فصل

۶

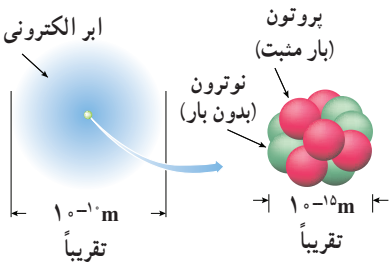
آشنایی با فیزیک هسته‌ای

چاقوی گاما (جراحی مغز بدون چاقو) جایگزینی مناسب برای جراحی‌های سنتی و یا روش‌هایی است که در آن کل مغز در معرض تابش قرار می‌گیرد. از این روش در علم روانپزشکی نیز برای درمان وسواس، افسردگی اساسی و اختلالات شدید اضطرابی استفاده می‌شود. این کار چگونه انجام می‌شود؟

بخش‌ها

۶ـ۱ ساختار هسته
۶ـ۲ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر
۶ـ۳ شکافت هسته‌ای
۶ـ۴ گداخت (همجوشی) هسته‌ای

فیزیک هسته‌ای، شاخه‌ای از فیزیک است که در آن با ساختار، برهم‌کنش‌ها و واپاشیِ هسته‌های اتمی سروکار داریم. بخش عمده‌ای از پیشرفت فیزیک هسته‌ای، مدیون تحلیل نتایج آزمایش‌ها و اندازه‌گیری‌هایی است که طی قرن گذشته توسط دانشمندانی از حوزه‌های فیزیک و شیمی انجام شده است. آنچه بیش از همه منجر به گسترش فیزیک هسته‌ای شد، به تحولاتی مربوط است که با ساخت شتاب‌دهنده‌های ذرات در سال ۱۹۳۲ میلادی آغاز شد. در این فصل پس از آشنایی مقدماتی با ساختار هسته و پرتوزایی طبیعی، با شکافت و هم‌جوشی هسته‌ای نیز آشنا می‌شوید.



شکل ۶ــ۱ مقایسهٔ ابعاد اتم و هسته به‌طور تقریبی

۶ــ۱ ساختار هسته

کشف پرتوزایی طبیعی در سال ۱۸۹۶ میلادی توسط فیزیک‌دان فرانسوی، هانری بکرل، آغازی برای پی بردن به وجود هستهٔ اتم بود. با کاوش درون اتم، در مرکز آن، هسته را می‌یابیم که شعاع آن تقریباً $\frac{۱}{۱۰۰۰۰۰}$ شعاع اتم است (شکل ۶ــ۱).

هستهٔ اتم از نوترون‌ها و پروتون‌ها تشکیل شده است که به‌طور کلی **نوکلئون** نامیده می‌شوند. نوترون، در سال ۱۹۳۲ میلادی توسط فیزیک‌دان انگلیسی، جیمز چادویک، کشف شد. نوترون بار الکتریکی ندارد، و جرمش اندکی بیشتر از پروتون است (جدول ۶ــ۱). جرم اتم‌ها و همچنین اجزای تشکیل‌دهندهٔ اتم را، افزون بر یکای کیلوگرم با یکای جرم اتمی نیز بیان می‌کنند.

* در شیمی ۱ دیدید $\frac{۱}{۱۲}$ جرم اتم کربن ۱۲ را یکای جرم اتمی (atomic mass unit) می‌نامند و آن را به‌اختصار با amu یا u نشان می‌دهند. بنا به این تعریف، جرم اتم کربن ۱۲، دقیقاً برابر ۱۲/۰۰۰۰۰۰u است.

جدول ۶ــ۱ برخی از ویژگی‌های فیزیکی ذرات تشکیل‌دهندهٔ اتم

ذره	بار الکتریکی (C)	جرم	
		کیلوگرم (kg)	یکای جرم اتمی (u)*
الکترون	$-۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$	$۹/۱۰۹۳۸۹\times۱۰^{-۳۱}$	$۵/۴۸۵۸\times۱۰^{-۴}$
پروتون	$+۱/۶\times۱۰^{-۱۹}$	$۱/۶۷۲۶۲۲\times۱۰^{-۲۷}$	۱/۰۰۷۲۷۶
نوترون	۰	$۱/۶۷۴۹۲۹\times۱۰^{-۲۷}$	۱/۰۰۸۶۶۴

هانری بکرل (۱۹۰۸ــ۱۸۵۲م.)

فیزیک‌دان فرانسوی در سال ۱۸۹۲ به‌عنوان استاد موزهٔ ملی تاریخ طبیعی پاریس انتخاب شد. وی نخستین دانشمندی است که ــ در سال ۱۸۹۶ و در حالی که مشغول بررسی خاصیت فسفرسانس نمک‌های اورانیم بود ــ پدیدهٔ پرتوزایی را کشف کرد. بکرل در سال ۱۹۰۳، به همراه ماری کوری و پیر کوری جایزهٔ نوبل فیزیک را به‌خاطر کشف پرتوزایی طبیعی دریافت کرد. به افتخار فعالیت‌های وی در زمینهٔ پرتوزایی، یکای SI برای فعالیت پرتوزایی، بکرل (Bq) نام‌گذاری شده است.

تعداد پروتون‌های هسته را عدد اتمی (Z) می‌نامند و در عنصرهای مختلف متفاوت است. در یک اتم خنثی، تعداد پروتون‌های هسته با تعداد الکترون‌های دور هسته برابر است. تعداد نوترون‌های هسته، عدد نوترونی (N) نامیده می‌شود. همچنین مجموع تعداد کل پروتون‌ها و نوترون‌ها را عدد جرمی (A) می‌نامند.

$$\underbrace{A}_{\text{تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها (عدد جرمی)}} = \underbrace{Z}_{\text{تعداد پروتون‌ها (عدد اتمی)}} + \underbrace{N}_{\text{تعداد نوترون‌ها (عدد نوترونی)}} \qquad (۶ــ۱)$$

برای یک عنصر با نماد شیمیایی X، نماد هسته به‌صورت زیر نشان داده می‌شود[۱] :

$$\begin{matrix} \text{عدد جرمی} \rightarrow A \\ \text{عدد اتمی} \rightarrow Z \end{matrix} \quad X \quad \begin{matrix} \leftarrow \text{نماد عنصر} \\ \leftarrow \text{عدد نوترونی} \end{matrix} \qquad N$$

مشخص کردن N در نمادنویسی بالا ضروری نیست؛ زیرا می توان آن را از رابطهٔ ۶ــ۱ به‌دست آورد. همچنین در بسیاری موارد Z را هم می‌توان ذکر نکرد؛ زیرا نماد شیمیایی عنصر، نشان‌دهندهٔ مقدار Z است.

برای مثال، هستهٔ اتم آلومینیم را به‌جای $^{27}_{13}Al_{14}$ می‌توان به‌صورت $^{27}_{13}Al$ یا ^{27}Al نمایش داد.

ایزوتوپ‌ها : ویژگی‌های هسته را تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های آن تعیین می‌کند. خواص شیمیایی هر اتم را تعداد پروتون‌های هسته (عدد اتمی Z) تعیین می‌کند. به همین سبب هسته‌هایی که تعداد پروتون مساوی ولی تعداد نوترون متفاوت دارند خواص شیمیایی یکسانی دارند، در نتیجه این هسته‌ها در جدول تناوبی عناصر هم‌مکان هستند و بنابراین ایزوتوپ (هم‌مکان) نامیده می‌شوند. به طور مثال، کربن به دو صورت پایدار و با درصدهای فراوانی بسیار متفاوتی در طبیعت یافت می‌شود که یکی از ۶ پروتون و ۶ نوترون ($^{12}_{6}C$)، و دیگری از آنها از ۶ پروتون و ۷ نوترون ($^{13}_{6}C$) تشکیل شده است. این دو هسته، ایزوتوپ‌های کربن هستند. جرم‌های اتمی درج شده در جدول تناوبی عناصر، میانگین جرم‌های اتمی ایزوتوپ‌های مختلف هر عنصر است که با توجه به درصد فراوانی آنها حساب شده‌اند. به‌جز هیدروژن، ایزوتوپ‌های مختلف یک هسته را با نام همان هسته مشخص می‌کنند (جدول ۶ ــ۲).

جیمز چادویک (۱۹۷۴ــ۱۸۹۱م.)
فیزیک‌دان انگلیسی، پس از طی دورهٔ کارشناسی و کارشناسی ارشد در دانشگاه منچستر، تحقیقاتش را زیر نظر رادرفورد ادامه داد. در سال ۱۹۱۴ برای نخستین بار، طیف پیوستهٔ پرتوهای بتا را که از بعضی عناصر پرتوزا تشکیل می‌شد کشف کرد. اما مهم‌ترین دستاورد چادویک، کشف نوترون در سال ۱۹۳۲ بود که حاصل مدت طولانی همکاری با رادرفورد بود. چادویک جایزهٔ نوبل فیزیک ۱۹۳۵ میلادی را به این منظور دریافت کرد.

جدول ۶ ــ۲ ایزوتوپ‌های مختلف چند عنصر و درصد فراوانی آنها در طبیعت

نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت	نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت
هیدروژن ۱	H	۱	۰	۹۹/۹۸۸۵	کربن ۱۳	^{13}C	۶	۷	۱/۰۷
دوتریم (هیدروژن ۲، ^{2}H)	D	۱	۱	۰/۰۱۱۵	کربن ۱۴	^{14}C	۶	۸	یافت نمی‌شود
تریتیم (هیدروژن ۳، ^{3}H)	T	۱	۲	بسیار نادر	اورانیم ۲۳۵	^{235}U	۹۲	۱۴۳	۰/۷۱۶
کربن ۱۲	^{12}C	۶	۶	۹۸/۹۳	اورانیم ۲۳۸	^{238}U	۹۲	۱۴۶	۹۹/۲۸۴

تمرین ۶ــ۱

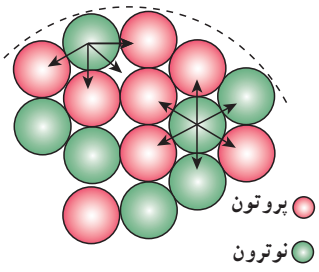
با توجه به آنچه تاکنون دیدید و همچنین با استفاده از جدول تناوبی عناصر، که در پیوست کتاب آمده است، نماد هسته را در هر یک از موارد زیر تعیین کنید.

الف) ایزوتوپ فلوئور (F) با عدد نوترونی ۱۰

ب) ایزوتوپ قلع (Sn) با عدد نوترونی ۶۶

۱ــ در کتاب‌های تخصصی فیزیک هسته‌ای، این نماد را نماد نوکلوئید (nuclide) می‌نامند.

