشی هراتم ^{24}Na ، دو پرتو گاما به طور پیاپی گسیل می شوند: یکی با انرژی 2039 keV و دیگری با انرژی 1368 keV . آهنگ دز ناشی از هر یک از این فوتونها، در فاصله ۱ متری، عبارت است از

$$\Gamma_{2039} = 0.48 \times 2039 = 979 \text{ R} \cdot \text{m/Ci} \cdot \text{h}$$

و

$$\Gamma_{1368} = 0.48 \times 1368 = 657 \text{ R} \cdot \text{m/Ci} \cdot \text{h}$$

در شرایط هندسی خوب، برای کاهش آهنگ پرتودهی فوتونهای انرژی بالاتر به میزان 10 mR/h ، با استفاده از ضریب تضعیف کل 0.475 cm^{-1} ، خواهیم داشت

$$I/I_0 = 10/979 = e^{-0.475x}$$

$$x = 10.25 \text{ cm}$$

مقدار نیم - لایه سرب برای فوتونهای با این انرژی عبارت است از 1.46 cm . حال به اندازه نصف یک HVL یا 0.73 cm به ضخامت محاسبه شده در بالایی افزایش می دهیم، و آنگاه تضعیف پرتو گامای 2039 keV را حساب می کنیم

$$I = 979 \times e^{-0.475 \times 10.98}$$

$$= 714 \text{ mR/h}$$

تضعیف پرتوهای گامای 1368 keV ، با همان ضخامت از سرب، چنین می شود

$$I = 657 \times e^{-0.475 \times 10.98}$$

$$= 572 \text{ mR/h}$$

و آهننگ پرتو دهی کل در فاصله ۱ متری از چشمه، از جمع آهننگهای پرتو دهی ناشی از دو نوع فوتون به دست می آید که عبارت است از 0.786 mR/h . محاسبه بالا بر پایه شرایط هندسی خوب به عمل آمد. اکنون تولید و انباشت در حفاظ را نیز در نظر می گیریم. در اینجا، فقط فوتونهای با انرژی بالاتر را در نظر می گیریم و نصف نیمه - لایه دیگر ($1/2 \text{ HVL}$) را به ضخامت حفاظ اضافه می کنیم، که در این صورت ضخامت می شود 0.1171 cm . چون طول واهلش برای گاما های 2.75 MeV در سرب برابر 2.1 cm است، ضخامت حفاظ مورد نظر معادل 5.6 برابر طول واهلش می شود. با توجه به شکل ۹.۱۰، ضریب تولید و انباشت در حدود 3.13 به دست می آید. بدین ترتیب، تضعیف این حفاظ، طبق معادله (۱۱.۱۰)، چنین می شود

$$I = 1320 \times 3.13 \times e^{-0.475 \times 1.171} \\ = 15.3 \text{ mR/h}$$

این آهننگ پرتو دهی بیش از حد مجاز است، و از این رو باید بر ضخامت حفاظ افزوده شود. چنانچه به اندازه يك HVL دیگر بر حفاظ بیفزاییم، ضخامت 13.17 cm یا 6.27 برابر طول واهلش می شود. ضریب تولید و انباشت با این ضخامت برابر 3.42 ، و آهننگ پرتو دهی فوتونهای با انرژی بالاتر برابر 8.5 mR/h خواهد شد. برای فوتونهای با انرژی پایینتر که طول واهلش آنها در سرب برابر 1.61 cm است، ضخامت حفاظ معادل 8.18 طول واهلش، و ضریب تولید و انباشت دز برابر 3.61 می شود. پس از قراردادن این مقادیر در معادله (۱۱.۱۰)، آهننگ پرتو دهی فوتونهای 2.75 MeV برابر 0.7 mR/h خواهد شد. بنابراین، آهننگ پرتو دهی کل، در فاصله ۱ متری چشمه حفاظ گذاری شده ^{24}Na ، برابر 9.2 mR/h به دست می آید. چون در بسیاری از موارد عملی می توان این مقدار را معادل مقدار مجاز 10 mR/h در نظر گرفت، ضخامت لازم برای حفاظ مساوی 13.17 cm می شود. از آنجا که این حفاظ را در هر جایی از فاصله بین چشمه و محل پرتو گیری دز تضعیف شده می توان قرارداد، و از آنجا که حجم سرب مصرف شده، در ساختن کوره ای تو خالی با دیواره ای به ضخامت معین، با افزایش شعاع کوره به صورت زیر افزایش می یابد

$$\text{حجم دیواره کوره} = \frac{4}{3} \pi (r_o^3 - r_i^3)$$

شعاع داخلی کوره (r_i) را، با توجه به فضای لازم برای ابعاد فیزیکی چشمه، تا حد ممکن کوچک می گیرند. سپس، شعاع خارجی کوره (r_o) را از جمع شعاع داخلی و ضخامت حفاظ به دست می آورند.

حفاظت‌گذاری در برابر پرتوهای X

حفاظت‌گذاری در برابر پرتوهای X به دو صورت قابل بررسی است: حفاظت‌گذاری چشمه، و حفاظت‌گذاری ساختمان‌سی. حفاظت‌گذاری چشمه، معمولاً به صورت محفظه‌ای سربی که لامپ مولد پرتو X در داخل آن قرار دارد، توسط کارخانه سازنده دستگاه‌های پرتو X رعایت می‌شود. مقررات ایمنی پیشنهادی کمیته ملی حفاظت در برابر تابش، دو نوع محفظه حفاظتی زیر را برای دستگاه‌های پرتو X پزشکی مشخص کرده است^۱:

۱. محفظه تشخیصی: محفظه‌ای است که تابش نشت شده از آن، هنگامی که لامپ مولد پرتو X با حداکثر پتانسیل و حداکثر شدت جریان پیوسته کار می‌کند، در فاصله ۱ متری هدف از $30 \mu\text{C/kg}$ (100 mR) در ساعت تجاوز نمی‌کند.

۲. محفظه درمانی:

(الف) برای مولدهایی که حداکثر ولتاژشان از 500 kV کمتر است، محفظه‌ای است که تابش نشت شده از آن، هنگامی که لامپ مولد پرتو X با حداکثر پتانسیل و حداکثر شدت جریان پیوسته کار می‌کند، در فاصله ۱ متری هدف از $3000 \mu\text{C/kg}$ (1 R) در ساعت تجاوز نمی‌کند.

(ب) برای مولدهایی که حداکثر ولتاژشان 500 kV یا بیشتر است، محفظه‌ای است که تابش نشت شده از آن، هنگامی که لامپ مولد پرتو X با حداکثر پتانسیل و حداکثر شدت جریان پیوسته کار می‌کند، در فاصله ۱ متری هدف از $3000 \mu\text{C/kg}$ (1 R) در ساعت یا از ۱۰٪ آهنگ پرتودهی باریکه مفید (هر کدام که بزرگتر است) تجاوز نمی‌کند.

برای مولدهای پرتو X غیر پزشکی، اتاقک محافظ مولد محفظه‌ای است که لامپ پرتو X یا لامپ و دیگر قسمت‌های آن (نظیر مبدل و غیره) را در بر می‌گیرد و چنان ساخته می‌شود که تابش نشت شده از آن، در فاصله ۱ متری هدف، هیچگاه از 1 R در ساعت تجاوز نمی‌کند. منظور از تابش نشت شده در اینجا تمام پرتوهای خارج شده از محفظه، بجز باریکه مفید، است.

طراحی حفاظت ساختمانی به منظور حفاظت در برابر باریکه مفید X، تابش نشت شده، و پرتوهای پراکنده انجام می‌شود. حفاظت ساختمانی، فضای محل استقرار جسم پرتوگیرنده را همراه با لامپ مولد پرتو X (و همچنین اتاقک حفاظتی آن) در بر می‌گیرد. حفاظت‌گذاری ساختمانی ممکن است اشکال متنوعی داشته باشد. برای نمونه، حفاظت ساختمانی دستگاهی که یک پرتو-زیست‌شناس برای پرتودهی به موجودات زنده کوچک به کار می‌برد، ممکن

۱. گزارش شماره ۴۹، NCRP، واشنگتن، دی. سی.، (۱۹۷۶) تحت عنوان،

Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of x-rays and Gamma Rays of Energies up to 10 MeV.

است به صورت جعبه‌ای با آستر سربی باشد. یا، در مورد اتاقی که يك انسان بیمار را در داخل آن پرتو درمانی می‌کنند، حفاظ ساختمانی ممکن است به صورت پوششی باشد که کل اتاق را فرا می‌گیرد. در هر مورد، حفاظ ساختمانی به این منظور طراحی می‌شود که انسان‌هایی را که در خارج از يك محوطه باشند تابشی بالا، به کار اشتغال دارند حفاظت کند. عوامل تعیین کننده خصوصیات حفاظ ساختمانی در هر واحدی که با پرتو سروکار داشته باشد، به قرار زیرند:

۱. کیلو ولتاژ بیشینه‌ای که لامپ مولد پرتو X را به کار می‌اندازد.
 ۲. میلی آمپر بیشینه جریان حاصل از باریکه پرتو X .
 ۳. حجم کار (W)، که معیاری است از میزان استفاده از ماشین پرتو X بر حسب یکای مناسب. در طراحی حفاظهای پرتو X ، معمولاً حجم کار را بر حسب میلی آمپر - دقیقه در هر هفته بیان می‌کنند.
 ۴. ضریب کار برد (U)، که عبارت است از کسری از حجم کار که در طی آن، باریکه مفید X در جهت مورد بررسی قرار می‌گیرد.
 ۵. ضریب اشغال (T)، که عبارت است از عاملی که باید در حجم کار ضرب شود تا میزان یا نوع اشغال را در ناحیه مورد بررسی تصحیح کند. هنگامی که اطلاعات مربوط به اشغال به اندازه کافی در دسترس نباشد، مقادیر جدول ۱۰۱۵ را می‌توان در طراحی حفاظها به عنوان راهنمای عمل مورد استفاده قرار داد.
- در بحثی که به دنبال می‌آید و همچنین در مثالهای مربوط به طراحی حفاظها، برای تعیین پرتو دهی از یکای رونتگن استفاده شده است نه از یکای جدیدتر X یا C/kg . در اینجا جنبه‌های عملی کار را در نظر داشته‌ایم، زیرا اطلاعات لازم برای حفاظها که تاکنون منتشر شده‌اند (۱۹۸۳) همه بر پایه یکای قدیمی رونتگن بیان شده‌اند. می‌دانیم $1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$ است، پس هر گاه که لازم باشد از دستگاه جدید استفاده کنیم، می‌توانیم یکای قدیمی را به یکای جدید تبدیل کنیم.
- بنابر توصیه ICRP، بیشینه دز مجاز در پرتوگیری شغلی برابر $50 mSv (5000 mrem)$ در سال است. اگر این مقدار را به طور یکنواخت روی ۵۰ هفته تقسیم کنیم، بیشینه دز مجاز برابر $1 mSv (100 mrem)$ در هفته می‌شود. چون ضریب کیفیت پرتوهای X برابر ۱ است و هر واحد X یا C/kg ۱ هم مساوی $34 Gy$ دز در هواست، بیشینه دز مجاز شغلی معادل پرتوگیری $30 \mu C/kg$ خواهد شد. در حفاظ گذاری مناطق تحت کنترل، از این مقدار $30 \mu C/kg (100 mrem)$ در هفته یا بیشینه پرتوگیری مجاز، به عنوان مبنای طرح استفاده می‌شود. مطابق توصیه ICRP (در نشریه شماره ۲۶)، دز معادل برای فردی که به خاطر حرفه‌اش در معرض تابش نیست، نباید از $5 mSv (500 mrem)$ در سال تجاوز کند. از این رو، مبنای طرح در حفاظ گذاری مناطق بدون کنترل برابر $3 \mu C/kg (10 mrem)$ در هفته اختیار می‌شود.

جدول ۱۰۱۰ ضرایب اشغال.