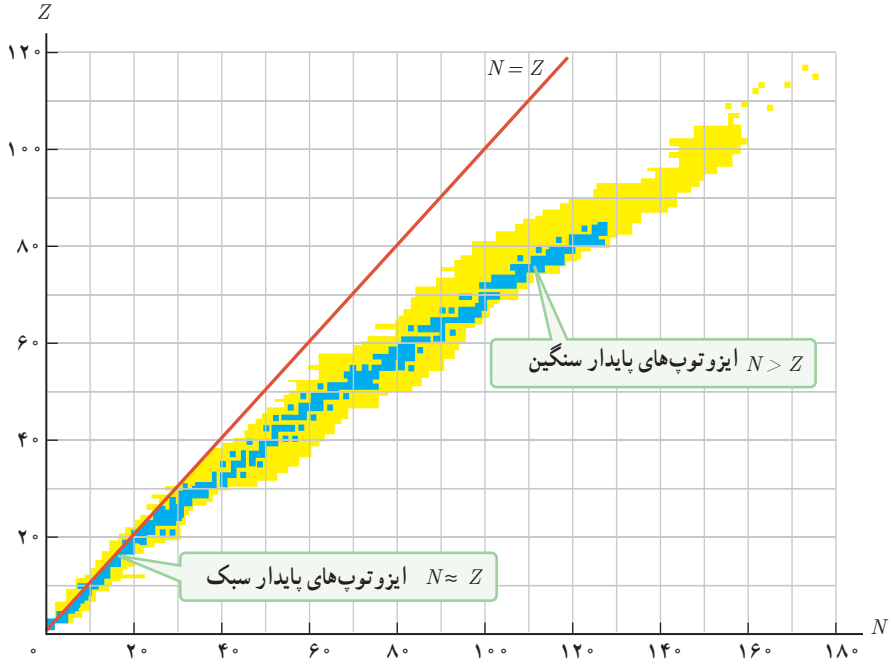
پایداری هسته : همان‌طور که در شکل ۶ــ۱ نشان داده شده است ابعاد هسته در مقایسه با ابعاد اتم بسیار کوچک‌تر است. با وجود این، بیشتر جرم اتم (بیش از ۹۹/۹ درصد آن) در هسته متمرکز شده است. محاسبه نشان می‌دهد مرتبهٔ بزرگی چگالی هسته $10^{14}\,g/cm^3$ است که به صورتی باورنکردنی بزرگ است (برای مقایسه توجه کنید که چگالی آب $1\,g/cm^3$ است). موضوع وقتی شگفت‌انگیزتر می‌شود که به اندازهٔ نیروی الکتروستاتیکی رانشی خیلی قوی بین پروتون‌های درون هسته، که بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند، توجه کنیم. در این صورت چه چیزی مانع از هم پاشیدن هسته می‌شود؟ با توجه به پایداری بسیاری از هسته‌هایی که در طبیعت وجود دارند روشن است که نوعی نیروی جاذبه باید اجزای هسته را کنار هم نگه دارد. از طرفی، جاذبهٔ حاصل از نیروی گرانشی بین نوکلئون‌ها، چنان ضعیف است که نمی‌تواند با نیروی الکتروستاتیکی رانشی مقابله کند. این موضوع وجود نیروی جدیدی بین نوکلئون‌ها را مطرح کرد که به آن نیروی هسته‌ای گفته می‌شود.



شکل ۶ــ۲ قسمتی از هسته و نوکلئون‌های آن که به صورت طرح‌وار نشان داده شده است. هر نوکلئون، فقط به نزدیک‌ترین نوکلئون‌های مجاورش نیروی هسته‌ای وارد می‌کند.

نیروی هسته‌ای، کوتاه‌بُرد است و تنها در فاصله‌ای کوچک‌تر از ابعاد هسته اثر می‌کند (شکل ۶ــ۲). افزون بر این، نیروی هسته‌ای مستقل از بار الکتریکی است، یعنی نیروی ربایشی هسته‌ای یکسانی بین دو پروتون، دو نوترون، یا یک پروتون و یک نوترون وجود دارد. به‌همین دلیل از منظر نیروی هسته‌ای، تفاوتی بین پروتون و نوترون وجود ندارد و دلیل نام‌گذاری آنها با نام عام نوکلئون نیز همین است.

برای پایداری هسته، باید نیروی دافعهٔ الکتروستاتیکی بین پروتون‌ها با نیروی جاذبهٔ بین نوکلئون‌ها، که ناشی از نیروی هسته‌ای است، موازنه شده باشد. ولی به دلیل بلندبُرد بودن نیروی الکتروستاتیکی، یک پروتون تمام پروتون‌های دیگر درون هسته را دفع می‌کند، در حالی که یک پروتون یا یک نوترون، فقط نزدیک‌ترین نوکلئون‌های مجاور خود را با نیروی هسته‌ای جذب می‌کند. به همین دلیل وقتی تعداد پروتون‌های درون هسته افزایش یابد، اگر هسته بخواهد پایدار باقی بماند، باید تعداد نوترون‌های درون هسته نیز افزایش یابد. شکل ۶ــ۳ نموداری از Z برحسب N را برای عنصرهای مختلف نشان می‌دهد. هستهٔ پایدار با بیشترین تعداد پروتون ($Z = ۸۳$)، متعلق به بیسموت ($^{۲۰۹}_{۸۳}Bi$) است. به جز



شکل ۶ــ۳ نمودار تغییرات Z برحسب N برای هسته‌های پایدار و پرتوزا. هر نقطهٔ آبی رنگ نشان‌دهندهٔ یک هستهٔ پایدار است. نقاط زرد رنگ هسته‌های پرتوزای شناخته شده را نشان می‌دهند.

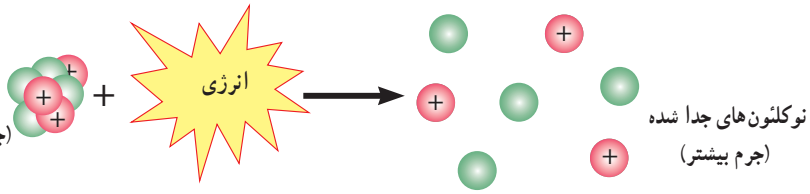
توریم ($Z = ۹۰$) و اورانیوم ($Z = ۹۲$) که در طبیعت یافت می‌شوند سایر هسته‌های سنگین با عدد اتمی بزرگ‌تر از ۸۳ ناپایدارند. این دو عنصر، تنها عنصرهایی‌اند که واپاشی آنها چنان کُند است که از هنگام تشکیل منظومهٔ شمسی در چندین میلیارد سال پیش، فقط مقدار کمی از آنها بر اثر واپاشی، به عنصرهای سبک‌تر تبدیل شده‌اند.

پرسش ۶ــ۱

هر نقطه آبی‌رنگ در نمودار شکل ۶ــ۳ نشان‌دهندهٔ یک هستهٔ پایدار است. با توجه به این نمودار به پرسش‌های زیر پاسخ دهید.
الف) نسبت تعداد نوترون به تعداد پروتون (N/Z) برای هسته‌های پایدار مختلف ثابت است یا متفاوت؟ توضیح دهید.
ب) ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر را چگونه می‌توان با استفاده از این نمودار تشخیص داد؟

انرژی بستگی هسته‌ای و ترازهای انرژی هسته : برای جدا کردن نوکلئون‌های یک هسته، انرژی لازم است. انرژی لازم برای این منظور، انرژی بستگی هسته‌ای نامیده می‌شود. شکل ۶ــ۴ این موضوع را به‌طور طرح‌وار نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری‌های دقیق نشان داده است که جرم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل‌دهنده‌اش اندکی کمتر است. اگر این اختلاف جرم را که به آن کاستی جرم هسته گفته می‌شود، مطابق رابطهٔ معروف اینشتین ($E = mc^2$)، در مربع تندی نور (c^2) ضرب کنیم انرژی بستگی هسته‌ای به‌دست می‌آید[۱]. توجه کنید که هرچند اختلاف جرم هسته با مجموع جرم نوکلئون‌های تشکیل‌دهندهٔ آن بسیار ناچیز است، چون در c^2 که عدد بسیار بزرگی است ضرب می‌شود، این کاستی جرم اندک، معادل انرژی قابل ملاحظه‌ای است[۲].



شکل ۶ــ۴ انرژی‌ای معادل انرژی بستگی هسته‌ای باید تأمین شود تا هسته به نوکلئون‌های تشکیل‌دهندهٔ آن تقسیم شود.

انرژی نوکلئون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم، کوانتیده‌اند و نوکلئون‌های درون هسته نمی‌توانند هر انرژی دلخواهی را اختیار کنند. همچنین، همان‌طور که الکترون‌های اتم می‌توانند با جذب انرژی از تراز پایه به تراز برانگیخته بروند، نوکلئون‌ها نیز می‌توانند با جذب انرژی به ترازهای انرژی بالاتر بروند و در نتیجه هسته برانگیخته شود. هستهٔ برانگیخته با گسیل فوتون به تراز پایه برمی‌گردد. انرژی فوتون گسیل‌شده، با اختلاف انرژی بین تراز برانگیخته و تراز پایه برابر است. هستهٔ برانگیخته را با گذاشتن ستاره روی نماد ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ به‌صورت ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}^{*}$ مشخص می‌کنند. نکتهٔ قابل توجه آن است که اختلاف بین ترازهای انرژی نوکلئون‌ها در هسته از مرتبهٔ keV تا مرتبهٔ MeV است، در حالی که اختلاف بین ترازهای انرژی الکترون‌ها در اتم از مرتبهٔ eV است. از این رو، هسته‌ها در واکنش های شیمیایی برانگیخته نمی‌شوند.

۱ــ با رابطهٔ معروف اینشتین ($E = mc^2$)، در شیمی (۱) نیز آشنا شدید.
۲ــ محاسبهٔ انرژی بستگی هسته خارج از برنامهٔ درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

۶ــ۲ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر

همان‌طور که در مقدمهٔ فصل نیز اشاره کردیم کشف پرتوزایی طبیعی توسط هانری بکرل، آغازی برای پی بردن به وجود هستهٔ اتم بود. وقتی یک هستهٔ ناپایدار یا پرتوزا به‌طور طبیعی (یا اصطلاحاً خودبه‌خود) واپاشی می‌کند، نوع معیّنی از ذرات یا فوتون‌های پر انرژی آزاد می‌شوند. این فرایند واپاشی، پرتوزایی طبیعی نامیده می‌شود.

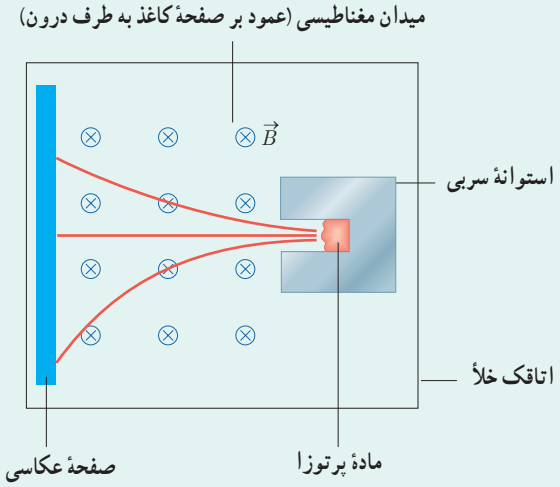
در پرتوزایی طبیعی سه نوع پرتو ایجاد می‌شود : پرتوهای آلفا (α)، پرتوهای بتا (β) و پرتوهای گاما (γ). پرتوهای α کمترین نفوذ را دارند و با ورقهٔ نازک سربی با ضخامت ناچیز ($\approx$۰/۰۱mm) متوقف می‌شوند، در حالی که پرتوهای β مسافت خیلی بیشتری را ($\approx$۰/۱mm) در سرب نفوذ می‌کنند. پرتوهای γ بیشترین نفوذ را دارند و می‌توانند از ورقه‌ای سربی به ضخامت قابل ملاحظه‌ای ($\approx$۱۰۰mm) بگذرند. در تمام فرایندهای واپاشی پرتوزا مشاهده شده است که تعداد نوکلئون‌ها در طی فرایند واپاشی هسته‌ای پایسته است؛ یعنی تعداد نوکلئون‌ها، پیش از فرایند با تعداد نوکلئون‌ها پس از فرایند مساوی است.

عکسی تاریخی از خانواده‌ای که همهٔ آنها نوبل گرفتند.
ماری کوری (۱۹۳۴ــ۱۸۶۷م.)
پیر کوری (۱۹۰۶ــ۱۸۵۴م.)
ایرن کوری (۱۹۵۶ــ۱۸۹۷م.)

ماری کوری فیزیک‌دان و شیمی‌دان لهستانی‌ــ فرانسوی است که مطالعات پیشگام وی در زمینهٔ پرتوزایی طبیعی رادیُم و سایر عنصرها، دو جایزهٔ نوبل برای وی به همراه داشت : جایزهٔ نوبل فیزیک در سال ۱۹۰۳ به خاطر کشفِ پرتوزایی طبیعی (به طور مشترک با شوهرش پیر کوری و هانری بکرل) و جایزهٔ نوبل شیمی در سال ۱۹۱۱ به خاطر جدا کردن رادیم خالص. وی پژوهشکدهٔ رادیم را در دانشگاه پاریس تأسیس کرد و در آنجا به پژوهش در زمینهٔ کاربردهای پزشکی مواد پرتوزا پرداخت. دخترش ایرن، جایزهٔ نوبل شیمی سال ۱۹۳۵ را به خاطر کشف پرتوزایی مصنوعی، یک سال پس از درگذشت مادرش دریافت کرد.