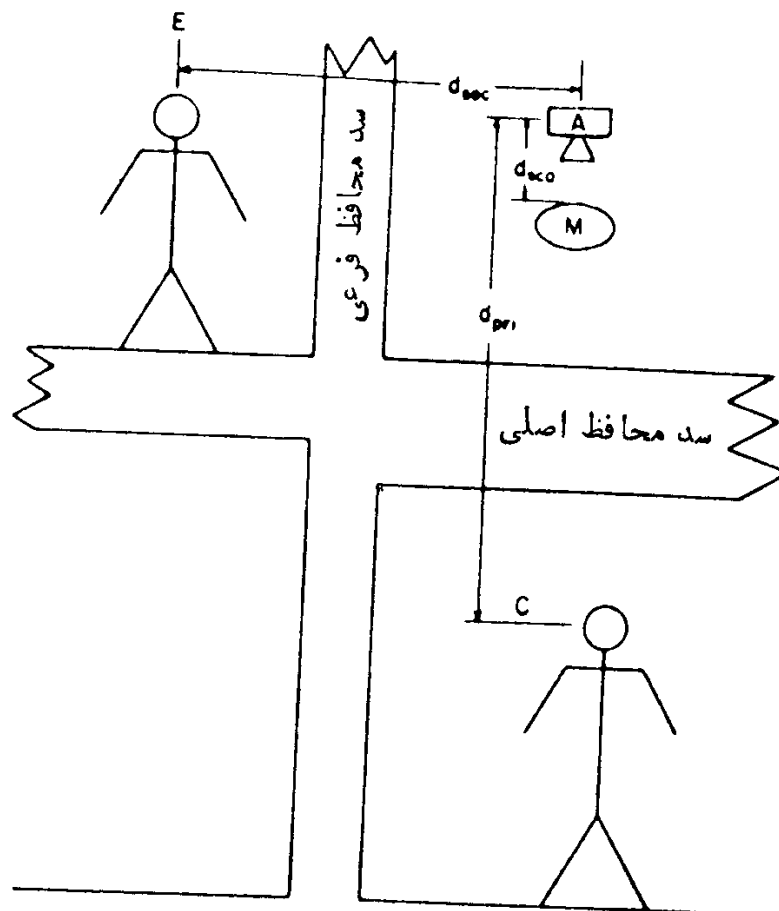
اشغال تمام وقت $T = 1$	فضای تحت کنترل، اتاقهای بیماران، اتاقهای کار، تاریک خانه‌ها، راهروهایی که می‌توان در آنها میز کار گذاشت، اتاقهای انتظار، اتاقهای استراحت کارکنانی که در معرض تابش قرار می‌گیرند، محوطه‌های بازی کودکان، محلهای موجودات جاندار، فضای اشغال شده در ساختمانهای مجاور.
اشغال پاره وقت $T = 1/4$	راهروهایی که نمی‌توان در آنها میز کار گذاشت، اتاقهای همگانی، اتاقهای استراحتی که کارکنان قسمت تابش معمولاً از آنها استفاده نمی‌کنند، آسانسورهایی که آسانسورچی دارند، محوطه‌های پارکینگ بدون کنترل.
اشغال گهگاهی $T = 1/16$	پلکانها، آسانسورهای خودکار، نواحی خارجی که فقط برای آمدوشد اتومبیلها و پیاده‌ها از آنها استفاده می‌شود، پستوهایی که به عنوان اتاق کار قابل استفاده نیستند، توالنهایی که کارکنان قسمت تابش معمولاً از آنها استفاده نمی‌کنند.

برخی عوامل فیزیکی تعیین کننده خصوصیات حفاظتهای لازم در برابر باریکتهای پرتو x را در شکل ۱۱.۱۰ نشان داده ایم. در این شکل، از لامپ موئید پرتو x که در محفظه‌ای در A قرار دارد، یک باریکه موازی پرتو x به سوی بیمار M (یا جسمی که قرار است پرتونگاری شود) فرستاده می‌شود. باریکه، پس از عبور از بدن بیمار و پیش از آنکه شخص ایستاده در محل C را زیر پرتو دهی بگیرد، در سد محافظ اصلی به میزانی قابل قبول تضعیف می‌شود. پرتوهای نشت یافته و پرتوهای پراکنده هم، پیش از آنکه به نقطه E برسند و در آنجا احتمالاً شخصی را زیر پرتو دهی بگیرند، در سد محافظ فرعی به میزانی قابل قبول تضعیف می‌شوند.

۱. سد محافظ اصلی

آهنک پرتوگیری بیشینه، در هر نقطه اشغالی به فاصله d متر از هدف لامپ پرتو x ، عبارت است از

$$\dot{X}_m = \frac{P}{T} (R/w) \quad (12.10)$$



شکل ۱۱.۱۵ دید عمودی از یک اتاق تابش و نواحی اطراف. فواصلی که از لحاظ محاسبات حفاظت‌گذاری مهم‌اند مشخص شده‌اند. A چشمه تابش است، M بیمار تحت تابش را نشان می‌دهد، و C و E مواضعی هستند که ممکن است محل حضور انسان‌هایی دیگر باشند.

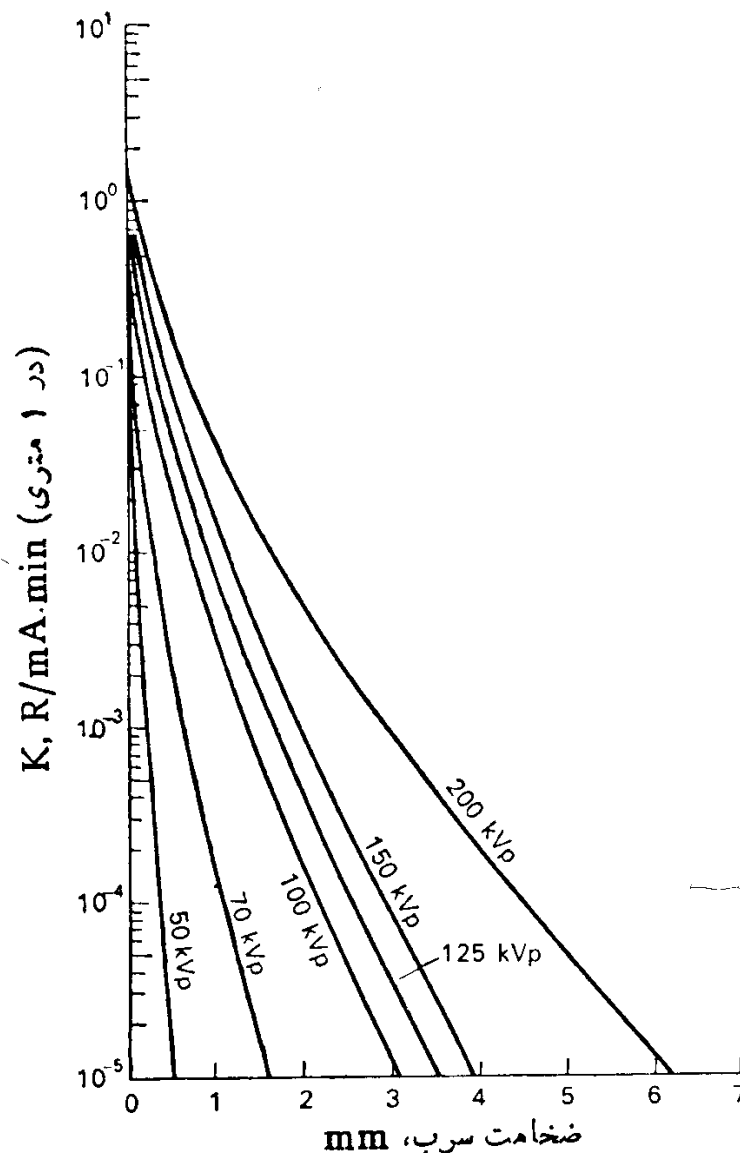
که در آن P بیشینه پرتوگیری مجاز در هفته (برابر R/w ۱ ره برای نواحی تحت کنترل و R/w ۵۰۱ ره برای نواحی بدون کنترل) و T ضریب اشغال است. با استفاده از قانون عکس مجذور، آهنگ پرتودهی این میدان تابش در ۱ متری هدف، چنین به دست می‌آید

$$\dot{X}_1 = d^2 \times \dot{X}_m = \frac{d^2 P}{T} (R/w) \quad (13.10)$$

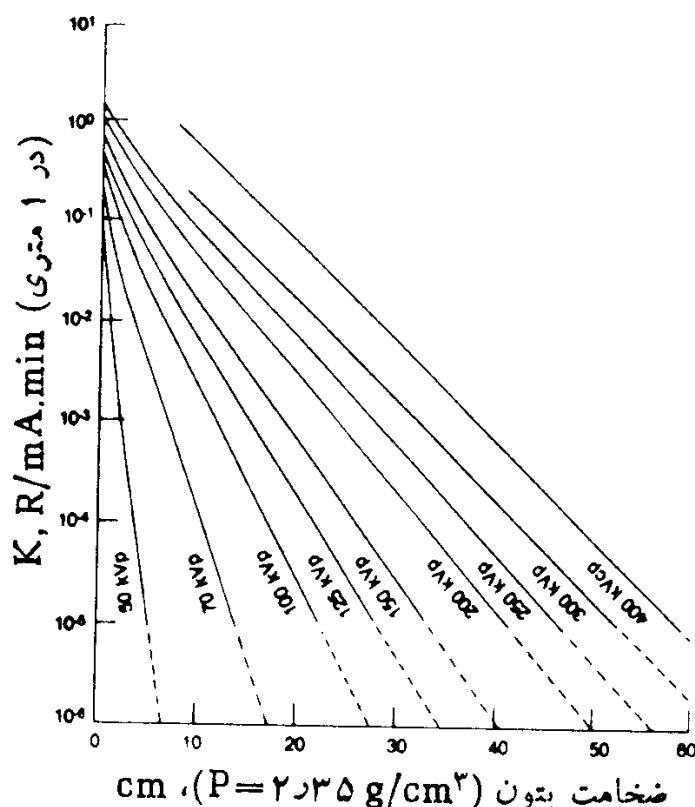
این پرتودهی از حجم کار $WU \text{ mA} \cdot \text{min}/w$ حاصل می‌شود. اکنون، نسبت زیر را تعریف می‌کنیم

$$K = \frac{\dot{X}_1}{WU} = \frac{d^2 P}{WUT} \left(\frac{R/\text{mA} \cdot \text{min}}{w} \right) \quad (14.10)$$

و مقدار آن را برای باریکه‌های پهن پرتوهای x ، که با انرژیهای مختلف از ضخامت‌های مختلف حفاظ‌های سربی یا بتونی عبور می‌کنند، تعیین می‌کنیم. نتایج چنین اندازه‌گیری‌هایی را در شکل‌های ۱۲.۱۵ تا ۱۶.۱۵ نشان داده‌ایم. آزمایش نشان داده است که عبور پرتوهای x از حفاظ‌های کلفت، عمدتاً به پراورژیت‌ترین فوتون‌های موجود در باریکه بستگی دارد؛ و در مورد باریکه‌ای با یک حداقل طول موج معین، میزان عبور به کیفیت باریکه (مثلاً، بسا مقدار نیم - لایه باریکه) بستگی چندانی ندارد. بدین ترتیب، اطلاعات عبور پرتوها در شکل‌های ۱۲.۱۵ تا ۱۶.۱۵ را در طراحی حفاظ برای هر نوع تابش x که انرژی اش



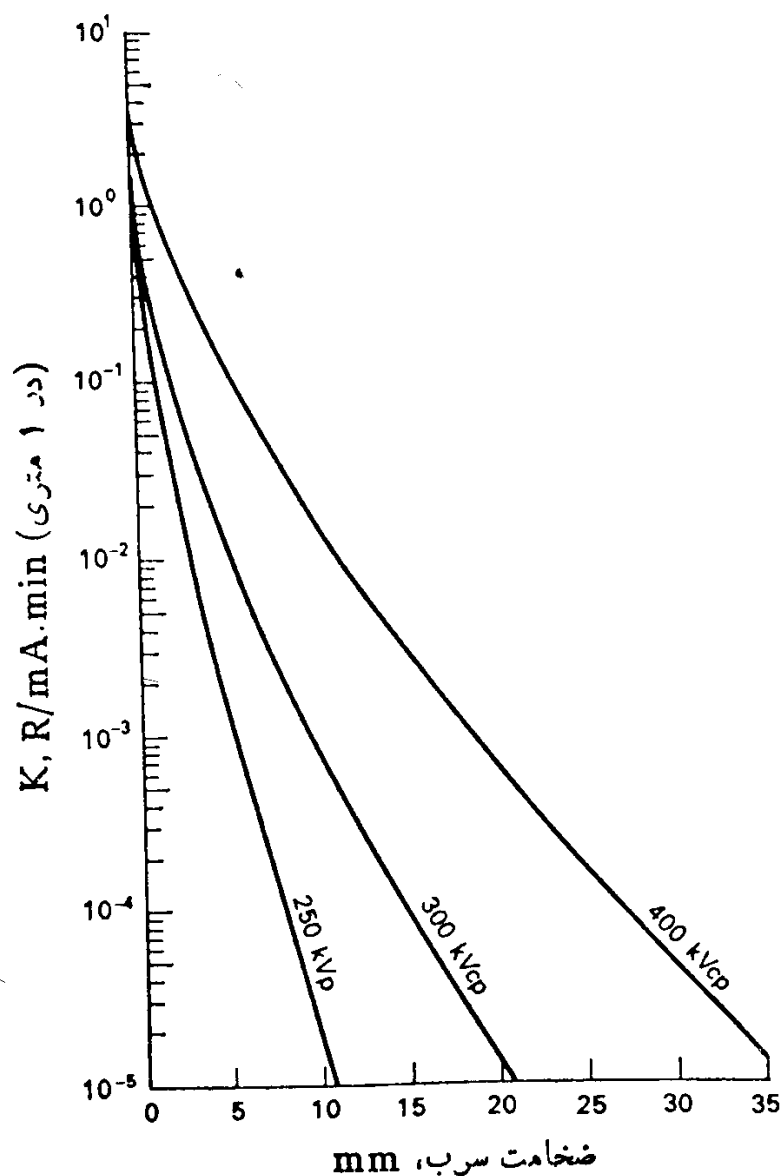
شکل ۱۲.۱۵ تضعیف باریکه پهن پرتو x در سرب. حداکثر پتانسیل‌های تولید پرتو x ، ۵۰-۲۰۰ kV. در این اندازه‌گیری‌ها، زاویه بین باریکه الکترونها و محور باریکه پرتوهای x برابر ۹۰° گرفته شده است. در پتانسیل‌های ۵۰، ۷۰، ۱۰۰، و ۱۲۵ کیلو ولت، پرتوهای x از صافی ۵ mm Al عبور کرده‌اند. در پتانسیل‌های ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوولت، پرتوهای x از صافی ۳ mm Al عبور کرده‌اند.



شکل ۱۳.۱۰ تضعیف پرتوهای X حاصل از پتانسیلهای ۵۰ تا ۳۰۰ کیلوولت (ولتاژ قله‌ای) و پتانسیل ۴۰۰ کیلوولت (ولتاژ ثابت) در بتون. در این اندازه‌گیریها، زاویه بین باریکه الکترونها و محور باریکه پرتوهای X برابر ۹۰° اختیار شده است. منحنیهای ۵۰-۳۰۰ kV برای شکل موج تپشی رسم شده‌اند. صافیها عبارت‌اند از: ۱ mm Al برای ۵۰ kV، ۱.۵ mm Al برای ۷۰ kV، ۲ mm Al برای ۱۰۰ kV، و ۳ mm Al برای ۱۲۵، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوولت. منحنی ۴۰۰ kV از برونیابی اطلاعات حاصل از یک مولد ولتاژ ثابت و صافی داخلی تقریباً معادل با ۳ mm Cu به دست آمده است.

در گستره بیشینه پتانسیل نموده شده قرار گیرد، می‌توان به کار برد. در طراحی سد محافظ اصلی، مقدار K را با استفاده از معادله (۱۴.۱۰) محاسبه می‌کنند و سپس ضخامت لازم برای سد را از روی تقاطع خط افقی K با منحنی مربوط به انرژی پرتو X ، می‌خوانند.

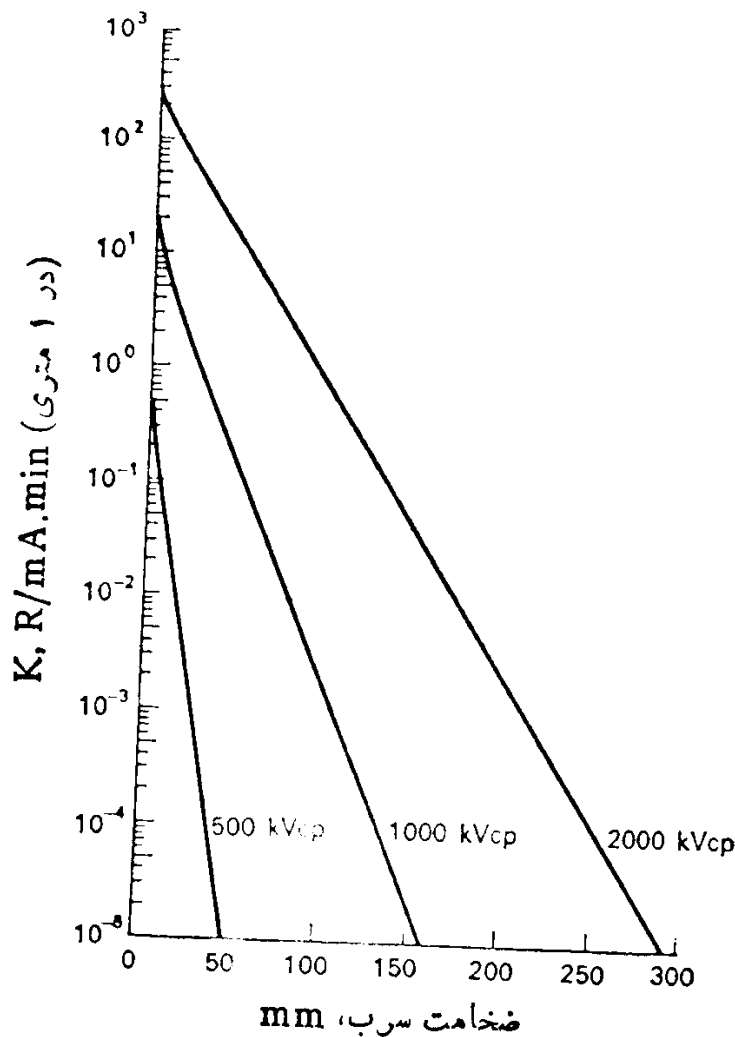
اگر مقدار K بر حسب $\mu C/kg \cdot mA \cdot min$ در دست باشد، منحنیهای شکلهای ۱۲.۱۰ تا ۱۶ هنگامی قابل استفاده خواهند بود که مقدار K در ۲۵۸ ضرب شود. برای نمونه، مقدار $K = 3.88 \times 10^{-5} \mu C/kg \cdot mA \cdot min$ بساید به صورت $K = 258 \times 3.88 \times 10^{-5} = 1 \times 10^{-2} R/mA \cdot min$ در آید.



شکل ۱۴.۱۰ تضعیف پرتوهای X حاصل از پتانسیل‌های ۲۵۰-۴۰۰ kV در سرب. اندازه‌گیریها در شرایطی انجام شده‌اند که زاویه بین محور باریکه الکترونها و باریکه پرتوهای X برابر ۹۰° بود. منحنی ۲۵۰ kVp از شکل موج تپشی و با استفاده از صافی ۳ mm Al به دست آمده است. منحنیهای مربوط به ۳۰۰ و ۴۰۰ kVcp از درونیابی اطلاعات حاصل از یک مولد ولتاژ ثابت، و صافی داخلی ۳ mm Cu به دست آمده‌اند.

مثال ۵.۱۰

می‌خواهیم منطقه‌ای تحت کنترل را، از اثرات باریکه مفیدی از پرتو X با پتانسیل ۲۵۰ kVp که از تأسیساتی درمانی به حجم کار ۲۰۰۰۰ mA.min در هفته ناشی می‌شود، محافظت کنیم. منطقه تحت کنترل به اندازه ۲.۵ m از هدف ماشین مولد پرتوها فاصله دارد، ضریب اشغال مساوی ۱ و ضریب کاربرد برابر ۱/۲ است. ضخامت بتون لازم را در این حفاظ‌گذاری حساب کنید.

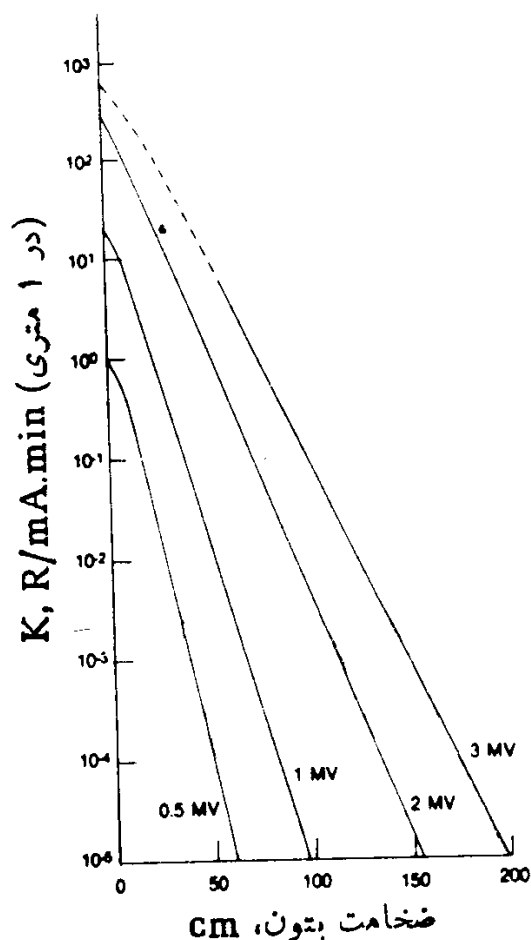


شکل ۱۵.۱۰ تضعیف باریکه پهن پرتوهای X حاصل از پتانسیلهای ثابت ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ kV در حفاظ سربی. اندازه گیریها در شرایطی انجام شدند که زاویه بین باریکه الکترونها و محور باریکه پرتوهای X برابر صفر بود. منحنیهای ۵۰۰ و ۱۰۰۰ kVcp با استفاده از صافیهای ۲.۸ mm W، ۲.۸ mm Cu، ۲.۱ mm برنج، و ۱.۸ mm Pb آب به دست آمده اند. برای منحنی ۲۰۰۰ kVcp صافی داخلی معادل ۶.۸ mm Pb بوده است.

حل: برای يك منطقه تحت كنترل، بیشینه پرتو گیری هفتگی نباید از $30 \mu C/kg$ یا $0.1 R$ تجاوز کند. اگر این مقدار P و دیگر عوامل معلوم را در معادله (۱۲.۱۰) قرار دهیم حاصل می شود

$$K = \frac{(2.5 \text{ m})^2 \times 0.1 R}{20000 \text{ mA} \cdot \text{min} \times 0.5 \times 1} = 6.25 \times 10^{-5} \frac{R \cdot \text{m}^2}{\text{mA} \cdot \text{min}}$$

(داده نمایی: $R \cdot \text{m}^2 / \text{mA} \cdot \text{min} = (R / \text{mA} \cdot \text{min})$ در ۱ متری) 250 kV_p در شکل ۱۳.۱۰، ضخامت بتون لازم برابر ۳۹ cm با توجه به منحنی



شکل ۱۶.۱۰ تضعیف پرتوهای X حاصل از پتانسیلهای ۵۰ تا ۳ MV (ولتاژ ثابت) در بتون. اندازه گیرها در شرایط زاویه 50° بین باریکه الکترونها و محور باریکه پرتوهای X، و پتانسیل ثابت انجام شده اند. منحنیهای ۵۰ و ۱ MV با استفاده از صافیهای Cu ۲.۸ mm، ۲.۱ mm برنج، و ۱.۸ mm آب به دست آمده اند. صافی داخلی برای منحنیهای ۲ و ۳ MV معادل ۶.۸ mm Pb بوده است.

به دست می آید. مطابق شکل ۱۴.۱۰، ضخامت حفاظ سربی که اثر تضعیفی اش به همان میزان باشد، با توجه به منحنی 250 kV_p ، برابر با ۸.۲۵ mm خواهد شد.

۲. سد محافظ فرعی

سد محافظ فرعی، حفاظت در برابر پرتوهای پراکنده و پرتوهای نشت یافته را بر عهده دارد. برای طراحی سد محافظ فرعی، به طور جداگانه ضخامت حفاظ لازم را برای هر کدام از این دو مؤلفه حساب می کنیم. اگر ضخامت های لازم برای این دو مورد تقریباً یکسان باشند، صرفاً یک مقدار (نیم - لایه HVL از جدول ۲.۱۰) دیگر را به ضخامت بزرگتر اضافه می کنیم. اگر اختلاف بین این دو مساوی ضخامت یکدهم - مقدار (TVL از جدول ۲.۱۰) یا بیشتر

جدول ۳۰۱۰ مقادیر نیم- لایه و یکدهم- لایه.

ولتاژ حداکثر (kV)	ماده تضعیف کننده					
	سرب (mm)		بتون (cm)		آهن (cm)	
	HVL	TVL	HVL	TVL	HVL	TVL
50	0.06	0.17	0.43	1.5		
70	0.17	0.52	0.84	2.8		
100	0.27	0.88	1.6	5.3		
125	0.28	0.93	2.0	6.6		
150	0.30	0.99	2.24	7.4		
200	0.52	1.7	2.5	8.4		
250	0.88	2.9	2.8	9.4		
300	1.47	4.8	3.1	10.4		
400	2.5	8.3	3.3	10.9		
500	3.6	11.9	3.6	11.7		
1,000	7.9	26	4.4	14.7		
2,000	12.5	42	6.4	21		
3,000	14.5	48.5	7.4	24.5		
4,000	16	53	8.8	29.2	2.7	9.1
6,000	16.9	56	10.4	34.5	3.0	9.9
8,000	16.9	56	11.4	37.8	3.1	10.3
10,000	16.6	55	11.9	39.6	3.2	10.5
Cs -137	6.5	21.6	4.8	15.7	1.6	5.3
Co -60	12	40	6.2	20.6	2.1	6.9
Ra	16.6	55	6.9	23.4	2.2	7.4

این مقادیر تقریبی در شرایط باریکه پهن و تضعیف زیاد حاصل شده اند. در تضعیف کم، این مقادیر خیلی کمتر خواهند شد.

باشد، انتخاب ضخامت بزرگتر برای حفاظت کفایت خواهد کرد. شدت پرتوهای پراکنده، به زاویه پراکندگی، انرژی باریکه پرتوهای اولیه، و بزرگی سطح پراکندگی بستگی دارد. جدول ۳۰۱۰ نسبت بین شدت پرتوهای پراکنده و شدت تابش فرودی را، در فاصله ۱ متری ماده پراکنده و برای سطح پراکندگی (یا بزرگی میدان) 400 cm^2 ، به دست می دهد. بر اساس این فرض که شدت پرتوهای پراکنده به نسبت معکوس با مجذور فاصله از ماده پراکنده و به نسبت مستقیم با بزرگی سطح پراکندگی تغییر می کند، پرتوهای پرتوهای پراکنده، X_s ، چنین به دست می آید

$$X_s = \frac{a \times \dot{X}_u}{(d_{sec})^2} \times \frac{F}{400} \times t \quad (15.10)$$

که در آن a نسبت پرتوهای پراکنده به پرتوهای فرودی (جدول ۳۰۱۰)، $\dot{X}_u$ آهنک پرتوهای تابش فرودی بر ماده پراکنده، d_{sec} فاصله نقطه مورد نظر از ماده پراکنده، F بزرگی میدان پراکندگی (cm^2)، و t مدت زمان پرتودهی است.

جدول ۳۰۱۰ نسبت شدت پرتوهای پراکنده به شدت پرتوهای فرودی (الف).