پرسش ۶ــ۲

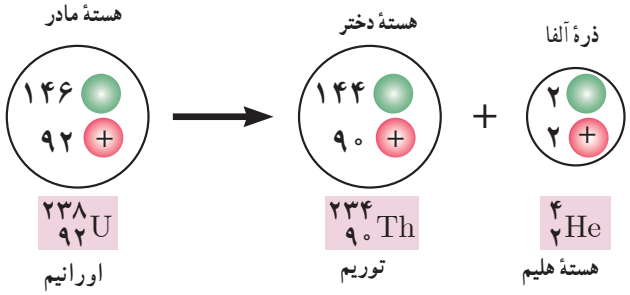
شکل روبه‌رو طرح آزمایش ساده‌ای را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان سه نوع پرتوزایی طبیعی را مشاهده کرد و به تفاوت بار و جرم پرتوها از یکدیگر پی برد. قطعه‌ای از مادهٔ پرتوزا را در ته حفرهٔ باریکی در یک استوانهٔ سربی قرار می‌دهند. استوانه را درون اتاقکی می‌گذارند و هوای درون آن را تخلیه می‌کنند. سپس یک صفحهٔ عکاسی مقابل حفره قرار می‌دهند و میدان مغناطیسی یکنواختی درون اتاقک برقرار می‌کنند. خطوط قرمزرنگ، مسیر حرکت پرتوها را نشان می‌دهد. نوع بار پرتوها را با هم مقایسه کنید.



واپاشی α : در این نوع واپاشی که در هسته‌های سنگین صورت می‌گیرد، هستهٔ ${}^{A}_{Z}X$ با گسیل ذرهٔ آلفا وامی‌پاشد. شواهد تجربی نشان می‌دهند که پرتوهای α، ذرات باردار مثبت از جنس هستهٔ اتم هلیم (${}^{4}_{2}He$) هستند و از دو پروتون و دو نوترون تشکیل شده‌اند. واپاشی α با رابطهٔ زیر بیان می‌شود :

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He \qquad (\text{واپاشی } \alpha) \qquad (۶ــ۲) $$

در این رابطه X هستهٔ مادر و Y هستهٔ دختر نامیده می‌شود. شکل ۶ــ۵، مثالی از واپاشی آلفا، برای اورانیم ۲۳۸ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.



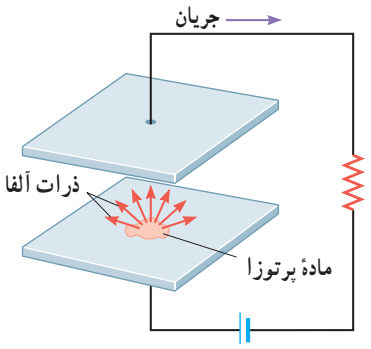
شکل ۶ــ۵ در واپاشی α یک هستهٔ مادر ناپایدار، ذرهٔ α گسیل می‌کند و هستهٔ متفاوتی (هستهٔ دختر) به‌وجود می‌آید.

ذره‌های آلفا، سنگین‌اند و بار مثبت دارند. بُرد این ذره‌ها کوتاه است. این ذرات پس از طی مسافت کوتاهی در هوا (۱ تا ۲ سانتی‌متر) و یا با عبور از لایه‌ای نازک از مواد جذب می‌شوند. اگر این ذره‌ها از راه تنفس یا دستگاه گوارش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت‌های بدن می‌شوند. بنابراین، باید مراقب بود که مواد آلفازا هرگز وارد بدن نشوند.

فنّاوری و کاربرد: واپاشی آلفا و آشکارسازهای دود

یکی از کاربردهای گستردهٔ واپاشی α در آشکارسازهای دود است (شکل الف). شکل ب، مدار و بخش اصلی یک آشکارساز دود را نشان می‌دهد. دو صفحهٔ کوچک و موازی فلزی در فاصلهٔ حدود یک سانتی‌متر از یکدیگر قرار داده می‌شوند. مقدار اندکی مادهٔ پرتوزا را که ذرات α گسیل می‌کند در وسط یکی از صفحه‌ها می‌گذارند. ذرات α با مولکول‌های هوای بین دو صفحه برخورد می‌کنند، مولکول‌های هوا یونیده می‌شوند و یون‌های مثبت و منفی به‌وجود می‌آیند. ولتاژ باتری باعث می‌شود یک صفحه مثبت و صفحهٔ دیگر منفی باشد، به طوری که هر صفحه یون‌های با بار مخالف را جذب می‌کند. در نتیجه در مدار متصل به صفحه‌ها جریانی به‌وجود می‌آید. وجود ذرات دود میان صفحه‌ها جریان را کاهش می‌دهد؛ زیرا یون‌هایی که به ذرات دود برخورد می‌کنند معمولاً خنثی می‌شوند. اُفت جریان که ذرات دود باعث آن می‌شود هشداردهنده‌ای را به‌کار می‌اندازد.

(الف)

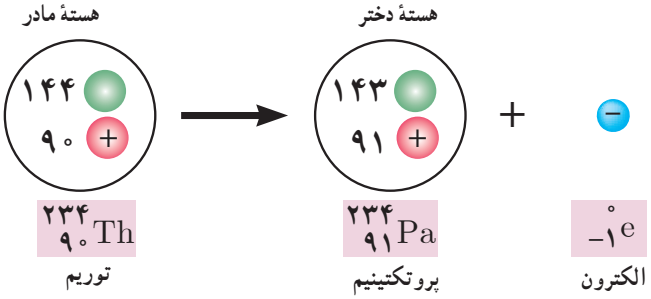


(ب)

واپاشی β : واپاشی بتا، نخستین مورد پرتوزایی بود که در سال‌های پایانی قرن نوزدهم، توسط هانری بکرل مشاهده شد. این واپاشی، متداول‌ترین نوع واپاشی در هسته‌هاست و ذرات گسیل‌شده در این واپاشی را ذرات بتا می‌نامند. بررسی‌های بعدی نشان داد که این ذرات الکترون‌اند و به همین دلیل، این واپاشی را واپاشی β^- نامیدند. الکترون گسیل‌شده در این واپاشی، در هستهٔ مادر وجود ندارد و همچنین یکی از الکترون های مداری اتم نیست؛ این الکترون وقتی به‌وجود می‌آید که نوترونی درون هسته، به پروتون و الکترون تبدیل شود. فرایند واپاشی β^- را با رابطهٔ زیر بیان می‌کنند :

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e^{-} \qquad (\beta^- \text{ واپاشی}) \qquad (۶ـ۳)$$

شکل ۶ـ۶ مثالی از واپاشی β^-، برای توریم ۲۳۴ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.



شکل ۶ـ۶ واپاشی β^- وقتی رخ می‌دهد که نوترونی در یک هستهٔ مادر ناپایدار به پروتون و الکترون تبدیل شود. الکترون به صورت ذرهٔ β^- گسیل می‌شود.

چی اِن ــ شی‌ئونگ وو (۱۹۹۷ـ۱۹۱۲م.) را از زمرهٔ برجسته‌ترین فیزیک‌دان‌های قرن بیستم می‌دانند که در ۱۹۱۲ در شهری در حوالی شانگهای چین به دنیا آمد. آزمایش‌های پیشگامانه‌ای که در مورد واپاشی بتا و برهم‌کنش‌های هسته‌ای انجام داد، زمینهٔ لازم را برای توسعهٔ مدل‌های جدید فیزیک زیراتمی فراهم کرد. وی نظریهٔ واپاشی بتا را که توسط فرمی ارائه شده بود به‌طور تجربی به تأیید رساند. چی‌اِن ــ شی‌ئونگ اولین زنی بود که در سال ۱۹۷۵ میلادی به سمت رئیس انجمن فیزیک امریکا برگزیده شد. زندگی فوق‌العادهٔ او را با شعری قدیمی به زبان چینی توصیف می‌کنند : «اگرچه راهی طولانی و پر فراز و نشیب در پیش دارم، قاطعانه می‌خواهم تا انتهای آن را بپیمایم.»

تمرین ۶ـ۲

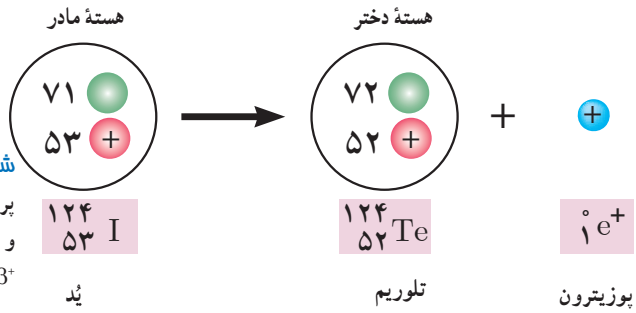
لوتتیم ($^{176}_{71}Lu$) عنصر پرتوزایی است که با گسیل بتای منفی، واپاشی می‌کند. معادلهٔ این واکنش را بنویسید و با استفاده از جدول تناوبی عنصرها که در پیوست آمده است، عنصر جدیدی را که تولید می‌شود تعیین کنید.

در نوعی دیگر از فرایند واپاشی بتا، ذرهٔ گسیل‌شده توسط هسته، جرم یکسان با الکترون دارد، ولی به جای بار $-e$ حامل بار $+e$ است. به این الکترون مثبت، پوزیترون می‌گویند و با β^+ یا e^+ نمایش داده می‌شود. در واقع آنچه در این واپاشی رخ می‌دهد این است که یکی از پروتون‌های درون هسته به یک نوترون و یک پوزیترون تبدیل می‌شود و سپس این پوزیترون از هسته گسیل می‌شود. فرایند واپاشی β^+ با رابطهٔ زیر بیان می‌شود[۱].

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e^{+} \qquad (\beta^+ \text{ واپاشی}) \qquad (۶ـ۴)$$

۱ــ در واپاشی β^+، ذره‌ای دیگر به نام نوترینو را نیز باید در نظر بگیریم ($^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e^{+} + \upsilon$). همچنین در واپاشی β^-، ذره‌ای دیگر به نام پادنوترینو را نیز باید در نظر بگیریم ($^{A}_{Z}X = {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e^{-} + \bar{\upsilon}$). در این کتاب برای سادگی از آنها صرف نظر کرده‌ایم.

شکل ۶ــ۷ مثالی از واپاشی β^+، برای یُد ۱۲۴ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.



شکل ۶ــ۷ واپاشی β^+ وقتی رخ می‌دهد که پروتونی در یک هستهٔ مادر ناپایدار، به نوترون و پوزیترون تبدیل شود. پوزیترون به‌صورت ذرهٔ β^+ گسیل می‌شود.

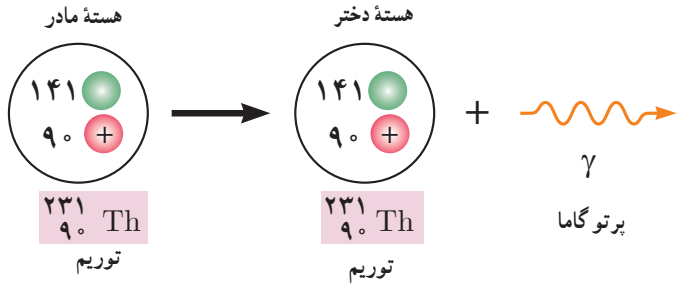
تمرین ۶ــ۳

ایزوتوپ ($^{15}_{8}O$) با گسیل پوزیترون، واپاشی می‌کند. معادلهٔ این واکنش را بنویسید و با استفاده از جدول تناوبی عنصرها که در پیوست آمده است، عنصر جدیدی را که تولید می‌شود تعیین کنید.

واپاشی γ: اغلب هسته‌ها پس از واپاشی آلفا یا بتا، در حالت برانگیخته قرار می‌گیرند و با گسیل فوتون‌های پر انرژی (پرتو گاما) به حالت پایه می‌رسند. در این فرایند، A و Z تغییر نمی‌کنند؛ بلکه هستهٔ برانگیخته که با علامت * مشخص شده است، با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسد. واپاشی γ با رابطهٔ زیر بیان می‌شود.

$$^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma \qquad (\text{واپاشی } \gamma) \qquad (۶ــ۵)$$

شکل ۶ــ۸ مثالی از واپاشی γ، برای توریم ۲۳۱ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.



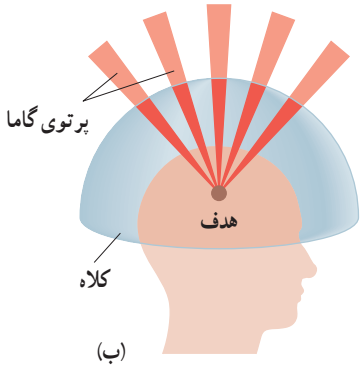
شکل ۶ــ۸ واپاشی γ وقتی رخ می‌دهد که هسته‌ای برانگیخته شده باشد.

جراحی با پرتوهای گاما

جراحی با پرتوهای گاما، روش پزشکی نویدبخشی است که در سال‌های اخیر برای درمان مشکلات خاصی در مغز، از جمله تخریب غده‌های خوش‌خیم و سرطانی و نیز رفع نقص‌ها در رگ‌های خونی استفاده می‌شود. در این روش که از هیچ چاقویی استفاده نمی‌شود، از باریکه‌های بسیار متمرکز و توانمندی از پرتوهای گاما که متوجه غده و نقص در رگ‌ها می‌شود بهره می‌گیرند. پرتوهای γ توسط چشمهٔ کبالت ۶۰ گسیل می‌شوند. همان‌طور که شکل الف نشان می‌دهد، بیمار یک کلاه ایمنی فلزی بر سر می‌گذارد که سوراخ‌های بسیار کوچکی روی آن ایجاد شده است. پرتوهای عبوری از این سوراخ ها، روی هدف مورد نظر درون مغز متمرکز می‌شوند. از این‌رو بافت هدف، مقدار بسیار زیادی تابش را دریافت می‌کند و تخریب می‌شود، در حالی که بافت سالم مجاور آسیبی نمی‌بیند. جراحی با پرتوهای گاما، روشی بدون درد و

خونریزی است که اغلب با بی‌حسی موضعی صورت می‌گیرد. مدت زمان بستری شدن در بیمارستان، خیلی کوتاه‌تر از جراحی به روش معمول است و بیمار پس از چند روز، به روال زندگی عادی خود باز می‌گردد.

(الف)



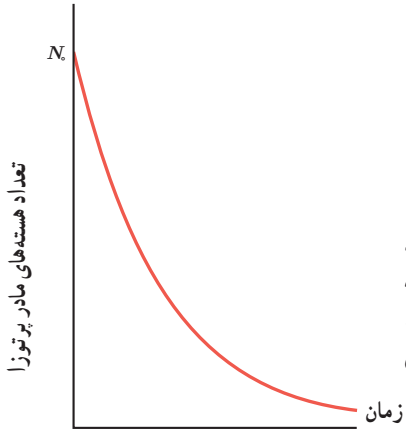
(ب)

(الف) در جراحی با پرتو گاما، کلاه ایمنی فلزی‌ای که سوراخ‌های کوچکی دارد روی سر بیمار قرار داده می‌شود.
(ب) پرتوهای گاما پس از عبور از این سوراخ ها، روی هدف تعیین‌شده در مغز، متمرکز می‌شوند.

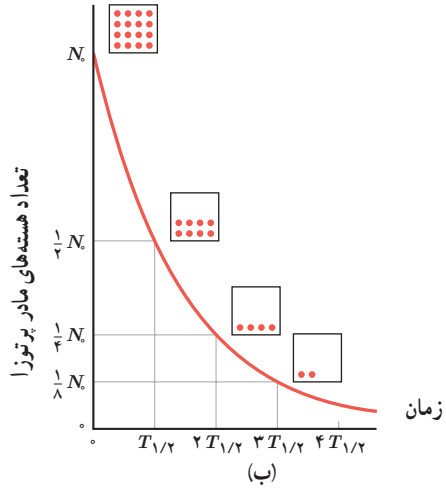
نیمه‌عمر : ایزوتوپ‌های پرتوزا با گذشت زمان واپاشیده می‌شوند. برای یک نمونه از یک مادهٔ پرتوزا، بر اساس داده‌های تجربی می‌توان بیان کرد که در پایان زمانِ معیّنی، چه کسری از مادهٔ پرتوزا وا می‌پاشد. برای مثال در مورد هسته‌های توریم ۹۰ پس از زمان معیّنی می‌توان گفت که چه کسری از آنها به رادیم ۸۸ تبدیل شده است.

برای بررسی بیشتر این موضوع، یک نمونهٔ پرتوزا را در نظر بگیرید. فرض کنید در لحظهٔ $t=0$ تعداد هسته‌های مادر پرتوزای موجود در این نمونه، برابر N_0 باشد. اگر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر موجود در نمونه را برحسب زمان رسم کنیم نمودار شکل ۶ــ۹ الف به‌دست می آید. همان‌طور که روی نمودار نیز دیده می‌شود، پس از گذشت زمان کافی، تعداد هسته‌های مادر موجود در نمونه، به صفر میل می‌کند. برای درک بهتر این نمودار، کمیتی به نام نیمه‌عمر را معرفی می‌کنیم و آن را با نماد $T_{\frac{1}{2}}$ نشان می‌دهیم. بنا به تعریف، نیمه‌عمر، مدت زمانی است که طول می‌کشد تا تعداد هسته‌های مادر موجود در یک نمونه، به نصف برسند (شکل ۶ــ۹ ب). برخی از ایزوتوپ‌ها مانند اورانیم ۲۳۸، دارای نیمه‌عمری در حدود سنّ زمین (۴/۵ میلیارد سال) هستند. این عناصر منشأ پرتوزایی طبیعی در محیط پیرامون ما هستند.

روزالیند یالو(۲۰۱۱-۱۹۲۱ م.)
فیزیک‌دان آمریکایی، پس از دریافت دکترای فیزیک هسته‌ای، در زمینهٔ کاربرد ایزوتوپ‌های پرتوزا در پزشکی تحقیق کرد. وی روش ایمنی‌سنجی تابشی را ابداع کرد، که در آن از ردیاب‌های پرتوزا برای اندازه‌گیری مقادیر کم مواد در خون یا سایر شاره‌ها استفاده می‌شود. اهمیت این روش با اعطای جایزهٔ نوبل پزشکی در سال ۱۹۷۷ به وی مشخص شد.



(الف)



(ب)

شکل ۶ــ۹ الف) با گذشت زمان، تعداد هسته‌های مادر پرتوزا در یک نمونه کاهش می‌یابد. ب) با گذشت هر نیمه‌عمر، نیمی از هسته‌های مادر پرتوزای باقی‌مانده واپاشی می‌کنند.

مثال ۶ـ۱

در حادثهٔ انفجار نیروگاه هسته‌ای چرنوبیل، یُد ۱۳۱ ($^{131}_{53}\mathrm{I}$)، یکی از ایزوتوپ‌هایی بود که وارد محیط‌زیست شد. این ایزوتوپ، فرّار است و همراه با جریان‌های جوّی، تا کشورهای دوردست از محل نیروگاه حرکت کرد و با نشستن روی برگ گیاهان، سبب آلودگی گوشت و شیر دام‌هایی شد که این گیاهان را می‌خوردند. نیمه‌عمر این ایزوتوپ پرتوزا تقریباً ۸ روز است. پس از گذشت ۴۰ روز از حادثهٔ چرنوبیل، چه کسری از هسته‌های مادر اولیه در محیط‌زیست باقی‌مانده بود؟

پاسخ : نیمه‌عمر ایزوتوپ یُد۱۳۱ برابر ۸ روز است و ۴۰ روز را معادل ۵ نیمه‌عمر $^{131}_{53}\mathrm{I}$ در نظر می‌گیریم. اگر N_0 تعداد هسته‌های مادر اولیه باشد، پس از گذشت ۴۰ روز جدول زیر را می‌توان تنظیم کرد.

تعداد نیمه‌عمرهای سپری‌شده	۰	۱	۲	۳	۴	۵
هسته‌های مادر باقی‌مانده	N_0	$\frac{1}{2}\times N_0=\frac{N_0}{2}$	$\frac{1}{2}\times\frac{N_0}{2}=\frac{N_0}{4}$	$\frac{1}{2}\times\frac{N_0}{4}=\frac{N_0}{8}$	$\frac{1}{2}\times\frac{N_0}{8}=\frac{N_0}{16}$	$\frac{1}{2}\times\frac{N_0}{16}=\frac{N_0}{32}$

بنابراین، پس از گذشت ۴۰ روز از حادثهٔ چرنوبیل، تنها $\frac{1}{32}$ از هسته‌های مادر اولیه در محیط‌زیست باقی ماندند.

اگر تعداد هسته‌های مادر اولیه در یک نمونهٔ پرتوزا N_0 باشد، پس از گذشت زمان t، تعداد هسته‌های پرتوزای باقی مانده از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید :

$$N=N_0\left(\frac{1}{2}\right)^n \qquad \text{(تعداد هسته‌های پرتوزای باقی‌مانده)} \qquad (۶ـ۶)$$

که در آن n از رابطهٔ $\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$ به‌دست می‌آید[۱].

تمرین ۶ـ۴

پس از گذشت ۹ روز، تعداد هسته‌های پرتوزای یک نمونه، به $\frac{1}{8}$ تعداد موجود در آغاز کاهش یافته است. نیمه‌عمر (برحسب روز) ماده چقدر است؟

فیزیک و تندرستی

گاز رادون پرتوزا در خانه‌ها

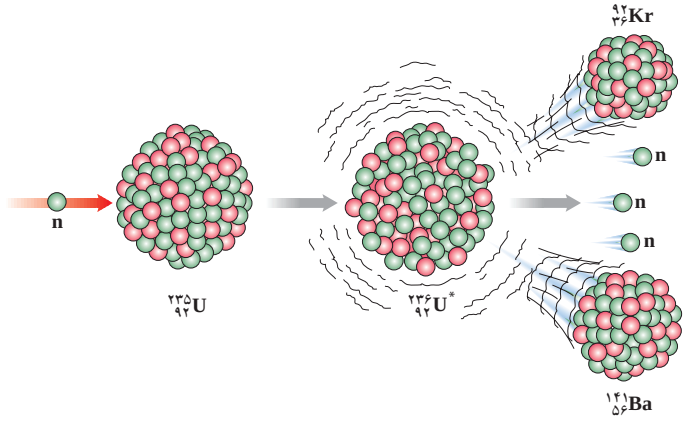
رادون ($^{222}_{86}\mathrm{Rn}$)، گازی پرتوزاست که به‌طور طبیعی به‌وجود می‌آید و محصول واپاشی رادیم ($^{226}_{88}\mathrm{Ra}$) است. رادون درون خاک به شکل گاز است و می‌تواند از محل هایی مانند شکاف‌های روی دیوارها و کفِ ساختمان، حفره‌های دور لوله‌ها، منبع آب یا لوله‌های آب وارد خانه‌ها شود (نقاط سبز رنگ روی شکل). اینکه میزان جمع شدن رادون درون خانه بتواند به‌طور چشمگیری بالا رود، به نوع احداث ساختمان و غلظت رادون در خاک اطراف ساختمان بستگی دارد. گاز رادون با نیمه‌عمر ۳/۸۳ روز، به هسته‌های دختری که آنها نیز پرتوزا هستند واپاشی می‌کند. این هسته‌های پرتوزا، می‌توانند به ذرات غبار و دود بچسبند و با تنفس وارد ریه‌ها شوند و پس از واپاشی، به بافت‌های بدن آسیب بزنند. اگر شخصی برای مدتی طولانی در معرض گاز رادون باشد، ممکن است به سرطان ریه مبتلا شود. از آنجا که میزان تجمع گاز رادون را می‌توان با دستگاه‌هایی اندازه‌گیری کرد توصیه می‌شود که خانه‌ها برای سنجش رادون مورد آزمایش قرار گیرند.