چشمه	زاویه پراکندگی (از محور پرتو مرکزی)					
	30	45	60	90	120	135
پرتوهای x						
50 kV ^(ب)	0.0005	0.0002	0.00025	0.00035	0.0008	0.0010
70 kV ^(ب)	0.00065	0.00035	0.00035	0.0005	0.0010	0.0013
100 kV ^(ب)	0.0015	0.0012	0.0012	0.0013	0.0020	0.0022
125 kV ^(ب)	0.0018	0.0015	0.0015	0.0015	0.0023	0.0025
150 kV ^(ب)	0.0020	0.0016	0.0016	0.0016	0.0024	0.0026
200 kV ^(ب)	0.0024	0.0020	0.0019	0.0019	0.0027	0.0028
250 kV ^(ب)	0.0025	0.0021	0.0019	0.0019	0.0027	0.0028
300 kV ^(ب)	0.0026	0.0022	0.0020	0.0019	0.0026	0.0028
4 MV ^(ج)	—	0.0027	—	—	—	—
6 MV	0.007	0.0018	0.0011	0.0006	—	0.0004
پرتوهای گاما						
¹³⁷ Cs ^(د)	0.0065	0.0050	0.0041	0.0028	—	0.0019
⁶⁰ Co	0.0060	0.0036	0.0023	0.0009	—	0.0006

(الف) اندازه گیری پرتوهای پراکنده در ۱ متری آدامک و در شرایطی انجام شده که مساحت میدان در سطح آدامک برابر 400 cm^2 بوده است. شدت پرتوهای فرودی در ۱ متری چشمه و در مرکز میدان، اما بدون حضور آدامک، اندازه گیری شده است.

(ب) پراکندگی متوسط برای باریکه هایی که به مرکز و لبه سطح مقطع آدامک برخورد می کنند، در نظر گرفته شده است. ولتاژهای ذکر شده، حداکثر پتانسیل تپشی را در لامپهای مولد نشان می دهند.

(ج) از آدامک استوانه ای استفاده شده است.

(د) این اطلاعات در شرایطی به دست آمد که تیغه ای به طور مایل در مقابل باریکد مرکزی قرار داده شده بود. در صورت استفاده از آدامک استوانه ای، مقادیر کمتری به دست می آیند.

اگر هنگامی که شدت جریان باریکه الکترونها برابر با 1 mA است آهنگ پرتو دهی را در ۱ متری هدف با $\dot{X}_n$ نشان دهیم ($\dot{X}_n$ را آهنگ پرتو دهی بهنجار می گویند)، همچنین اگر فاصله ماده پراکنده را از هدف مولد پرتوها d_{sca} بگیریم، و ضریب تضعیف پرتوهای پراکنده در سد را نیز با B_{sx} نمایش دهیم، در این صورت پرتو دهی هفتگی P ، وقتی که شدت جریان باریکه الکترونها I آمپر در t ثانیه باشد، چنین خواهد شد

$$P = B_{\text{sx}} + X_s = B_{\text{sx}} \times \frac{a \times X_n \times I \times t}{(d_{\text{sca}})^2 \times (d_{\text{sec}})^2} \times \frac{F}{400} \quad (16.10)$$

چون می دانیم $It = WT$ و برای پرتوهای پراکنده داریم $U = 1$ ، در این صورت، اگر از معادله (16.10) حاصل ضرب $B_{\text{sx}} \times X_n$ را به دست آوریم و آن را با K_{ux} نشان دهیم، خواهیم داشت

$$K_{ux} = \frac{P}{aWT} \times (d_{sca})^2 \times (d_{sec})^2 \times \frac{400}{F} \quad (17.10)$$

در طراحی سدهای محافظ فرعی، فرضهای محتاطانه و سهولت بخش زیر را می‌پذیریم:

۱. انرژی پرتوهای پراکنده، هنگامی که پرتوهای x در پتانسیل ۵۰۰ kV یا کمتر تولید شده باشند، با انرژی باریکه مفید برابر است.
۲. در مورد باریکه پرتوهای x تولید شده در ولتاژهای بیشتر از ۵۰۰ kV، انرژی پرتوها پس از آنکه پراکنده می‌شوند به انرژی باریکه ۵۰۰ kV کاهش می‌یابد؛ و آهنگ پرتودهی در ۱ متری ماده پراکنده برابر است با ۱٪ آهنگ پرتودهی باریکه مفید در نقطه پراکندگی.

این فرضهای سهولت بخش بر پایه این واقعیت وضع شده‌اند که در انرژیهای متناظر با ولتاژ ۵۰۰ kV یا کمتر، افت فوتونها در برهم‌کنش پراکندگی نسبتاً کم است؛ در حالی که افت انرژی پرتوهای x با انرژی بالاتر، در پراکندگی ۹۰° چنان است که انرژی‌شان تقریباً معادل با توزیع انرژی پرتوهای x حاصل از پتانسیل ۵۰۰ kV می‌شود. از این رو، برای پرتوهایی که حداکثر انرژی‌شان ۵۰۰ keV است، از منحنیهای عبور متناظر با کیلوولتاژهای مربوط استفاده می‌شود. اما، در طراحی حفاظ در برابر پرتوهای پراکنده حاصل از تابشهایی که انرژی‌شان بیشتر از ۵۰۰ keV است، از منحنیهای عبور متناظر با ۵۰۰ kV استفاده می‌شود. اما، همراه با افزایش کیلوولتاژ یک ماشین پرتو x، بر شدت باریکه خروجی آن نیز افزوده می‌شود. برای آنکه این اثر را نیز در نظر بگیرند، در عبارت K_{ux} عامل f را که بزرگی آن به کیلوولتاژ بستگی دارد، وارد می‌کنند. با توجه به این ملاحظات، معادله (۱۷.۱۰) به صورت زیر درمی‌آید

$$K_{ux} = \frac{P \times (d_{sca})^2 \times (d_{sec})^2 \times 400}{a \times W \times T \times F \times f} \text{ R/mA} \cdot \text{min (در هفته)} \quad (18.10)$$

در فاصله ۱ متری ماده پراکنده، مقادیر f به قرار زیرند:

kV	۵۰۰ (یا کمتر)	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰۰
f	۱	۲۰	۳۰۰	۷۰۰

مثال ۶.۱۰

برای محافظت از یک منطقه بدون کنترل، ضخامت حفاظ لازم را در برابر پرتوهای پراکنده ناشی از یک ماشین پرتودرمانی x که حداکثر ولتاژ آن ۲۵۰ kV_p است، حساب کنید.

حجم کار هفتگی برابر $۲۰۰۰۰ \text{ mA} \cdot \text{min}$ ، فاصله هدف تا سطح پوست برابر ۵۰ cm ، حداکثر سطح تحت درمان برابر $۲۰ \text{ cm} \times ۲۰ \text{ cm}$ ، فاصله منطقه بدون کنترل از بیمار برابر ۳ m ، و ضریب اشغال منطقه بدون کنترل برابر ۱ است.

حل: چون هدف حفاظت از منطقه‌ای بدون کنترل است، بیشینه پرتوگیری هفتگی عبارت است از $P = ۰.۰۰۱ \text{ R} (۳ \mu\text{C/kg})$. مقادیر معلوم دیگر که باید در معادله (۱۸.۱۰) قرار داده شوند، عبارت‌اند از

$$d_{\text{sca}} = ۰.۰۵ \text{ m}, d_{\text{sec}} = ۳ \text{ m}, a = ۰.۰۰۰۱۹ \text{ (۵.۱۰ جدول)}$$

$$W = ۲۰۰۰۰ \text{ mA} \cdot \text{min}, T = ۱, F = ۴۰۰ \text{ cm}^2, f = ۱$$

پس از قرار دادن این مقادیر در معادله (۱۸.۱۰)، مقدار K_{ux} به دست می‌آید. با معلوم بودن مقدار K_{ux} ، می‌توان ضخامت حفاظ لازم را با استفاده از شکل‌های ۱۳.۱۰ و ۱۴.۱۰، به ترتیب برای حفاظ‌های بتونی و سربی، تعیین کرد

$$K_{ux} = \frac{۰.۰۰۱ \times (۰.۰۵)^2 \times (۳)^2 \times ۴۰۰}{۰.۰۰۰۱۹ \times ۲۰۰۰۰ \times ۴۰۰ \times ۱} = ۵.۹۲ \times ۱۰^{-4}$$

با توجه به منحنی ۲۵۰ kV_p در شکل ۱۳.۱۰، ضخامت سد لازم برابر ۳۰ cm بتون به دست می‌آید. منحنی ۲۵۰ kV_p در شکل ۱۴.۱۰ نشان می‌دهد که در صورت استفاده از سرب به عنوان حفاظ، ضخامت لازم برابر با ۶ mm Pb خواهد شد.

از آنجا که محفظه‌های حفاظتی لامپ‌های پرتو X، پرتوهای نشتی را در فاصله ۱ متری به مقدار ثابت و معینی محدود می‌کنند، چنانچه انرژی پرتوهای نشت یافته را بدانیم، به آسانی می‌توان ضخامت سد لازم را در هر فاصله‌ای تعیین کرد. پرتوهای نشت یافته، چون در گذار از محفظه از صافی رد می‌شوند، عمدتاً تک - انرژی‌اند و از این رو، مقدار نیم - لایه آنها فقط به کیلوولتاژ دوسر لامپ بستگی دارد.

در مورد لامپ‌های پرتو X مستقر در محفظه حفاظتی نوع تشخیصی، هنگامی که لامپ با حداکثر ولتاژ و شدت جریان کار می‌کند، بیشینه پرتودهی نشتی در فاصله ۱ متری به $۰.۰۱ \text{ R} (۳۰ \mu\text{C/kg})$ در ساعت محدود می‌شود. اگر ماشین پرتو X در هر هفته ۱ دقیقه کار کند، پرتودهی نشتی در هر هفته، در فاصله d متری هدف، عبارت است از

$$X_L = \frac{۰.۰۱}{d^2} \times \frac{t}{۶۰} \quad (۱۹.۱۰)$$

در طراحی حفاظ‌ها، حجم کار WUT را برابر با حاصلضرب شدت جریان باریکه الکترونی در زمان «روشن بودن» ماشین در هفته (It) در نظر می‌گیرند. چون برای پرتوهای نشتی $U = ۱$ است، معادله (۱۹.۱۰) را می‌توان چنین نوشت

$$X_L = \frac{0.01}{d^2} \times \frac{WT}{60I} \quad (20.10)$$

اگر بیشینه پرتو دهی هفتگی را با P ، و میزان تضعیف پرتوهای ناشی در سد حفاظتی را با عامل B_{Lx} نشان دهیم، خصوصیات حفاظ را از معادله زیر می توان به دست آورد

$$P = B_{Lx} \times X_L = B_{Lx} \times \frac{WT}{d^2 \times 600I} \quad (21.10)$$

و از اینجا، مقدار تضعیف لازم چنین به دست می آید

$$B_{Lx} = \frac{P \times d^2 \times 600I}{WT} \quad (22.10)$$

در مورد لامپهای پرتو X مستقر در محفظه حفاظتی نوع درمانی، در صورتی که ولتاژ کار از 500 kV تجاوز نکند، بیشینه نشت در 1 متری هدف به R در ساعت محدود می شود. بنا بر این، معادله تضعیف سد همانند معادله (22.10) خواهد شد

$$B_{Lx} = \frac{P \times d^2 \times 60I}{WT} \quad (23.10)$$

در مواردی که پتانسیل کار از 500 kV بیشتر است، اتاقلك حفاظتی نوع درمانی پرتوهای ناشی را در 1 متری به 0.01% شدت باریکه مفید، محدود نگه می دارد. از این رو، تضعیف لازم در سد محافظ فرعی چنین به دست می آید

$$B_{Lx} = \frac{1000P \times d^2}{\dot{X}_n \times WT} \quad (24.10)$$

که در آن $\dot{X}_n$ آهنگ پرتوگیری بهنجار است. تعداد نیم - لایه های لازم، برای رسیدن به تضعیف مورد نظر، از معادله زیر محاسبه می شود

$$B_{Lx} = 1/2^n \quad (25.10)$$

و ضخامت سد مورد نظر هم به کمک جدول ۲۰۱۰، که مقادیر نیم-لایه بتون و سرب را برای انرژیهای مختلف پرتو X به دست می دهد، قابل محاسبه خواهد بود.

مثال ۷.۱۰

ضخامت سد فرعی لازم در برابر ماشین پرتو درمانی X ، مثال ۶.۱۰ را حساب کنید. این ماشین با پتانسیل 250 kV_p و جریان 20 mA کار می کند، و حجم کار هفتگی آن برابر

۲۰۰۰۰ mA·min است. فاصله منطقه بدون کنترل از ماشین پرتو x برابر ۳ m، و ضریب اشغال برابر ۱ است.

حل: برای منطقه بدون کنترل، $P = 0.01 R$ در هفته است. با قراردادن تمام مقادیر معلوم در معادله (۲۳.۱۰)، برای یک محفظه حفاظتی درمانی که پتانسیل لامپ آن ۵۰۰ kV یا کمتر است، داریم

$$B_{Lx} = \frac{0.01 \times 3^2 \times 60 \times 20}{20000} = 5.4 \times 10^{-3}$$

تعداد نیم - لایه‌هایی که پرتوها را تا این حد تضعیف می‌کنند، از معادله (۲۵.۱۰) به دست می‌آید

$$5.4 \times 10^{-3} = 1/2^n$$

$$n = 7.53$$

با توجه به جدول ۲۰.۱۰، مقدار نیم - لایه (HVL) برای پرتوهای ۲۵۰ kV برابر ۲۸ cm بتون می‌شود. بدین ترتیب، ضخامت حفاظ لازم در برابر پرتوهای نشتی عبارت است از

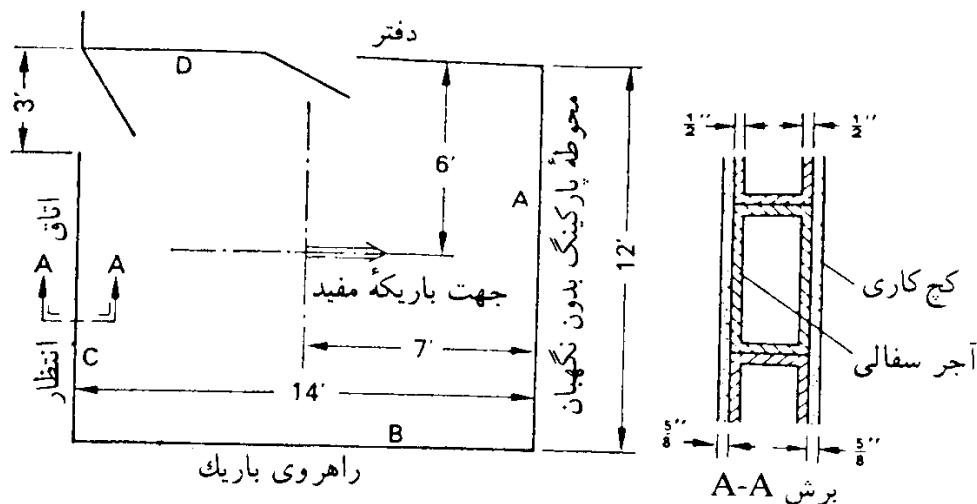
$$7.53 \text{ HVL} \times 28 \text{ cm/HVL} = 211 \text{ cm}$$

در مثال ۶.۱۰، ضخامت حفاظ لازم در برابر پرتوهای پراکنده برابر ۳۰ cm بتون به دست آمده بود. اختلاف بین این دو ضخامت برابر ۸۹ cm است. از جدول ۲۰.۱۰ معلوم می‌شود که مقدار یکدهم - لایه (TVL) بتون برای پرتوهای x با پتانسیل ۲۵۰ kV برابر ۹۴ cm است. از آنجا که اختلاف ضخامت‌های لازم برای پرتوهای نشتی و پراکنده کمتر از مقدار یکدهم - لایه است، ضخامت سد فرعی نهایی به میزان یک نیم - لایه بیشتر از سد کلفت‌تر خواهد شد

$$30 \text{ cm} + 28 \text{ cm} = 58 \text{ cm}$$

مثال ۸.۱۰

اتاق شکل ۱۷.۱۰ برای مقاصد پرتوشناسی تشخیصی به کار می‌رود. ارتفاع اتاق، از کف تا سقف، برابر ۹ فوت و ۷ اینچ (۲۹۲ cm) است. اتاق بالایی، دفتر دیگری است که از لحاظ پرتوشناسی تحت کنترل نیست. اتاق پرتو x در طبقه همکف ساختمان قرار دارد؛ یعنی در زیر آن فضای قابل اشغالی نیست. سقف و کف اتاق با ضخامت ۵ in (۱۲.7 cm) از بتون ساخته شده‌اند، و دیوار A هم از بتون و ضخامت آن برابر ۴ in (۱۰.۲ cm) است.



شکل ۱۷.۱۰ طرح نمایش اتاق پرتوهای تشخیصی X، مثال ۸.۱۰.

دیوارهای B، C، و D، همان طور که در برش A-A نموده شده است، با گچ کاری و آجر سفالی پوشیده شده اند. حداکثر ولتاژ و جریان ماشین مولد پرتو X عبارت اند از 125 kV_p و 200 mA . از این ماشین، در هفته، ۵ ساعت به عنوان فلوتوروسکوپ (دستگاه پرتونما) با جریان 35 mA ، و ۲ دقیقه به عنوان ماشین پرتونگاری با جریان 200 mA استفاده می شود. متوسط فاصله پوست بدن از هدف 5 m است. مقدار حفاظ لازم را برای سقف و دیوار B محاسبه کنید.

حل:

محاسبه سد اصلی

در کار پرتونگاری، پرتوهای X فقط به طرف دیوار A گسیل می شوند. بدین ترتیب، فقط همین دیوار باید سد اصلی باشد، همه دیوارهای دیگر سد فرعی اند. در حین کار با دستگاه پرتونما، باریکه مفید همواره با صفحه مشاهده دستگاه برخورد می کند که این صفحه باشیشه سربی حفاظ گذاری شده است. در این صورت، هیچگونه حفاظ اصلی دیگری لازم نیست. بنا بر این، اگر تنها کار پرتونگاری را در نظر بگیریم، حجم کار عبارت است از

$$W = 2 \text{ min/w} \times 200 \text{ mA} = 400 \text{ mA} \cdot \text{min/w}$$

برای محوطه پارکینگ، ضریب کاربرد $U = 1$ و ضریب اشغال $T = 1/4$ است. فاصله هدف لامپ مولد پرتو X تا دیوار برابر ۷ فوت (2.13 m)، و بیشینه پرتودهی مجاز در هفته به یک منطقه بدون کنترل برابر $3 \mu\text{C/kg}$ (0.01 R) است. پس از قرار دادن این مقادیر در معادله (۱۴.۱۰)، حاصل می شود

$$K = \frac{(2.13)^2 \times 0.01}{400 \times 1 \times 1/4} = 454 \times 10^{-4} \text{ R/mA} \cdot \text{min (در ۱ متری)}$$

با توجه به شکل ۱۳.۱۰ و با استفاده از منحنی 125 kV_p ، معلوم می شود که ضخامت حفاظ

لازم برابر 17.7 cm (7 in) بتون است. ضخامت دیوار فقط 10.2 cm است، بنابراین ورقه سربی با ضخامت معادل 5.5 cm بتون باید به این دیوار چسبانده شود. از جدول ۲۰۱۰ معلوم می‌شود که برای پرتوهای 125 kV ، مقدار نیم - لایه برابر 2.0 cm بتون یا 2.8 mm سرب است. چون 5.5 cm بتون مساوی 2.75 HVL است، ضخامت ورقه سربی 2.75 برابر 2.8 mm ، یعنی 7.7 mm ، به دست خواهد آمد.

محاسبه سد فرعی

(الف) سقف: پرتوهای ناشی. فرض می‌کنیم که لامپ مولد پرتو X ، در ارتفاع 5 ft (1.5 m) از کف اتاق، در فاصله میان کف و سقف، قرار داشته باشد. در طراحی حفاظها، هنگامی که تابش از نواحی پایینتر از کف سرچشمه می‌گیرد، آهنگ دز در ارتفاع 3 ft بالاتر از کف را به عنوان معیار ایمنی در نظر می‌گیرند. بدین ترتیب، در این مورد فاصله بین هدف ماشین مولد از نقطه‌ای که می‌خواهیم مورد محافظت قرار دهیم، جمعاً برابر 8 ft (2.5 m) است. تضعیف لازم برای پرتوهای ناشی از معادله زیر قابل محاسبه است

$$P = B_{Lx} \times X_L \quad (26.10)$$

پس از قراردادن پرتوگیری هفتگی پرتوهای نشت یافته X_L ، از معادله (۱۹.۱۰)، ضریب تضعیف B_{Lx} چنین به دست می‌آید

$$B_{Lx} = \frac{P}{X_L} = 0.01 \times 600 d^2 / t \quad (27.10)$$

چون ماشین مولد در هر هفته به مدت 302 دقیقه «روشن» است، ضریب تضعیف لازم برای آنکه پرتوگیری هفتگی ناشی از پرتوهای نشت یافته در 2.5 متری به 0.01 R ($3 \mu\text{C/kg}$) کاهش یابد، عبارت است از

$$B_{Lx} = \frac{0.01 \times 600 \times (2.5)^2}{302} = 0.124$$

و تعداد نیم - لایه‌های لازم برای این تضعیف چنین خواهد شد

$$0.124 = 1/2^n$$

$$n = 3$$

بنابراین جدول ۲۰۱۰، برای پرتوهای 125 kV مقدار HVL برابر 2.0 cm بتون است. پس، ضخامت لازم برای حفاظ بتونی برابر 6 cm $3 \times 2.0 = 6$ خواهد شد.

(ب) سقف: پرتوهای پراکنده. برای محاسبه ضخامت حفاظ، به منظور تضعیف پرتوهای پراکنده تا 0.01 R ($3 \mu\text{C/kg}$) در هفته، از معادله (۱۷.۱۰) استفاده می‌کنیم. نخست، باید حجم کار را به دست آورد

$$W = 5 h/w \times 60 \text{ min/h} \times 375 \text{ mA} + 2 \text{ min/w} \times 200 \text{ mA} \\ = 1450 \text{ mA} \cdot \text{min/w}$$

دیگر مقادیر معلوم در معادله (۱۷.۱۰) عبارت اند از

$$a = 0.00015 \text{ (از جدول ۳.۱۰)}, T = 1, d_{\text{sca}} = 0.5 \text{ m},$$

$$d_{\text{sec}} = 275 \text{ m}, F = 400 \text{ cm}^2$$

$$K_{\text{ux}} = \frac{0.01}{0.00015 \times 1450} \times (0.5)^2 \times (275)^2 \times \frac{400}{400} = 772 \times 10^{-3}$$

با توجه به منحنی 125 kV_p در شکل ۱۳.۱۰ معلوم می شود که ضخامت حفاظ متناظر با (در ۱ متری) $K = 772 \times 10^{-3} \text{ R/mA} \cdot \text{min}$ عبارت است از 9 cm بتون.

اختلاف ضخامت سدهای لازم در برابر پرتوهای ناشی و پراکنده، برابر با 3 cm بتون است. چون این اختلاف از مقدار یکدهم - لایه (6.6 cm بتون، جدول ۲.۱۰) کمتر است، برای تعیین ضخامت حفاظ لازم، مقدار یک نیم - لایه (275 cm) به سد کلفت تر می افزاییم و سد مورد لزوم را که برابر 11 cm بتون است به دست می آوریم. بدین ترتیب معلوم می شود که هیچگونه حفاظ گذاری اضافی لازم نیست، زیرا ضخامت سقف از قبل برابر با 127 cm بتون بوده است.

(ج) دیوادی B : پرتوهای ناشی. ضریب تضعیف دیوادی B را می توان با استفاده از معادله (۲۷.۱۰) و مقادیر $d = 6/3728 = 1.8 \text{ m}$ و $t = 302 \text{ min}$ به دست آورد. اما، چون ضریب اشغال برای راهروی بساریک برابر $1/4$ است، باید این ضریب تضعیف را در ۴ ضرب کرد. از این رو، داریم

$$B_{Lx} = \frac{4 \times 0.01 \times 600 \times (1.8)^2}{302} = 0.257$$

برای حصول به این درجه از تضعیف، تعداد نیم - لایه های لازم عبارت است از

$$0.257 = 1/2^n$$

$$n = 2$$

از آنجا که برای پرتوهای 125 kV مقدار HVL برابر 275 cm بتون است، ضخامت سد لازم مساوی $2 \times 275 = 550 \text{ cm}$ بتون می شود.
(د) دیوادی B : پرتوهای پراکنده. اگر مقادیر معلوم

$$P = 0.01 R, W = 1450 \text{ mA} \cdot \text{min}/w \text{ (در ۱ متری)},$$

$$a = 0.0015 \text{ (از جدول ۳.۱۰)}, T = 1/4, d_{\text{sca}} = 0.05 \text{ m},$$

$$d_{\text{sec}} = 1.18 \text{ m}, F = 400 \text{ cm}^2$$

را در معادله (۱۵.۱۰) قرار دهیم، حاصل می شود

$$K_{\text{ux}} = \frac{0.01}{0.0015 \times 1450 \times 1/4} \times (0.05)^2 \times (1.18)^2 \times \frac{400}{400}$$

$$= 1.5 \times 10^{-2} R/\text{mA} \cdot \text{min} \text{ (در ۱ متری)}$$

با توجه به منحنی 125 kV_p در شکل ۱۳.۱۰ ملاحظه می شود که این مقدار K از حفاظتی بتونی به ضخامت 73 cm حاصل می شود.

چون اختلاف ضخامت بین سدهای لازم در برابر پرتوهای نشتی و پراکنده برابر 33 cm بتون است، و این مقدار هم از یکدهم - لایه $(6 \text{ cm}$ بتون، جدول ۲.۱۰) کمتر است، مقدار یک نیم - لایه بتون (20 cm) به سد کلفت تر اضافه می کنیم و بدین ترتیب، کل ضخامت لازم را برای سد فرعی برابر $93 \text{ cm} = 20 \text{ cm} + 73 \text{ cm}$ بتون به دست می آوریم.

همان طور که در شکل ۱۷.۱۰ نشان داده شده است، دیوار از آجرهای سفالی توخالی و گچ درست شده است. ضخامت معادل بتون را برای این دیوار، با استفاده از چگالی مصالح متداول ساختمانی از جدول ۴.۱۰، به ترتیب زیر محاسبه می کنیم

جدول ۴.۱۰ چگالی مصالح ساختمانی (مصالح تجار تی).