۱ـ در این کتاب صرفاً حل مسئله‌هایی مورد نظر است که در آنها n عددی صحیح باشد و سایر حالت‌های دیگر نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

۶ــ۳ شکافت هسته‌ای

در سال ۱۹۳۹ میلادی گروهی از دانشمندان آلمانی، کشف کردند که هستهٔ اورانیم ۲۳۵ ($^{235}_{92}U$) پس از جذب نوترون، به دو تکه تقسیم می‌شود و هر تکه، جرم کمتری از هستهٔ اولیه دارد. فرایند تقسیم شدن یک هستهٔ سنگین به دو هسته با جرم کمتر، **شکافت هسته‌ای** نامیده می‌شود. در فرایند شکافت اورانیم، ترکیب‌های متفاوتی از هسته‌های کوچک‌تر همراه با تعدادی نوترون (بین ۲ تا ۵) به‌وجود می‌آید[1]. شکل ۶ــ۱۰، یکی از این واکنش‌های ممکن شکافت را نشان می‌دهد که در آن هستهٔ اورانیم $^{235}_{92}U$ پس از جذب نوترون و تبدیل به ایزوتوپ ناپایدار $^{236}_{92}U^*$، به هسته‌های باریم $^{141}_{56}Ba$ و کریپتون $^{92}_{36}Kr$ تقسیم شده است. واکنش وقتی شروع می‌شود که نوترونی کُند (با انرژی جنبشی در حدود ۰/۰۴eV) توسط هستهٔ $^{235}_{92}U$ جذب و هستهٔ مرکّب $^{236}_{92}U^*$ ایجاد شود. این هستهٔ مرکّب در کمتر از $10^{-12}s$ و مطابق واکنش زیر واپاشیده می‌شود:

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow \underbrace{{}^{236}_{92}U^*}_{\text{هستهٔ مرکّب (ناپایدار)}} \rightarrow \underbrace{{}^{141}_{56}Ba}_{\text{باریم}} + \underbrace{{}^{92}_{36}Kr}_{\text{کریپتون}} + \underbrace{3\,{}^{1}_{0}n}_{\text{سه نوترون}}$$



شکل ۶ــ۱۰ واکنش شکافت $^{235}_{92}U$ با جذب یک نوترون کُند شروع می‌شود.

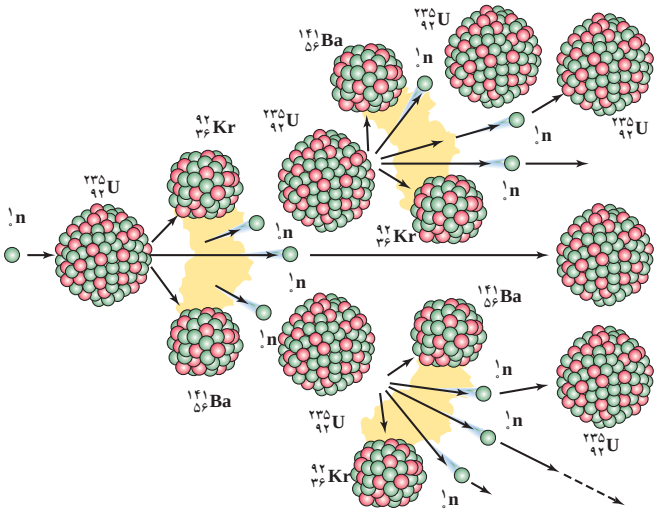
وقتی نوترونی با هستهٔ اورانیم ۲۳۵ برخورد کند و جذب شود، هستهٔ اورانیم شروع به ارتعاش می‌کند و تغییر شکل می‌دهد. ارتعاش تا وقتی ادامه می‌یابد که تغییر شکل چنان جدی شود که نیروی جاذبهٔ هسته‌ای دیگر نتواند با نیروی دافعهٔ الکتروستاتیکی بین پروتون‌های هسته متوازن شود. در این هنگام، هسته به پاره‌هایی وامی‌پاشد که حامل انرژی (به‌طور عمده انرژی جنبشی) هستند.

واکنش زنجیری: همان‌طور که دیدیم فرایند شکافت $^{235}_{92}U$ با جذب یک نوترون کُند آغاز می‌شود. اگر محصولات شکافت، باریم $^{141}_{56}Ba$ و کریپتون $^{92}_{36}Kr$ باشند، در این فرایند ۳ نوترون به‌وجود می‌آید. چون نوترون‌ها بار الکتریکی ندارند، هسته‌های دیگر آنها را دفع نمی‌کنند. نوترون‌ها پس از کُند شدن، توسط هسته‌های دیگر جذب می‌شوند و باعث شکافت در ۳ هستهٔ اورانیم دیگر می‌شوند و ۹ نوترون آزاد می‌کنند. اگر هر یک از این نوترون‌ها نیز موفق به شکافت یک هستهٔ اورانیم شود، ۲۷ نوترون آزاد می‌شود و به همین ترتیب تا آخر. این رشته واکنش را، واکنش زنجیری می‌نامند (شکل ۶ــ۱۱).

لیزه مایتنر (۱۹۶۸ــ۱۸۸۷م.)، فیزیک‌دان آلمانی به واسطهٔ تحقیقاتش در خصوص پرتوزایی معروف است و عنصر پرتوزای پروتکتینیم را کشف کرد. مهم‌ترین کار وی، توصیف نتایج بمباران اورانیم توسط نوترون‌ها بود که منجر به فرایند شکافت هسته‌ای شد. مایتنر نخستین دانشمندی بود که نام شکافت را برای این فرایند پیشنهاد کرد.

اتو هان (۱۹۶۸ــ ۱۸۷۹م.)، فیزیک‌دان آلمانی به خاطر فعالیت‌هایش در زمینهٔ شکافت هسته‌ای، جایزهٔ نوبل شیمی را در سال ۱۹۴۴ دریافت کرد. وی پس از جنگ جهانی دوم تا سال ۱۹۶۰ ریاست مؤسسهٔ تازه‌تأسیس ماکس پلانک را به عهده داشت که یکی از معتبرترین مراکز پژوهشی در پیشبرد علوم است.

۱ــ به‌طور میانگین ۲/۷ نوترون در هر واکنش شکافت آزاد می‌شود.



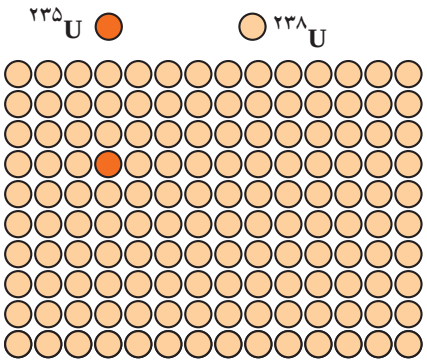
شکل ۶ــ۱۱ مدل ساده‌ای از واکنش زنجیری. یک نوترون وارد هستهٔ اورانیم ۲۳۵ می‌شود و فرایند شکافت رخ می‌دهد. برای سادگی، به‌جز باریم و کریپتون، محصولات دیگر شکافت را در این شکل نشان نداده‌ایم.

در واکنش‌های شکافت هسته‌ای، جرم محصولات شکافت، کمتر از جرم هستهٔ مرکّب است. این اختلاف جرم بنا به رابطهٔ $E = mc^2$، سبب آزاد شدن انرژی گرمایی زیادی می‌شود.

انرژی‌ای که توسط محصولات شکافت حمل می‌شود عمدتاً به شکل انرژی جنبشی است. در هر واکنش شکافت حدود ۲۰۰MeV انرژی آزاد می‌شود. این انرژی، ۱۰۸ برابر انرژی آزادشده به‌ازای هر مولکول در یک واکنش شیمیایی معمولی، نظیر سوختن بنزین یا زغال سنگ است. حتی در انفجار تری نیتروتولوئن (TNT)، انرژی آزادشده به ازای هر مولکول، در حدود ۳۰eV است.

شکل ۶ــ۱۲ الف، تصویری از ورودی مجتمع معدنی اورانیم ساغند (واقع در حوالی شهر اردکان یزد) را نشان می‌دهد. ممکن است این پرسش مطرح شود که چرا واکنش زنجیری به طور طبیعی در این معدن و دیگر معدن‌های اورانیم رخ نمی‌دهد؟ پاسخ این است که در سنگ معدن اورانیم، دو ایزوتوپ ۲۳۵ و ۲۳۸ وجود دارد، به‌طوری که فراوانی ایزوتوپ ۲۳۵ حدود ۰/۷۲ درصد است. به عبارت دیگر از هر ۱۴۰ اتم اورانیم موجود در سنگ معدن اورانیم، تنها یکی از آنها ایزوتوپ ۲۳۵ و مابقی ایزوتوپ ۲۳۸ است (شکل ۶ــ۱۲ ب). اگرچه $^{238}_{92}U$ فراوان‌ترین ایزوتوپ اورانیم است، احتمال اینکه نوترونی را گیر بیندازد و شکافته شود، بسیار کم است و در نتیجه واکنش زنجیری را ناممکن می‌سازد.

(الف)



(ب)

شکل ۶ــ۱۲ الف) معدن اورانیم ساغند با بیشترین ظرفیت تولید در ایران در حوالی شهر اردکان یزد واقع است. ب) در سنگ معدن اورانیم از هر ۱۴۰ اتم اورانیم، تنها یکی ایزوتوپ ۲۳۵ است.

فریتز اشتراسمن (۱۹۸۰ــ۱۹۰۲م.)، فیزیک‌دان آلمانی یکی از دستیاران اتوهان در پروژهٔ شکافت اورانیم در سال ۱۹۳۸ بود. وی توانست پاره‌های حاصل از شکافت را که توسط نوترون‌های کُند بمباران شده بودند شناسایی کند. اشتراسمن برای سال‌ها پس از جنگ جهانی دوم، مدیر بخش شیمی مؤسسهٔ ماکس پلانک بود.

اتو فریش (۱۹۷۹ــ۱۹۰۴م.)، فیزیک‌دان اتریشی مدیر گروهی در لوس آلاموس بود که در سال ۱۹۴۴ میلادی مقدار دقیق جرم اورانیم غنی‌شدهٔ لازم برای ساختن بمب اتمی را به‌دست آورد، به‌طوری که این جرم بحرانی، قادر باشد فرایند شکافت را به‌طور زنجیری ادامه دهد.

غنی‌سازی اورانیم : همان‌طور که اشاره کردیم، واکنش زنجیری در سنگ معدن اورانیم رخ نمی‌دهد. برای استفاده از اورانیم به‌عنوان سوخت در نیروگاه‌های هسته‌ای یا استفاده در انفجارهای هسته‌ای، باید فراوانی ایزوتوپ ۲۳۵ را در یک نمونهٔ اورانیم، افزایش دهیم. به فرایند افزایش درصد یا غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در یک نمونه، غنی‌سازی گفته می‌شود. بیشتر راکتورهای تجاری تولید برق، مانند راکتور نیروگاه هسته‌ای بوشهر، از اورانیمی استفاده می‌کنند که در آنها ایزوتوپ $^{235}_{92}U$ تا ۳درصد غنی‌سازی شده است. همچنین در بیشتر راکتورهای پژوهشی، مانند راکتور پژوهشی دانشگاه تهران، از سوختی استفاده می‌شود که ایزوتوپ $^{235}_{92}U$ تا ۲۰درصد غنی‌سازی شده است.