چگالی نمونه متوسط (g/cm^3)	گستره چگالی (g/cm^3)	مصالح
۱۰۹	۱۰۶-۲۰۵	آجر
۲۰۶۳	۲۰۶۰-۲۰۷۰	سنگ خارا (گرانیت)
۲۰۳۰	۱۰۸۷-۲۰۶۹	سنگ آهک
۲۰۷۰	۲۰۴۷-۲۰۸۶	سنگ مرمر
۱۰۵۴	—	سنگ گچ
۲۰۲۰	۱۰۹۰-۲۰۶۹	سنگ ماسه
۲۰۳۵	۲۰۲۵-۲۰۴۰	بتون سیلیسی
۱۰۹	۱۰۶-۲۰۵	سفال

بتون (ضخامت $\times$ چگالی) = دیوار (ضخامت $\times$ چگالی)

$$1.54 \text{ g/cm}^3 \times 2 \times \frac{5}{8} \text{ in} + 1.9 \text{ g/cm}^3 \times 2 \times \frac{1}{4} \text{ in} = 2.35 \text{ g/cm}^3 \times t \text{ in}$$

$$t = 1.63 \text{ in} = 4.1 \text{ cm (بتون)}$$

ضخامت سد لازم برای حفاظ برابر ۹.۳ cm بتون، یا ضخامت معادل آن از مصالح دیگر، است. چون در این ساختمان دیواری به ضخامت معادل ۴.۱ cm بتون وجود دارد، به ۵.۲ cm بتون اضافی که معادل با ۲.۶ برابر HVL است، نیاز خواهیم داشت. مقدار نیم-لایه سرب برای پرتوهای ۱۲۵ kV برابر ۰.۲۸ mm (جدول ۲.۱۰) است. ضخامت ورقه سربی که باید به دیوار گچ کاری شده اضافه شود، عبارت است از

$$2.6 \text{ HVL} \times 0.28 \text{ mm Pb/HVL} = 0.73 \text{ mm Pb}$$

جدول ۵.۱۰ فهرستی از ورقه‌های سربی تجارتي را نشان می‌دهد. در مثال بالا، عملاً از ورقه تجارتي اندکی بیشتر از ضخامت محاسبه شده استفاده خواهد شد (چون ضخامت محاسبه شده عملاً در بازار یافت نمی‌شود). هنگامی که دیوارهای اتاقی را در برابر پرتوهای x حفاظ‌گذاری می‌کنیم، ارتفاع پوشش سربی دستکم باید به ۷ ft (۲۱۳ cm) برسد.

حفاظ‌گذاری در برابر پرتوهای بتا

هنگام طراحی حفاظ در برابر میدانهای شدید پرتوهای بتا لازم است که به دو عامل توجه داشته باشیم: پرتوهای بتا، و تابش ترمزی ناشی از جذب در خود چشمه و جذب در حفاظ. به همین دلیل، حفاظ در برابر بتا از دو قسمت تشکیل می‌شود: جسمی با عدد اتمی پایین (که تولید تابش ترمزی در آن حداقل ممکن باشد) و با ضخامت کافی برای متوقف کردن تمام پرتوهای بتا، و به دنبال آن جسمی با عدد اتمی بالا و ضخامت کافی برای تضعیف شدت تابش ترمزی به سطحی قابل قبول.

مثال ۹.۱۰

می‌خواهیم ۵۰ میلی‌ترمکعب محلول محتوی (۱۰ Ci) ^{90}Sr از $37 \times 10^4 \text{ MBq}$ در حال تعادل با ^{90}Y (بدون در نظر گرفتن ظرف) را در آزمایشگاهی نگهداری کنیم. متخصص فیزیک بهداشت توصیه می‌کند که آهنگ دز معادل، در ۱ متری چشمه، نباید از مقدار 10 mrem/h (0.1 mSv/h) تجاوز کند. برای نگهداری این چشمه، ظرف و حفاظی طراحی کنید تا مقررات ایمنی تابش در آزمایشگاه رعایت شود.

جدول ۵.۱۰ ورقه‌های سربی تجاری.

ضخامت		وزن اسمی	
mm	in	#/ft ²	kg/m ²
۰.۰۷۹	۱/۳۲	۲	۱۰
۱.۰۰۰	۵/۱۲۸	۲½	۱۲
۱.۰۱۹	۳/۶۴	۳	۱۵
۱.۰۵۸	۱/۱۶	۴	۲۰
۱.۰۹۸	۵/۶۴	۵	۲۴
۲.۰۳۸	۳/۳۲	۶	۲۹
۳.۰۱۷	۱/۸	۸	۳۹
۴.۰۷۶	۳/۱۶	۱۲	۵۹
۶.۰۳۵	۱/۴	۱۶	۷۸
۸.۰۵۰	۱/۳	۲۰	۹۸
۱۰.۰۱۱	۲/۵	۲۴	۱۱۷
۱۲.۰۲۷	۱/۲	۳۰	۱۴۶
۱۶.۰۲۹	۲/۳	۴۰	۱۹۵
۲۵.۰۲۴	۱	۶۰	۲۹۳✓

حل: بیشینه انرژی و میانگین انرژی پرتوهای بتای ناشی از ^{90}Sr و ^{90}Y به قرار زیرند:

	$E_{\max}, \text{MeV}$	$\bar{E}, \text{MeV}$
^{90}Sr	۰.۵۴	۰.۱۹
^{90}Y	۲.۲۷	۰.۹۳

لازم است که حفاظ بتا آنچنان کلفت باشد که پرتوهای بتای ^{90}Y با انرژی ۲.۲۷ MeV را بایستاند. با توجه به شکل ۴.۵، برد بتای ۲.۲۷ MeV برابر ۱.۱۱ g/cm² است. برای نگهداری این محلول پرتوزا، یک بطری از جنس پلی اتیلن با گرانی ویژه ۰.۹۵،

به عنوان ظرف، در نظر می گیریم. در این صورت، ضخامت بدنه بطری چنین خواهد شد

$$E = \frac{1.1 \text{ g/cm}^2}{0.95 \text{ g/cm}^2} = 1.16 \text{ cm}$$

تابش ترمزی در این مورد اهمیت ویژه ای می یابد، زیرا ^{90}Sr و ^{90}Y گسیلنده های خالص بتا هستند و از همین رو، در شرایط عادی هیچ پرتوگامایی وجود ندارد که مستلزم حفاظ گذاری باشد. آهنگ دز پرتوهای ناشی از تابش ترمزی را، در ۱ متری چشمه، به کمک معادله (۱۱.۵) می توان بر آورد کرد

$$f = 3.5 \times 10^{-4} Z \times E_{\max}$$

در مثال اخیر، بخش بزرگی از انرژی پرتوهای بتا در آب جذب خواهد شد. اگر در معادله (۱۱.۵)، Z را با عدد اتمی متوسط آب یکسان بگیریم

$$Z_w = \frac{2}{18} \times 1 + \frac{16}{18} \times 8 = 7.22$$

و $E_{\max}$ را برابر 2.27 MeV قرار دهیم، f یا کسری از انرژی پرتوهای بتای ناشی از ^{90}Y که به تابش ترمزی تبدیل می شود، برابر 5.73×10^{-3} خواهد شد. آهنگ انرژی گسیل یافته از طریق بتاهای ناشی از ^{90}Y چنین است

$$E_{\beta} = 3.7 \times 10^{11} \text{ Bq} \times 1 \frac{\text{tps}}{\text{Bq}} \times 0.93 \frac{\text{MeV}}{d} = 3.44 \times 10^{11} \frac{\text{MeV}}{\text{s}}$$

چنانچه منشأ گسیل تابش ترمزی را به صورت نقطه ای در مرکز چشمه بتا تصور کنیم، آهنگ دز در فاصله ۱ متری این نقطه چنین می شود

$$\dot{D} = \frac{f \times E \text{ MeV/s} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \times \mu_e \text{ m}^{-1} \times 3.6 \times 10^3 \text{ s/h}}{1.293 \text{ kg/m}^3 \times 4\pi (1 \text{ m})^2 \times 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} / \text{Gy} \times 10^{-2} \text{ Gy/mSv}}$$

(۲۸.۱۰)

که در آن μ_e ضریب جذب انرژی از فوتونهای تابش ترمزی است. در امور مربوطه به حفاظت در برابر تابش، برای محاسبه آهنگ دز تابش ترمزی، انرژی فوتونها را برابر بیشینه انرژی پرتوهای بتا در نظر می گیرند. با قرار دادن مقدار $\mu = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ (از روی شکل ۱۸.۵)، آهنگ دز تابش ترمزی برای بتاهای ناشی از ^{90}Y ، در ۱ متری چشمه، برابر 21 mrem/h (21 mSv/h) به دست می آید. به همین ترتیب، آهنگ دز تابش برای بتاهای ^{90}Sr برابر 13 mrem/h (13 mSv/h) می شود.

اگر ضخامت حفاظ پیرامون ظرف محتوی محلول پرتوزا را t cm در نظر بگیریم، با استفاده از معادله (۱۹.۵) و مقادیر $\mu = 0.51 \text{ cm}^{-1}$ برای ضریب جذب خطی کل سرب در جذب پرتوهای 2.27 MeV ناشی از ^{90}Y و $\mu = 1.5 \text{ cm}^{-1}$ برای پرتوهای 0.54 MeV ناشی از ^{90}Sr ، می توان تضعیف آهنگ دز تابش ترمزی را محاسبه کرد. به علاوه، می دانیم که کل آهنگ دز ناشی از ^{90}Y و ^{90}Sr در خارج حفاظ نباید از 10 mrem/h (0.1 mSv/h) تجاوز کند. با توجه به این نکات، دستگاه معادلات زیر حاصل می شود

$$I_Y = 0.21e^{-0.51t}$$

$$I_{\text{Sr}} = 0.013e^{-1.5t}$$

$$I_Y + I_{\text{Sr}} = 0.1$$

که از حل آن، خواهیم داشت $t = 1.75 \text{ cm}$ (حفاظ سربی). در این مورد لزومی ندارد که ضریب تولید و انباشت را در نظر بگیریم، زیرا در محاسبه ضخامت حفاظ فرض شده است که انرژی تمام فوتونهای تابش ترمزی، با بیشینه انرژی ذرات بتای مولد پرتو x برابر است. از آنجا که این انرژی حد بالای انرژی تابش ترمزی است، و از آنجا که انرژی بخش بزرگی از تابش ترمزی خیلی کمتر از این انرژی حد بالاست، در محاسبه بالا ضخامت حفاظ لازم به طور مبالغه آمیزی برآورد شده است. این برآورد مبالغه آمیز تقریباً در همان حدودی است که ضریب تولید و انباشت را جبران می کند، و در نتیجه لازم نیست ضریب تولید و انباشت در نظر گرفته شود. بنابراین، محفظه محلول پرتوزا متشکل است از یک بطری پلی اتیلن به ضخامت 1.16 cm که در داخل یک ظرف سربی که ضخامت تمام سطوح آن 1.75 cm است قرار دارد. اما چنین محفظه ای خیلی سنگین خواهد بود، که البته راه چاره ای برای آن وجود دارد. کل مقدار سرب مصرف شده در حفاظ متناسب با مجذور قطر محفظه افزایش می یابد؛ از این رو، حتی اندک کاهش در قطری تواند وزن محفظه را به طور چشمگیری کاهش دهد. در صورتی که وزن محفظه مشکلی ایجاد کند، از طریق تقلیل ضخامت بطری پلی اتیلن می توان تا حدی از وزن آن کاست. چنانچه ضخامت بطری از 1.16 cm به 0.5 cm کاهش یابد، تمام بتاهای ^{90}Sr به علاوه قسمت اعظم بتاهای ^{90}Y متوقف خواهد شد. علاوه بر این، انرژی آن بتاهایی از چشمه ^{90}Y که عبور می کنند، به طور چشمگیری کاهش خواهد یافت. بدین ترتیب، تابش ترمزی ناشی از این بتاهای عبوری، سهم بسیار کوچکی در آهنگ دز پرتوهای خارج از حفاظ سربی خواهد داشت.

حفاظ گذاری در برابر نوترونها

حفاظ گذاری در برابر نوترونها، بر پایه کندی سازی نوترونهای تند و جذب کردن نوترونهای

گرمایی استوار است. در فصل ۵ دیدیم که تضعیف و جذب نوترون‌ها در پی یک رشته فرایندهای پیچیده تحقق می‌یابد. اما، به رغم این پیچیدگیها، حفاظهای لازم پیرامون چشمه‌های نوترون را می‌توان با استفاده از سطح مقطع حذف برآورد کرد. (برای نوترونهایی که انرژی‌شان حداکثر تا ۳۰ MeV باشد، سطح مقطع حذف در حدود سه چهارم سطح مقطع کل است.) در طراحی حفاظ در برابر نوترون‌ها، باید توجه داشت که جذب نوترون ممکن است به پرتوزایی بالقایی و همچنین به تولید پرتوهای گاما بینجامد.

مثال ۱۰.۱۰

برای یک چشمه نوترونی Pu-Be با فعالیت $(5 \text{ Ci}) (185 \times 10^4 \text{ MBq})$ که در هر ثانیه 5×10^6 نوترون گسیل می‌کند، حفاظی طراحی کنید که آهنگ دز در سطوح خارجی آن از $15 \mu\text{Sv/h}$ (1.5 mrem/h) تجاوز نکند. انرژی میانگین نوترونهای تولید شده در این چشمه برابر ۴ MeV است.