پژوهش در فیزیک

شیوه‌های مرسوم غنی‌سازی اورانیم

جداسازی ایزوتوپ کمیاب $^{235}_{92}U$ از ایزوتوپ فراوان $^{238}_{92}U$ بسیار دشوار است؛ زیرا هر دو ایزوتوپ به لحاظ شیمیایی یکسان‌اند و نمی‌توان از واکنش‌های شیمیایی برای جداسازی آنها استفاده کرد. جداسازی این دو ایزوتوپ بر اساس اختلاف جرم آنها صورت می‌گیرد. یکی از روش‌های انجام این کار، استفاده از فرایند پخش است. در این روش، اورانیم در ترکیب با فلوئور به‌صورت گاز هگزافلورید اورانیم (UF_6) درمی‌آید؛ در این گاز، تندی متوسط ایزوتوپ $^{235}_{92}U$ کمی بیشتر از ایزوتوپ سنگین‌تر $^{238}_{92}U$ است. به‌همین دلیل ایزوتوپ ۲۳۵ از غشاهای نازکی که در این روش جداسازی به‌کار می‌رود، راحت‌تر می‌گذرد. پدیدهٔ پخش پس از طی هزاران مرحله، سرانجام منجر به تولید اورانیم با غنای مناسب می‌شود.

غنی‌سازی اورانیم با استفاده از روش سانتریفوژ گازی، نیز رایج است. در این روش، گاز هگزافلورید اورانیم در یک استوانهٔ چرخان فوق سریع (معمولاً ۵۰ هزار دور در دقیقه) به حرکت درمی‌آید. مولکول‌های گاز که حاوی $^{238}_{92}U$ هستند، سنگین‌ترند و به خارج رانده می‌شوند و مولکول‌های سبک‌تر حاوی $^{235}_{92}U$ ، از مرکز دستگاه استخراج می‌شوند.

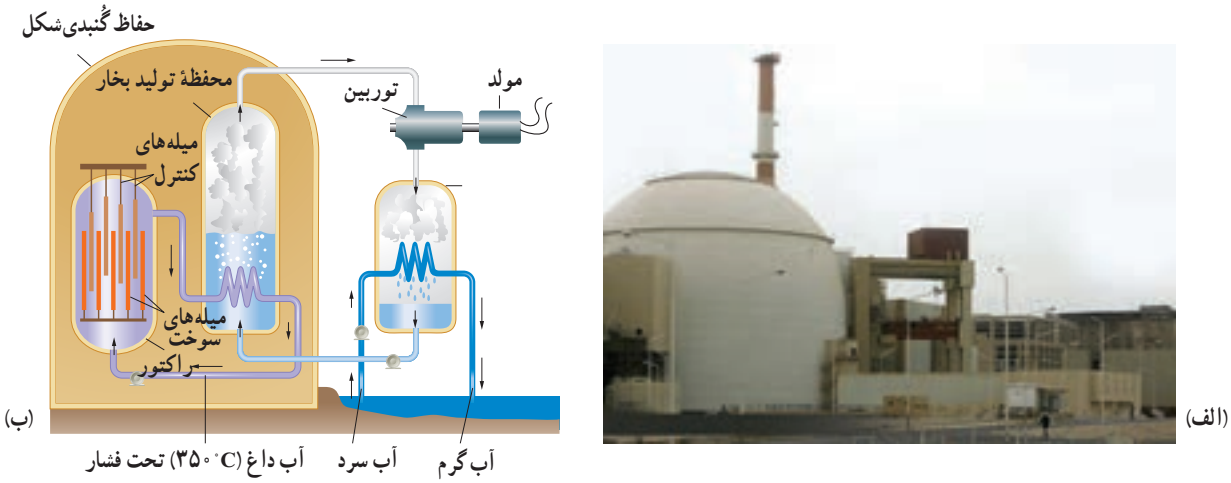
راکتورهای شکافت هسته‌ای : نوترون‌های آزادشده در فرایند شکافت ایزوتوپ $^{235}_{92}U$ ، انرژی جنبشی زیادی دارند (به‌طور متوسط حدود 2MeV) و به نوترون‌های تُند معروف‌اند. این نوترون‌ها، با احتمال بسیار بیشتری جذب ایزوتوپ $^{238}_{92}U$ می‌شوند. تجربه نشان می‌دهد اگر بتوان نوترون‌های تند را به نحوی کُند ساخت که انرژی جنبشی آنها به حدود 0/04eV یا کمتر از آن برسد، احتمال جذب آنها توسط ایزوتوپ‌های $^{235}_{92}U$ افزایش می‌یابد. این افزایش احتمال می‌تواند برای ایجاد واکنش زنجیری شکافت، کافی باشد. آب معمولی (H_2O)، آب سنگین (D_2O) و گرافیت (اتم‌های کربن) از جمله موادی هستند که به‌عنوان کُندساز[1] نوترون‌ها در واکنش‌های شکافت هسته‌ای استفاده می‌شوند.

راکتور هسته‌ای، جایی است که در آن واکنش زنجیری شکافت به‌شکل کنترل شده رخ می‌دهد. اولین راکتور هسته‌ای به‌منظور شکافت $^{235}_{92}U$ ، در سال ۱۹۴۲ میلادی توسط اِنریکو فرمی و همکارانش در دانشگاه شیکاگو ساخته شد. امروزه راکتورهایی با انواع و اندازه‌های مختلف ساخته شده‌اند که بیشتر به منظور تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های هسته‌ای به‌کار می‌روند (شکل ۶ــ۱۳ الف).

انریکو فرمی (۱۹۵۴-۱۹۰۱ م.)
فیزیک‌دان ایتالیایی-آمریکایی در بیشتر حوزه‌های فیزیک جدید، هم به لحاظ نظری و هم در حوزه فعالیت‌های آزمایشگاهی و تجربی سهم به‌سزایی داشت. وی در سال ۱۹۳۰ نظریه‌ای برای واپاشی بتازا پیشنهاد کرد که هنوز به کار می‌رود. فرمی نخستین دانشمندی بود که تبدیل عناصر را بر اثر بمباران نوترونی نشان داد و برای این کار جایزهٔ نوبل فیزیک سال ۱۹۳۸ را دریافت کرد. وی همچنین روند ساخت اولین راکتور هسته‌ای را در دانشگاه شیکاگو هدایت کرد.

۱ــ Moderator

راکتورهای هسته‌ای افزون بر سوخت هسته‌ای و مادهٔ کُندساز (که پیش از این شرح داده شد) دارای، میله‌های کنترل و شاره‌ای (معمولاً آب) هستند که گرما را به خارج راکتور انتقال می‌دهد (شکل ۶ـ۱۳ب).



شکل ۶ـ۱۳ الف) نیروگاه ۱۰۰۰ مگاواتی شکافت هسته‌ای بوشهر. راکتور آب تحت فشار (PWR) این نیروگاه، در زیر قسمت گنبدی‌شکل قرار دارد. ب) طرح‌واره‌ای از یک راکتور PWR و قسمت‌های اصلی یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

سوخت هسته‌ای (معمولاً با حدود ۳درصد ایزوتوپ $^{235}_{92}U$) به‌صورت میله‌هایی با قطر حدود ۱cm است و هزاران عدد از این میله‌ها در قلب راکتور قرار دارد.

با وارد کردن میله‌های کنترل به داخل راکتور، آهنگ واکنش شکافت، یعنی تعداد نوترون‌های موجود برای به‌وجود آوردن شکافت، تنظیم می‌شود. میله‌های کنترل معمولاً از مواد جذب‌کنندهٔ نوترون، مانند کادمیم یا بور، ساخته می‌شوند. در نوعی از راکتورها، که به راکتورهای آب تحت فشار (PWR)[1] معروف‌اند، آبی که سوخت هسته‌ای را احاطه کرده است، تحت فشار زیاد (حدود ۱۵۰ اتمسفر) قرار دارد تا بدون آنکه بجوشد به دماهای بالا برسد. این آب داغ، به سامانهٔ بستهٔ دیگری که محتوی آب با فشار کمتر است، پمپ می‌شود تا این آب را گرم کند. گرمای انتقال‌یافته به سامانهٔ دوم، سبب تولید بخار می‌شود که توربین و مولد الکتریسیته را به‌کار می‌اندازد.

کنترل واکنش زنجیری در راکتور شکافت

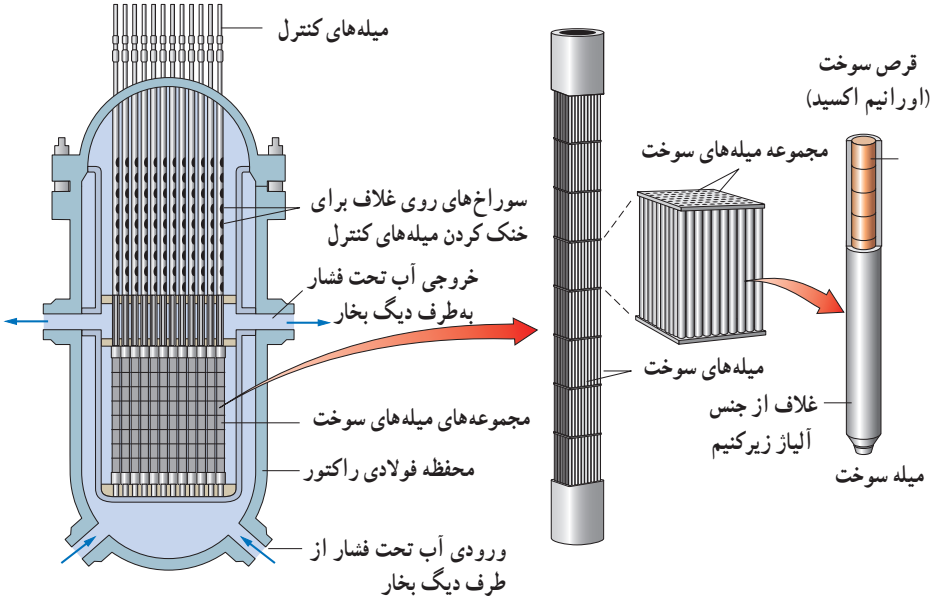
شکل صفحهٔ بعد طرحی با جزئیات بیشتر از قلب یک راکتور را نشان می‌دهد. وقتی نوترون پر انرژی عنصر سوخت را ترک می‌کند، وارد آب تحت فشار پیرامون می‌شود. تندی این نوترون توسط کندساز (مثلاً آب معمولی)، در کمتر از یک میلی‌ثانیه کاهش می‌یابد و نوترون کُندشده می‌تواند با ورود مجدد به عنصر سوخت، سبب شکافت دیگری شود. برای آنکه توان خروجی راکتور ثابت بماند، باید تنها یکی از نوترون‌های آزادشده در هر شکافت، سبب شکافت بعدی شود. وقتی به‌طور میانگین هر شکافت به شکافت دیگری منجر شود، گفته می‌شود که راکتور در حالت عادی یا اصطلاحاً در حالت بحرانی است

۱ـ Pressurized ـ Water Reactor

(توجه کنید که اصطلاح حالت بحرانی در اینجا، به معنی حالت خطرناک نیست). در این حالت، راکتور با توان خروجی ثابت کار می‌کند. وقتی راکتور زیر بحرانی باشد به‌طور میانگین، نوترون‌های آزادشده از هر شکافت، کمتر از یک شکافت بعدی را انجام می‌دهند. در راکتور زیر بحرانی، واکنش زنجیری خودنگهدار نیست و سرانجام خاموش می‌شود.

وقتی به طور میانگین، نوترون‌های هر شکافت بیشتر از یک شکافت بعدی را انجام دهند، راکتور فرابحرانی است. در حالت فرابحرانی، توان خروجی راکتور افزایش می‌یابد و اگر کنترل نشود، می‌تواند به ذوب شدن بخشی یا تمام قلب راکتور منجر شود که با پخش مواد پرتوزای خطرناک به محیط‌زیست همراه باشد.