حل: حفاظی از آب در نظر می‌گیریم، و شعاع کمینه آن را در مورد حفاظ کروی حساب می‌کنیم. می‌دانیم که گیراندازی نوترون در هیدروژن منجر به تولید پرتو گامای ۲.۲۶ MeV می‌شود. برای آنکه دز مربوط به گاماها ناشی از گیراندازی نوترون را نیز در نظر بگیریم، حفاظ را چنان طراحی می‌کنیم که بیشینه دز نوترونهای تند در خارج از آن برابر $15 \mu\text{Sv/h}$ (1 mrem/h) باشد که متناظر است با شار تند $6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ (جدول ۵.۹). سطح مقطع کل نوترونهای ۴ MeV برای هیدروژن و اکسیژن، به ترتیب، عبارت‌اند از ۱۷۹ و ۱۷۷ بارن. چون در هر سانتی متر مکعب آب 6.7×10^{22} اتم هیدروژن و 3.35×10^{22} اتم اکسیژن وجود دارد، ضریب جذب خطی آب چنین می‌شود

$$\begin{aligned} \Sigma &= \frac{3}{4} (179 \times 10^{-24} \text{ cm}^2/\text{atom} \times 6.7 \times 10^{22} \text{ atom/cm}^3 \\ &\quad + 177 \times 10^{-24} \text{ cm}^2/\text{atom} \times 3.35 \times 10^{22} \text{ atom/cm}^3) \\ &= 0.138 \text{ cm}^{-1} \end{aligned}$$

که مقدار نیم - لایه متناظر با آن مساوی ۵۰.۱ cm می‌شود. چشمه Pu-Be را می‌توان یک چشمه نقطه‌ای نوترون پنداشت که شار نوترونی در فاصله‌ای از آن، هم به علت پاشیدگی عکس مجذور فاصله و هم به علت تضعیف در اثر آب، کاهش می‌یابد. اگر شدت چشمه را S نوترون در ثانیه، مقدار نیم - لایه را T سانتی متر، تعداد نیم - لایه‌ها را n ، و ضریب تولید و انباشت را B بگیریم، شار نوترونهای تند پس از عبور از ضخامت $nT \text{ cm}$ چنین خواهد شد

$$\phi = \frac{BS}{4\pi(nT)^2} \times \frac{1}{r^2} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s} \quad (29.10)$$

در مورد چشمه‌های نوترونی که فعالیتشان از مرتبه چند کوری باشد، ضخامت حفاظ نسبتاً زیاد است، و دزنایشی از تولید و انباشت نوترونهاى پراکنده قابل توجه خواهد شد. در يك حفاظ هیدروژنی که ضخامتش دستکم ۲۰ cm باشد، ضریب تولید و انباشت دز در حدود ۵ می‌شود. با قراردادن مقادیر $\phi = 6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ، $T = 5 \text{ cm}$ ، و $B = 5$ در معادله (۲۹.۱۰)، مقدار n تقریباً برابر ۷۷۸ HVL به دست می‌آید که متناظر است با ۳۹ cm آب. شار نوترونهاى گرمایی خارج شده از سطح يك حفاظ کروی از آب را می‌توان به کمک معادله (۵۲.۵) بر آورد کرد

$$\phi_{th} = \frac{n_0}{\pi R D} e^{-R/L}$$

از آنجا که شعاع حفاظ محاسبه شده در بالا خیلی بزرگتر از طول پخش نوترونهاى تند (۵۷۵ cm) است، در این محاسبات می‌توان فرض کرد که همه نوترونهاى تند گرمایی می‌شوند، و نوترونهاى گرمایی از مرکز چشمه به طرف خارج در حال پخش‌اند. پس از قراردادن مقادیر در معادله (۵۲.۵)، حاصل می‌شود

$$\phi_{th} = \frac{5 \times 10^6 \text{ n/s}}{4\pi \times 39 \text{ cm} \times 0.16 \text{ cm}} e^{-39/2788} = 0.08 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$$

این شار نوترونهاى گرمایی، در مقایسه با بیشینه شار گرمایی مجاز ($680 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$)، آنچنان کوچک است که در عمل می‌شود از آن صرف‌نظر کرد.

گیراندازی يك نوترون گرمایی در يك اتم هیدروژن، به گسیل يك فوتون گامای 2.26 MeV می‌انجامد. بنا بر این، حفاظ آب همانند يك چشمه گسترده پرتوهای گاما عمل می‌کند. چون شار نوترونهاى خارج شده از سطح حفاظ (در مجموع) برابر $608 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ است، تعداد کل نوترونهاى خارج شده از کره‌ای به شعاع ۳۹ cm برابر $1.12 \times 10^5 \text{ n/s}$ ، یا تقریباً معادل ۲۴٪ از نوترونهاى چشمه خواهد شد. ۹۷٪ باقیمانده نوترونهاى چشمه در حفاظ آبی جذب می‌شوند، و بدین ترتیب، میانگین «فعالیت ویژه» فوتونهاى 2.26 MeV عبارت است از

$$\frac{499 \times 10^6 \text{ فوتون/s}}{\frac{4}{3}\pi(39 \text{ cm})^3} = 1997 \text{ Bq/cm}^3 (0.53 \text{ pCi/cm}^3)$$

آهنگ دز، در سطح کره‌ای که به طور یکنواخت محتوی گسیلنده‌های گاما باشد، بنا بر معادلات (۴۰.۶) و (۴۵.۶) چنین می‌شود

$$\dot{D} = \frac{1}{2} \times C \Gamma \times \frac{4\pi}{\mu} (1 - e^{-\mu r}) \quad (30.10)$$

پس از قراردادن مقادیر $\Gamma = 2.7 \text{ mGy/h} \cdot \text{MBq}$ ($10^4 \text{ mrad/h} \cdot \text{mCi}$) در $r = 39 \text{ cm}$ ، $\mu = 0.046 \text{ cm}^{-1}$ برای فوتونهای 2.26 MeV در آب، و $r = 39 \text{ cm}$ خواهیم داشت

$$\dot{D} = \frac{1}{2} \times 1.97 \times 10^{-6} \times 2.7 \times \frac{4\pi}{4\pi \times 10^{-2}} (1 - e^{-0.046 \times 39})$$

$$= 6 \times 10^{-3} \text{ mGy/h} (0.6 \text{ mrad/h})$$

بدین ترتیب، آهننگ دز ناشی از نوترونهای و پرتوهای گاما در سطح حفاظ برابر $16 \mu\text{Sv/h}$ (یا 1.6 mrem/h) می شود، که به رقم مورد نظر $15 \mu\text{Sv/h}$ (1.5 mrem/h) خیلی نزدیک است. آهننگ دز گاما از دو راه قابل کاهش است: یا از طریق حل کردن ماده ای با عدد اتمی بالا (مثل BaCl_2) در آب، ضریب جذب پرتو گاما را در آب افزایش می دهیم؛ یا اینکه آهننگ تولید پرتوهای گاما را در آب کاهش می دهیم. از این دو راه حل، راه دوم آسانتر است. زیرا صرفاً با حل کردن ترکیبی از بور (B) در آب، به آسانی می توان به این هدف رسید. اتم بسور نوترونهای گرمایی را با سطح مقطع 755 بارن گیر می اندازد، و در اثر آن واکنش ${}^1_0\text{B} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{H} + \gamma$ (0.48 MeV) حاصل می شود. در 93% از موارد گیراندازی، گامای 0.48 MeV گسیل می شود. برای این گونه کاربردها، یا از بوراکس (سدیم تترا بورات، $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) و یا از اسید بوریک (H_3BO_3) که هر دو ارزان و در آب هم خیلی زیاد قابل حل اند، می توان استفاده کرد. اگر هدف فرونشانی تابش گاما باشد، کاربرد اسید بوریک بر بوراکس ترجیح دارد، زیرا سدیم موجود در بوراکس سطح مقطع نسبتاً بالایی دارد و با مقطعی معادل 505 mb در واکنش ${}^{23}_{11}\text{Na}(n, \gamma){}^{24}_{11}\text{Na}$ شرکت می کند. در نتیجه این واکنش، یک فوتون گامای 0.69 MeV و یک هسته پرتوزای ${}^{24}_{11}\text{Na}$ حاصل می شود. این هسته پرتوزا در هر فروپاشی، یک ذره بتای 1.39 MeV و همچنین دو فوتون گاما با انرژیهای 1.37 MeV و 2.75 MeV از خود گسیل می کند.

انحلال پذیری اسید بوریک در آب، در دمای اتاق، برابر 63.2 g/l است. وزن مولکولی H_3BO_3 برابر 61.84 است. تراکم اتمهای بور در محلول اشباع شده اسید بوریک چنین به دست می آید

$$\frac{63.2 \text{ g/l} \times 10^{-3} \text{ l/ml} \times 6.02 \times 10^{23} \text{ مولکول/mol} \times 1 \text{ atom/mol}}{61.84 \text{ g/mol}}$$

$$= 6.17 \times 10^{20} \frac{\text{atom}}{\text{ml}}$$

چنانچه نسبت سطح مقطعهای ماکروسکوپیکی هیدروژن و بور را، در گیراندازی نوترونهای

گرمایی، در نظر بگیریم، داریم

$$\frac{\sum H}{\sum B} = \frac{0.13 \text{ cm}^{-1}}{0.42 \text{ cm}^{-1}} = 0.31$$

شار پرتوهای گامای 226 MeV ناشی از گیراندازی نوترون در هیدروژن، و در نتیجه آهنگ دز گاما، به همین نسبت کاهش خواهد یافت و به

$$0.31 \times 6 \times 10^{-3} = 1.88 \times 10^{-3} \text{ mGy/h} (0.18 \text{ mrad/h})$$

خواهد رسید. آهنگ دز گاماها حاصل از گیراندازی نوترون در ^{10}B را، با استفاده از معادله (۳۰.۱۰) و قراردادن مقادیر

$$C = 0.69 \times 0.93 \times 19.7 \times 10^{-6} \text{ MBq/cm}^3 (3.4 \times 10^{-7} \text{ mCi/cm}^3)$$

برای فعالیت ویژه فوتونها، و ضریب $\mu = 0.097 \text{ cm}^{-1}$ برای جذب فوتونهای 0.48 MeV در آب، و

$$\Gamma = 0.62 \text{ mGy} \cdot \text{cm}^2 / \text{MBq} \cdot \text{h} (2300 \text{ mrad} \cdot \text{cm}^2 / \text{mCi} \cdot \text{h})$$

می توان محاسبه کرد که مقدار آن در حدود $7.7 \times 10^{-4} \text{ mGy/h} (0.077 \text{ mrad/h})$ به دست می آید. بدین ترتیب، اگر آب حفاظ را از اسید بوریک اشباع سازیم، آهنگ دز معادل برای انواع پرتوها چنین خواهد شد

$$\text{آهنگ دز ناشی از نوترونهای تند} = 10 \mu\text{Sv/h} (1 \text{ mrem/h})$$

$$\text{آهنگ دز گامای ناشی از گیراندازی نوترون در هیدروژن} = 1.88 \mu\text{Sv/h} (0.18 \text{ mrem/h})$$

$$\text{آهنگ دز گامای ناشی از گیراندازی نوترون در بور} = 0.8 \mu\text{Sv/h} (0.08 \text{ mrem/h})$$

$$\text{آهنگ دز کل} = 12.6 \mu\text{Sv/h} (1.26 \text{ mrem/h})$$

مسائل

۰۱ یک چشمه نوترونی Po-Be در هر ثانیه 10^7 نوترون، با انرژی متوسط 4 MeV ، گسیل می کند. می خواهیم این چشمه را در حفاظی از پارافین، با ضخامت کافی، قرار دهیم تا شار نوترونهای تند در سطح آن به $10 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ کاهش یابد. در اینجا، فرض می شود که پارافین اساساً متشکل است از CH_2 و چگالی آن برابر 0.89 g/cm^3 است.

(الف) حداقل ضخامت حفاظ پارافین چقدر است؟

(ب) اگر طول کندشدگی را 6 cm ، طول پخش گرمایی را 3 cm ، و ضریب پخش را 0.381 cm بگیریم، شار نوترونهای گرمایی نشت یافته از سطح حفاظ چقدر خواهد شد؟

(ج) آهننگ دز پرتوهای گامای ناشی از گیراندازی نوترون در هیدروژن، در سطح

حفاظ پارافین چقدر است؟

۲. يك ماشين درمانی پرتو x با ولتاژ 250 kV_p و جریان 20 mA کار می کند. آهننگ پرتو دهی در فاصله 100 سانتی متری (هدف تا پوست) برابر 20 R/min است. حجم کار در هفته برابر $10000 \text{ mA} \cdot \text{min}$ است. لامپ مولد پرتوهای x در جهت قائم و روبه پایین نصب شده است. در فاصله 4 متری هدف، يك اتاق انتظار بدون کنترل قرار دارد. اگر ضخامت دیوار اتاق که از سفال و گچ (به چگالی 2.35 g/cm^3) ساخته شده است، برابر 2 in باشد، ضخامت پوشش سربی لازم که باید به دیوار افزوده شود چقدر است؟

۳. يك دستگاه پرتودرمانی ^{60}Co با فعالیت (2000 Ci) یا $7.4 \times 10^{13} \text{ Bq}$ را می خواهیم در اتاقی بتونی در زیرزمین يك بیمارستان چنان نصب کنیم که فاصله چشمه از دیوارهای شمالی و غربی که ضخامت هر کدام 30 in است، برابر 4 m باشد. در آن سوی دیوار شمالی، يك اتاق کاملاً اشغال شده تحت کنترل قرار دارد. پشت دیوار غربی، محوطه پارکینگ عمومی است. قرار است که جهت باریکه مفید به طرف دیوار شمالی باشد، و حداکثر 5 h در هر هفته در کار پرتودرمانی مورد استفاده باشد. جهت باریکه، در هر هفته به مدت 1 h ، به طرف دیوار غربی قرار می گیرد. در صورتی که فقط پرتوهای باریکه اصلی در نظر گرفته شوند، برای هریک از دیوارها، چقدر حفاظ اضافی لازم خواهد شد؟

۴. پرتو - شیمی دانی می خواهد يك شیشه كوچك محتوی محلول ^{60}Co با فعالیت $(\sim 50 \text{ mCi})$ یا $2 \times 10^9 \text{ Bq}$ را از نقطه ای به نقطه دیگر منتقل کند. مدت زمان لازم برای این انتقال برابر 3 min برآورد شده است. برای آنکه دز پرتوگیری ایسن شخص در حین انتقال شیشه از (6 mrad) یا $60 \mu\text{Gy}$ تجاوز نکند، حداقل طول انبر لازم برای حمل و نقل این شیشه چقدر باید باشد؟