واضح است که برای نگه‌داشتن راکتور در حالت بحرانی، سازوکاری برای کنترل آن لازم است. این عمل با تعدادی میله‌های کنترل (مواد جذب‌کنندهٔ نوترون که ترکیبی از عناصری مانند بوریم، ایندیم، کادمیم و نقره هستند) صورت می‌گیرد که می‌توانند به داخل یا خارج قلب راکتور حرکت داده شوند.

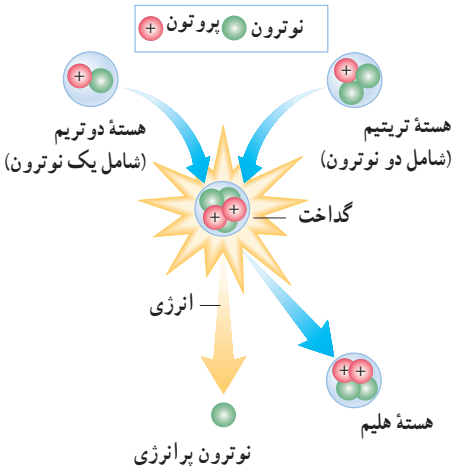


۶ــ۴ گداخت (همجوشی) هسته‌ای

یک نوع دیگر واکنش هسته‌ای که منشأ تولید انرژی در ستارگان و از جمله خورشید است، گداخت یا همجوشی هسته‌ای نام دارد. در فرایند گداخت هسته‌ای، دو هستهٔ سبک با یکدیگر ترکیب می‌شوند و هستهٔ سنگین‌تری به‌وجود می‌آورند. برای مثال، واکنش گداخت زیر را در نظر بگیرید :

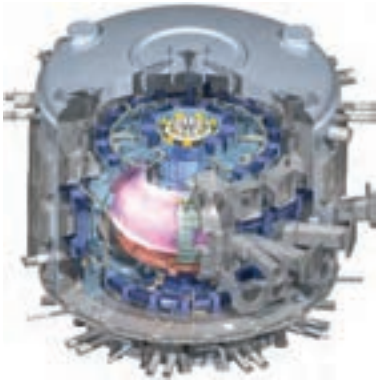
$$D + T \longrightarrow {}^{4}He + {}^{1}n$$

در این واکنش با همجوشی هسته‌های دو ایزوتوپ هیدروژن یعنی دوتریم و تریتیم، هستهٔ هلیم و یک نوترون پرانرژی تولید می‌شود (شکل ۶ــ۱۴). در واکنش گداخت، مجموع جرم محصولات فرایند، کمتر از مجموع جرم هسته‌های اولیه است. در اینجا نیز این اختلاف جرم با توجه به رابطهٔ $E=mc^2$، سبب آزاد شدن مقدار زیادی انرژی می‌شود.



شکل ۶ــ۱۴ دوتریم و تریتیم در هم گداخته می‌شوند تا هستهٔ هلیم تشکیل شود. در این واکنش، مقدار زیادی انرژی (حدود ۱۷/۶MeV) آزاد می‌شود که بخش عمده‌ای از آن به‌صورت انرژی جنبشی نوترون است.

از آنجا که در واکنش‌های گداخت، مقدار بسیار زیادی انرژی آزاد می‌شود، ساخت راکتورهای گداخت مورد توجه زیادی است (شکل ۶ــ۱۵)؛ اگرچه تاکنون نوع تجاری آن ساخته نشده است. مشکلات در ساخت راکتور گداخت به این علت پیش می‌آید که دو هستهٔ کم‌جرم باید به‌قدرکافی به‌هم نزدیک شوند تا نیروی کوتاه‌بُرد هسته‌ای بتواند آنها را کنار هم نگه دارد و واکنش گداخت انجام شود. ولی، هر هسته، بار مثبت دارد و هستهٔ دیگر را دفع می‌کند، برای آنکه هسته‌ها با وجود این نیروی رانشی بسیار قوی، بتوانند به هم گداخته شوند، باید دما بسیار بالا باشد تا هسته‌ها با انرژی جنبشی زیادی به یکدیگر برخورد کنند. به همین دلیل، برای انجام این واکنش باید مقدار زیادی انرژی صرف کرد. به‌طور مثال، برای شروع واکنش دوتریم ــ تریتیم، به دمایی حدود ده‌ها میلیون درجهٔ سلسیوس نیاز است. دمایی از این مرتبه در ستارگان و خورشید وجود دارد. مثلاً خورشید، که در آن از گداخت هسته‌های هیدروژن انرژی آزاد می شود، دمای درونی آن فراتر از ۲۰ میلیون درجهٔ سلسیوس برآورد شده است. در نتیجه واکنش گداخت هسته‌ای، در مرکز خورشید و ستارگان که دما و فشار بسیار بالاست صورت می‌گیرد.



شکل ۶ــ۱۵ طرحی از راکتور آزمایشی گرما هسته‌ای بین‌المللی (ITER)[1]. ساخت این راکتور با مشارکت چندین کشور جهان، از سال ۲۰۰۷ در فرانسه شروع شده است و پیش‌بینی می‌شود بنای آن در سال ۲۰۲۱ به اتمام برسد. قرار است این راکتور از سال ۲۰۳۵ با توان خروجی ۵۰۰ مگاوات شروع به کار کند.

آشنایی مختصر با ذرات بنیادی

تا سال ۱۹۳۲ سه ذرهٔ سازندهٔ اتم‌ها شامل الکترون، پروتون، و نوترون کشف شده بودند و به‌عنوان سه ذرهٔ بنیادی تصور می شدند؛ ولی شواهد تجربی به‌دست آمده پس از آن، نشان داد که نه تنها پروتون و نوترون ذرات بنیادی نیستند؛ بلکه صدها ذرهٔ زیر اتمی دیگر نیز وجود دارد. به‌طور کلی ذرات زیر اتمی شناخته‌شده در عالم، یا مانند الکترون، پوزیترون، نوترینوها و میون‌ها بنیادی‌اند، یا مانند پروتون، نوترون و پیون‌ها غیر بنیادی‌اند و از ذرات بنیادی‌ای به نام کوارک‌ها ساخته شده‌اند. در شتاب‌دهنده‌ها بیشتر ذرات زیر اتمی را با برخورد پروتون ها یا نوترون‌های پر انرژی با یک هستهٔ هدف به‌وجود می‌آورند. در ادامه به معرفی چند ذرهٔ بنیادی پرداخته و به طبقه‌بندی ذرات زیر اتمی نیز اشاره می‌شود.

پوزیترون : در سال ۱۹۳۲ ذره‌ای با همان جرم الکترون، ولی با بار مخالف (e+) توسط کارل اندرسون، فیزیک‌دان آمریکایی، کشف شد و جایزهٔ نوبل فیزیک ۱۹۳۶ را برای وی به همراه داشت. این الکترون مثبت، پوزیترون نامیده شد[2] که پادذرهٔ الکترون است! پوزیترون پایدار است و خودبه‌خود واپاشیده نمی‌شود.

نوترینوها : در واپاشی β با این ذره آشنا شدید که در سال ۱۹۳۰ میلادی توسط ولفگانگ پاؤلی معرفی شد و به‌طور تجربی در سال ۱۹۵۶ مورد تأیید قرار گرفت. نوترینوها (شامل سه ذره و سه پادذره) ذراتی بنیادی، بدون بار و دارای جرم بسیار اندکی هستند. همچنین آشکارسازی آنها بسیار دشوار است، زیرا با ماده برهم‌کنش بسیار ضعیفی دارند. برای مثال، در هر ثانیه از مرتبهٔ هزار میلیارد نوترینو از بدن ما می‌گذرد و اثر شناخته شده‌ای بر ما ندارد!

میون‌ها : در سال ۱۹۳۷ دو فیزیک‌دان آمریکایی، ذرات باردار جدیدی را کشف کردند که جرم آنها کمی بیش از ۲۰۰ برابر جرم الکترون و اندازهٔ بار آنها برابر بار الکترون بود. این دو ذره را که جرمی یکسان، ولی بار مخالف دارند میون می‌نامند و با نمادهای

۱ــ International Thermonuclear Experimental Reactor

۲ــ نام پوزیترون (positron)، صورت کوتاه‌شدهٔ الکترون مثبت (positive electron) است.

μ^- و μ^+ نشان می‌دهند. میون‌ها ذراتی بنیادی و دارای طول‌عمری از مرتبهٔ میکروثانیه هستند[1].

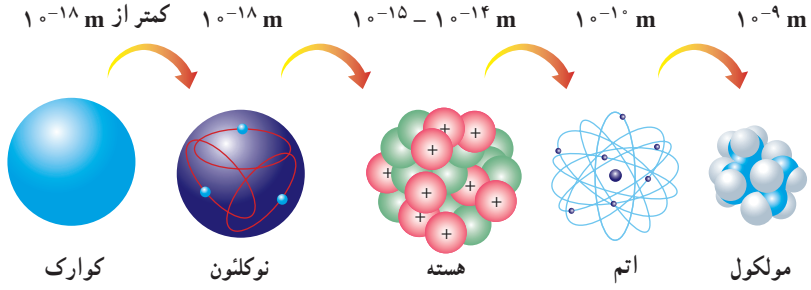
طبقه‌بندی ذرات : تمامی ذرات زیر اتمی را در سه خانوادهٔ حامل‌های نیرو، لپتون‌ها و هادرون‌ها می‌توان طبقه‌بندی کرد.

■ خانوادهٔ حامل‌های نیرو از ذراتی تشکیل شده‌اند که نقشی اساسی در برهم‌کنش‌ها بازی می‌کنند. برای مثال، فوتون که یکی از ذرات عضو این خانواده است عامل برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی است.

■ خانوادهٔ لپتون‌ها شامل ذراتی هستند که تمامی آنها بنیادی‌اند. الکترون، پوزیترون، نوترینوها و میون‌ها از جملهٔ ذرات عضو خانوادهٔ لپتون‌ها هستند.

■ خانوادهٔ هادرون‌ها، شامل ذراتی غیر بنیادی هستند که از ذرات ریزتری به نام کوارک‌ها ساخته شده‌اند. پروتون، نوترون و پیون‌ها[2] از جملهٔ ذرات خانوادهٔ هادرون‌ها به‌شمار می‌روند.

کوارک‌ها : همان‌طور که اشاره کردیم ذرات خانوادهٔ هادرون‌ها، مانند پروتون و نوترون بنیادی نیستند. برای توضیح این موضوع، در سال ۱۹۶۴ دو فیزیک‌دان آمریکایی به نام‌های موری گلمن و جورج تسوایگ به طور مستقل، مدلی را پیشنهاد کردند که مطابق آن، هادرون‌ها از ترکیب ذرات بنیادی به نام کوارک‌ها تشکیل شده‌اند. در این مدل، سه نوع کوارک و سه پادکوارک متناظر با آنها پیشنهاد شده است. به این ترتیب، می‌توان گفت ذرات بنیادی یا همان بُن سازه‌های ماده، کوارک‌ها و لپتون‌ها هستند و همهٔ عالم از آنها ساخته شده است. شکل زیر طرحی ساده از چگونگی تشکیل ماده از واحدهای اصلی را نشان می‌دهد.



کوارک‌ها، نوکلئون‌ها را می‌سازند. نوکلئون‌ها (که عضو خانوادهٔ هادرون‌ها هستند) هسته را می‌سازند. اتم‌ها از هسته و الکترون (عضو خانوادهٔ لپتون‌ها) ساخته می‌شوند. اتم‌ها، مولکول‌ها را می‌سازند و عالم ماده از آنها ساخته می‌شود.

موری گلمن (۱۹۲۹) فیزیک‌دان امریکایی، درحالی‌که فقط ۲۲ سال داشت دکترایش را در سال ۱۹۵۱ از دانشگاه MIT گرفت و دورهٔ پسادکترای خود را در دانشگاه پرینستون گذراند. وی از سال ۱۹۵۵ تا زمان بازنشستگی خود در سال ۱۹۹۳، استاد دانشگاه کَلتِک[3] بود. مجموعه کارهای گلمن در دهه‌های ۵۰ تا ۷۰ میلادی به تحولات عظیمی در فیزیک ذرات بنیادی انجامید، چنان‌که برخی از وی به نام پدر فیزیک ذرات بنیادی یاد می‌کنند. موری گلمن و جورج تسوایگ (۱۹۳۷) هر کدام به‌طور جداگانه مدلی برای ذرات سازندهٔ هادرون‌ها پیشنهاد کردند ولی گلمن بود که این ذرات بنیادی را کوارک نامید.
گلمن در سال ۱۹۶۹ برای سهم مهمی که در کشف و دسته‌بندی ذرات بنیادی و برهم‌کنش‌های آنها داشت برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک شد.

۱ــ در یک روش برای تولید میون، باریکهٔ پر انرژی پروتون (بزرگ‌تر از ۵۰۰ MeV) به هدف ثابتی از جنس کربن برخورد می‌کند و یک نوترون و یک π^+ تولید می‌شود. پس از ۲۶ns، π^+ به μ^+ تبدیل می‌شود.

۲ــ پیون‌ها در سال ۱۹۴۷ کشف شدند و به سه صورت مثبت، منفی و خنثی وجود دارند که به‌ترتیب با π^+ ، π^- و π نشان داده می‌شوند. جرم هر سه پیون با یکدیگر برابر است. پیون‌های π^+ و π^- پادذرهٔ یکدیگرند و دارای طول عمری از مرتبهٔ 10^{-8}s ثانیه هستند.

۳ــ California Institute of Technology

۶ــ۱ ساختار هسته

۱. مرتبهٔ بزرگی تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان تنگ هم در یک توپ تنیس به شعاع ۳/۲cm جای داد، تخمین بزنید. در این صورت مرتبهٔ بزرگی جرم این توپ چقدر است؟
(مرتبهٔ بزرگی شعاع و جرم نوترون را به‌ترتیب 10^{-15}m و 10^{-27}kg در نظر بگیرید.)

۲. برای $^{208}_{82}Pb$ مطلوب است :

الف) تعداد نوکلئون‌ها ب) تعداد نوترون‌ها

پ) بار الکتریکی خالص هسته

۳. در هر یک از موارد زیر نماد X چه عنصری را نشان می‌دهد و در هستهٔ هر یک چند نوترون وجود دارد؟ در صورت لزوم از جدول تناوبی استفاده کنید.

الف) $^{195}_{78}X$ ب) $^{32}_{16}X$ پ) $^{61}_{29}X$

۴. آیا می‌توان ایزوتوپ $^{61}_{25}X$ را با روش شیمیایی از ایزوتوپ $^{59}_{25}X$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ $^{61}_{26}Y$ چطور؟ پاسخ خود را توضیح دهید.

۶ــ۲ پرتوزایی طبیعی و نیمه‌عمر

۵. جاهای خالی در فرایندهای واپاشی زیر نشان‌دهندهٔ یک یا چند ذرهٔ α ، β^+ یا β^- است. در هر واکنش، جای خالی را کامل کنید.

$$^{211}_{82}Pb \longrightarrow {}^{211}_{83}Bi + \ldots$$

$$^{11}_{6}C \longrightarrow {}^{11}_{5}B + \ldots$$

$$^{231}_{90}Th^{*} \longrightarrow {}^{231}_{90}Th + \ldots$$

$$^{18}_{9}F \longrightarrow {}^{18}_{8}O + \ldots$$

۶. هستهٔ دختر به‌دست‌آمده از هر یک از واپاشی‌های زیر را به‌صورت $^{A}_{Z}X$ مشخص کنید.

الف) $^{242}_{94}Pu$ واپاشی α انجام دهد.

ب) سدیم $^{24}_{11}Na$ واپاشی β^- انجام دهد.

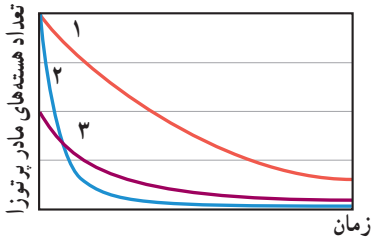
پ) نیتروژن $^{13}_{7}N$ واپاشی β^- انجام دهد.

ت) $^{15}_{8}O$ واپاشی β^+ انجام دهد.

۷. سرب $^{207}_{82}Pb$ هستهٔ دختر پایداری است که می‌تواند از واپاشی α یا واپاشی β^- حاصل شود. فرایندهای مربوط به هر یک از این واپاشی‌ها را بنویسید. در هر مورد هستهٔ مادر را به‌صورت $^{A}_{Z}X$ مشخص کنید.

۸. نپتونیم $^{237}_{93}Np$ ایزوتوپی است که در راکتورهای هسته‌ای تولید می‌شود. این ایزوتوپ ناپایدار است و واپاشی آن از طریق گسیل ذرات α، β، α و α صورت می‌گیرد. پس از وقوع تمام این واپاشی‌ها، عدد اتمی و عدد جرمی هستهٔ نهایی چقدر است؟

۹. شکل زیر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر پرتوزای سه نمونه را برحسب زمان نشان می‌دهد. نیمه‌عمر این سه نمونه را با هم مقایسه کنید.



۱۰. هنگامی‌که نیتروژن جوّ زمین توسط پرتوهای کیهانی (که معمولاً از جنس پروتون، ذره‌های α و الکترون هستند) بمباران می‌شود، ایزوتوپ پرتوزای کربن ۱۴ با آهنگ ثابتی در لایه‌های فوقانی جو تولید می‌شود. این کربن پرتوزا، با کربن ۱۲ که به‌طور طبیعی در جو وجود دارد درهم می‌آمیزد. بررسی‌ها نشان داده است که به‌ازای هر ۱۰۰۰۰ میلیارد اتم پایدار کربن ۱۲، تقریباً یک اتم پرتوزای کربن ۱۴ از این طریق وارد جوّ می‌شود.
اتم‌های کربن جوّی از طریق فعالیت‌های بیولوژیکی از قبیل فتوسنتز و تنفس، به‌نحو کاتوره‌ای مکان خود را عوض می‌کنند و به بدن جانداران منتقل می‌شوند. به‌طوری‌که اتم‌های کربن هر موجود زنده شامل کسر کوچک و ثابتی از ایزوتوپ پرتوزای کربن ۱۴ است.
وقتی موجود زنده‌ای می‌میرد، مقدار کربن پرتوزای به تله افتاده در موجود غیرزنده، با نیمه‌عمر ۵۷۳۰ سال رو به کاهش می‌گذارد. کربن ۱۴ موجود در یک نمونهٔ زغال قدیمی، ۱/۵۶ درصد (معادل $\frac{1}{64}$) مقدار عادی کربن ۱۴ موجود در زغالی است که تازه تولید

شده است. سن تقریبی این زغال قدیمی چقدر است؟

۱۱. نیمه‌عمر بیسموت ۲۱۲ حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از مادهٔ اولیه، در نمونه‌ای از این بیسموت، باقی می‌ماند؟

۶ــ۳ شکافت هسته‌ای

۱۲. معادلهٔ زیر بخشی از واکنشی را نشان می‌دهد که در یک راکتور هسته‌ای روی می‌دهد.

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{236}_{92}U$$

الف) اهمیت عددهای ۲۳۵ و ۹۲ را توضیح دهید.

ب) اتم‌های $^{236}_{92}U$ ناپایدارند و خودبه‌خود به قطعه‌هایی کوچک‌تر همراه با تعدادی نوترون سریع (بین ۲ تا ۵ عدد) و مقدار زیادی انرژی واپاشیده می‌شود. این فرایند چه نام دارد و انرژی آزاد شده در این فرایند چگونه تعیین می‌شود؟

پ) اورانیم ۲۳۵ عمدتاً نوترون‌های با تندی کم را جذب می‌کند تا نوترون‌های سریع را. توضیح دهید چگونه تندی نوترون‌ها را در قلب راکتور کم می‌کنند.

ت) چگونه تولید انرژی را در قلب راکتور کنترل می‌کنند؟

ث) واکنش زنجیری را توضیح دهید.

ج) انرژی به‌صورت گرما در قلب راکتور تولید می‌شود. چگونه گرما از قلب راکتور گرفته و به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود؟

چ) هنگامی‌که میله‌های سوخت از مرکز راکتور بیرون کشیده می‌شوند، آنها «پرتوزا» و «ایزوتوپ»هایی با «نیمه‌عمر» طولانی هستند. واژه‌های داخل گیومه را توضیح دهید.

۱۳. الف) حدود ۰/۷درصد اورانیوم موجود در سنگ معدن طبیعی اورانیم از ایزوتوپ ۲۳۵ تشکیل شده است. در هر واکنش شکافت حدود ۲۰۰MeV انرژی آزاد می‌شود. فرض کنید تمامی ایزوتوپ ۲۳۵ موجود در یک کیلوگرم از این اورانیم بتواند بر اثر شکافت، انرژی خود را آزاد کند. مقدار این انرژی برحسب مگاالکترون ولت (MeV) و ژول (J) چقدر است؟

ب) با سوختن هر کیلوگرم زغال سنگ، حدود ۳۰MJ انرژی گرمایی آزاد می‌شود. چند کیلوگرم زغال سنگ باید بسوزد تا معادل انرژی به دست آمده در قسمت الف، انرژی تولید شود؟

۱۴. یکی از واکنش‌های ممکن در شکافت $^{235}_{92}U$، داده شده است. در این واکنش عدد اتمی Z، عدد جرمی A و عنصر X را در $^{A}_{Z}X$ تعیین کنید.

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{133}_{51}Sb + {}^{A}_{Z}X + 4\,{}^{1}_{0}n$$

در صورت لزوم از جدول تناوبی کمک بگیرید.

۱۵. در واکنش زیر چه تعداد نوترون تولید می‌شود؟

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{133}_{50}Sn + {}^{101}_{42}Mo + \text{نوترون‌ها}$$

۱۶. بازده نیروگاه هسته‌ای بوشهر حدود ۳۵درصد است. یعنی ۶۵درصد انرژی حاصل از شکافت ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵، به‌صورت گرما تلف و حدود ۳۵درصد آن، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه در هر شکافت حدود ۲۰۰MeV انرژی آزاد می‌شود، چند کیلوگرم اورانیم ۲۳۵ در سال شکافت پیدا می‌کند؟ (فرض کنید نیروگاه در طول سال با توان پایدار ۱۰۰۰ مگاوات کار می‌کند.)

۶ــ۴ گداخت هسته‌ای

۱۷. انرژی آزادشده در هر واکنش شکافت اورانیم ۲۳۵ با یک نوترون کُند حدود ۲۰۲/۵ MeV و در هر واکنش گداختِ دوتریم با تریتیم حدود ۱۷/۶ MeV است.

الف) تعداد نوکلئون‌های شرکت‌کننده در هر واکنش شکافت چقدر است؟ انرژی آزادشده به‌ازای هر نوکلئون را حساب کنید.

ب) تعداد نوکلئون‌های شرکت‌کننده در هر واکنش گداخت چقدر است؟ انرژی آزاد شده به ازای هر نوکلئون را حساب کنید.

پ) نتیجه‌های قسمت (الف) و (ب) را با یکدیگر مقایسه کنید. با توجه به نیاز روزافزون بشر به انرژی، و با توجه به اینکه مواد قابل شکافت مانند ^{235}U به مقدار بسیار کمی در طبیعت وجود دارد ولی دوتریم به‌طور فراوان در آب اقیانوس‌ها و دریاها موجود است و جدا کردن آن از هیدروژن معمولی آسان و کم‌هزینه است، اهمیت این مقایسه را توضیح دهید.