۵. برای مشاهده ایزوتوپی که پرتوهای گامای 1 MeV گسیل می کند، می خواهیم با استفاده از يك ظرف شیشه ای مکعب مستطیلی محتوی محلول اشباع شده KI پنجره ای بسازیم. به فرض آنکه شرایط هندسی خوب، ضخامت محلول 10 cm ، و دیواره های ظرف شیشه ای از لحاظ خواص تضعیف معادل 1 mm سرب باشند، ضریب تضعیف چقدر خواهد شد؟ محلول اشباع شده KI را می توان با افزودن 30 گرم KI به 21 ml آب به دست آورد که در این صورت، 30 ml محلول در دمای 25°C حاصل می شود. سطح مقطع تضعیف کل برای پرتوهای گامای 1 MeV در عناصر موجود در محلول عبارت اند از:

$$K = 4 \text{ b} \quad H = 0.2 \text{ b}$$

$$I = 12 \text{ b} \quad O = 1.7 \text{ b}$$

۶. ورقه های سربی از آلیاژی ساخته می شوند که $87\% \text{ Pb}$ ، $12\% \text{ Sn}$ ، و $1\% \text{ Cu}$ دارند. گرانی ویژه آلیاژ برابر 10.4 است. اگر ضریب تضعیف جرمی این

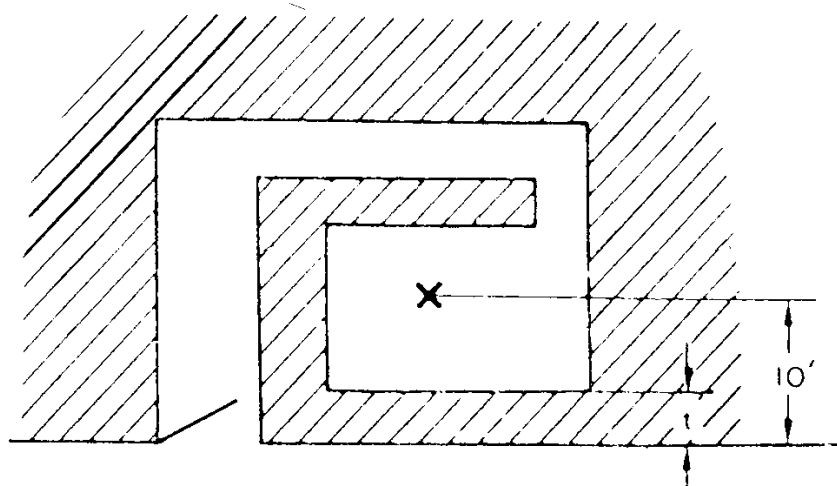
سه عنصر برای پرتوهای x با طول موج $0.098 \text{ \AA}$ ، به ترتیب برابر با $17,350$ ، $17,350$ و $17,350 \text{ cm}^2/\text{g}$ ، و گرانی ویژه آنها به ترتیب برابر با 7.3 ، 11.3 و 8.9 باشد،
(الف) ضرایب جذب خطی و جرمی ورقه سربی را به دست آورید؛

(ب) برای آنکه شدت پرتوهای گامای حاصل از ^{57}Co را با ضریب ۲۵ تضعیف کنیم، چه ضخامتی از این ورقه‌های سربی لازم خواهد شد؟

۷. یک سرنگ مخصوص زیر پوست که به وسیله آن محلول ^{90}Sr تزریق می‌شود، مخزنی شیشه‌ای به ضخامت 1.5 mm دارد. چگالی این شیشه برابر 2.5 g/cm^3 است. برای حفاظت در برابر ذرات بتا، این سرنگ را در پوششی از لوسیت قرار می‌دهند. چگالی لوسیت 1.2 g/cm^3 است. برای آنکه هیچ ذره بتایی از پوشش لوسیت خارج نشود، ضخامت پوشش چند میلی‌متر باید باشد؟

۸. اتاق مخصوص نگهداری یک چشمه ^{137}Cs با فعالیت (2000 Ci) یا $7.4 \times 10^{13} \text{ Bq}$

به شکل زیر است



ضخامت دیوار بتونی t را چنان محاسبه کنید که آهنگ پرتودهی در سطوح خارجی آن، از (2.5 mR) یا $2.5 \mu\text{C/kg}$ در ساعت تجاوز نکند.

۹. برای آنکه با استفاده از یک جفت دستکش بتوانیم دستهایمان را در برابر تابش

^{32}P محافظت کنیم، حداقل چگالی - ضخامت آن چقدر باید باشد؟

۱۰. یک چشمه رادیم محتوی 50 mg Ra ، با پوسته‌ای به ضخامت 5 mm از

Pt ، به صورت کپسول درآمده است. هنگامی که این چشمه را در یک محفظه سربی قرار می‌دهیم، آهنگ پرتودهی آن در ۱ متری چشمه برابر (21 mR) یا $21 \mu\text{C/kg}$ در ساعت می‌شود. چنانچه بخواهیم از همین محفظه برای نگهداری ^{137}Cs استفاده کنیم، چند MBq از این عنصر را برای مدت 4 h می‌توان در آن نگهداری کرد، بدون آنکه پرتودهی در 50 سانتی متری چشمه از (40 mR) یا $40 \mu\text{C/kg}$ تجاوز کند؟

۱۱. برای اشتغال در میدان تابش، بیشینه دز معادل برابر با (300 mrem) یا 3 mSv

مقرر شده است. حداکثر زمان کار در یک میدان تابش متشکل از سه نوع پرتو، به شرح زیر،

چقدر است: پرتوهای گاما با آهنگ $6 \mu\text{C/kg} (20 \text{ mR})$ در ساعت، نوترونهای تند با آهنگ $50 \mu\text{Gy} (4 \text{ mrad})$ در ساعت، و نوترونهای گرمایی با آهنگ $50 \mu\text{Gy} (5 \text{ mrad})$ در ساعت؟

۱۲. قطعه‌ای که در فاصله ۲ متری از یک دریچه آلوده به ^{137}Cs قرار گرفته است، نیاز به تعمیر دارد. آهنگ پرتودهی در ۳۰ سانتی‌متری دریچه برابر 500 R/h (0.13 C/kg.h) است. اگر مدت زمان تعمیر ۴ ساعت برآورد شده باشد، برای محدودسازی دز معادل شخص تعمیرکار به $1 \text{ mSv} (100 \text{ mrem})$ ، به چه ضخامتی از حفاظ سربی نیاز خواهیم داشت؟

۱۳. یک چشمه «نقطه‌ای» ^{60}Co با فعالیت $277 \text{ Ci} (100000 \text{ MBq})$ را، با استفاده از 10 cm Pb حفاظ‌گذاری کرده‌ایم. آهنگ پرتودهی را، در فاصله 1.25 m از چشمه، حساب کنید.

۱۴. یکی از پیچهای نصب شده در محفظه یک رآکتور شل شده است. جنس این پیچ از فولاد زنگ‌نزن است. می‌خواهیم، به کمک مجموعه‌ای از ابزارهایی که از راه دور به کار گرفته می‌شوند، این پیچ را برای واری و مطالعه ازجا درآوریم. این پیچ به مدت ۹۰۰ روز در شار متوسط نوترونهای گرمایی $2 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ قرار داشته است، و ۲۱ روز پس از خاموش شدن رآکتور ازجا درآورده می‌شود. در صورتی که وزن پیچ برابر 200 g و ترکیب وزنی آن به شرح زیر باشد، آهنگ دز پرتوهای گامای آن را در ۱ متری حساب کنید.

عنصر	Fe	Ni	Mn	C
درصد	۸۰٪	۱۹٪	۵٪	۵٪

۱۵. سطحی دایره‌ای شکل به قطر 1 m ، به طور تصادفی با ^{131}I با فعالیت $10 \text{ MBq} (270 \mu\text{Ci})$ آلوده شده است. حداکثر آهنگ دز معادل، در ۱ متری بالای سطح آلوده، چقدر است؟

۱۶. یک محفظه سربی کروی طراحی کنید که آهنگ دز ناشی از یک چشمه ^{24}Na با فعالیت $135 \text{ Ci} (5 \times 10^{10} \text{ Bq})$ را، در فاصله ۱ متری، به $100 \mu\text{Gy/h}$ (10 mrad/h) تضعیف کند. (ابعاد فیزیکی چشمه آنچنان کوچک است که می‌شود آن را «نقطه‌ای» پنداشت.)

۱۷. برای کاهش شدت یک باریکه موازی از پرتوهای x به انرژی 10 MeV ، از شدت 10^4 mW/cm^2 به شدت متناظر با $2.5 \times 10^{-2} \text{ cSv/h}$ ($2.5 \times 10^{-3} \text{ R/h}$) سانتی‌سیورت در ساعت، به چه ضخامتی از بتون استاندارد نیازمندیم؟

۱۸. یک چشمه نوترونی Ra-Be ، به ازای هر گرم رادیم، در حدود 10^7 نوترون تند (با انرژی متوسط 4 MeV) گسیل می‌کند. چه کسری از دز معادل ناشی از چشمه بدون حفاظ، مربوط به نوترون‌هاست؟

۰۱۹. بنا بر مقررات ترابری، بسته‌ای از مادهٔ پرتوزا، هنگامی قابل حمل است که بیشینهٔ آهنگ دز معادل در سطح بسته برابر 2 mSv/h (200 mrem/h)، و در فاصلهٔ ۱ متری سطح برابر 10 mrem/h (1 mSv/h) باشد. برای دورریزی محلول پسماندهٔ ^{137}Cs ، آن را با سیمان مخلوط می‌کنیم. به منظور حمل این مخلوط به محل دفن آن، مخلوط را در محفظه‌های استوانه‌ای از جنس پلی اتیلن، به قطر 30 cm و حجم 20 l ، قالب‌گیری می‌کنیم. بیشینهٔ فعالیت ویژهٔ بتون حاصل، چقدر می‌تواند باشد؟

۰۲۰. در یک آزمایشگاه پرتو-دارویی، وظیفهٔ یکی از کارکنان این است که ۵ روز در هفته و هر روز به مدت ۱ ساعت، با چشمه‌های ^{125}I با فعالیت 5000 MBq (135 mCi)، ^{198}Au با فعالیت 4000 MBq (108 mCi)، و ^{24}Na با فعالیت 2000 MBq (54 mCi) به طور همزمان کار کند. دورهٔ اشتغال به این کار، محدودیت زمانی ندارد. متوسط دز معادل برای این شخص، در ۷ ساعت باقیمانده از هر روز برابر 1 mSv (1 mrem) است. بدن این شخص هنگام کار با این چشمه‌ها، در فاصلهٔ 75 cm از چشمه‌ها قرار می‌گیرد، و ابزار کار چنان است که دستان وی به آن سوی حفاظ وارد نمی‌شود.

(الف) قدرت چشمه، در هر یک از این چشمه‌ها چقدر است؟

(ب) اگر بخواهیم دز معادل هفتگی او، مطابق رهنمود ALARA، در محدودهٔ

$1/10$ بیشینهٔ دز مجاز قرار گیرد، ضخامت حفاظ سربی لازم چقدر است؟

۰۲۱. برای یک چشمهٔ «نقطه‌ای» ^{90}Sr با فعالیت 27 Ci (10^{11} Bq)، حفاظی کروی طراحی کنید که آهنگ دز معادل در سطح آن از 2 mSv (200 mrem) در ساعت تجاوز نکند. آهنگ دز معادل در فاصلهٔ ۱ متری چشمهٔ حفاظدار چقدر است؟

حفاظت در برابر تابش داخلی

خطر تابش داخلی

تابش داخلی زمانی ایجاد می‌شود که بدن از داخل یا از خارج با يك ماده ایزوتوپ پرتوزا آغشته شده باشد. از این رو، حفاظت در برابر تابش داخلی با جلوگیری از آلودگی یا آغشتگی مواد پرتوزا یا کمینه‌سازی آن، در تماس با سطح بدن و یا در داخل بدن افراد سروکار دارد. این مسئله را می‌توان با طرح برنامه‌ای در جهت کنترل آلودگی محیط زیست در حد مجاز و در پایینترین سطح ممکن حل کرد. نگه داشتن آلودگی محیط زیست در پایینترین سطح ممکن از لحاظ حفاظت در برابر تابش داخلی بسیار مهم است. پرتوگیری از تابش خارجی ناشی از تابشی است که از چشمه‌های بیرون از بدن گسیل می‌شود. در این مورد هیچگونه تماس مستقیمی با چشمه تابش وجود ندارد و هنگامی که شخص ناحیه تابش را ترك می‌کند یا چشمه تابش از آن ناحیه دور می‌شود، پرتوگیری نیز متوقف می‌شود. از آنجا که تابش خارجی ممکن است نسبتاً با سهولت و دقت اندازه‌گیری شود، خطرات واقعی یا احتمالی را می‌توان با اطمینان بسیار زیادی تخمین زد. از سوی دیگر، در مورد آلودگی چون مواد پرتوزا روی بدن یا داخل بدن رسوب می‌کند، شخص آلوده حتی بعد از ترك ناحیه آلوده نیز همچنان در معرض پرتوگیری خواهد بود. به علاوه، ایزوتوپهای پرتوزا ممکن است در داخل بدن به‌طور سیستماتیک تثبیت شوند. در این صورت خارج کردن فوری آنها (در موارد ممکن) نسبتاً با اشکال توأم است. در این موارد، برای