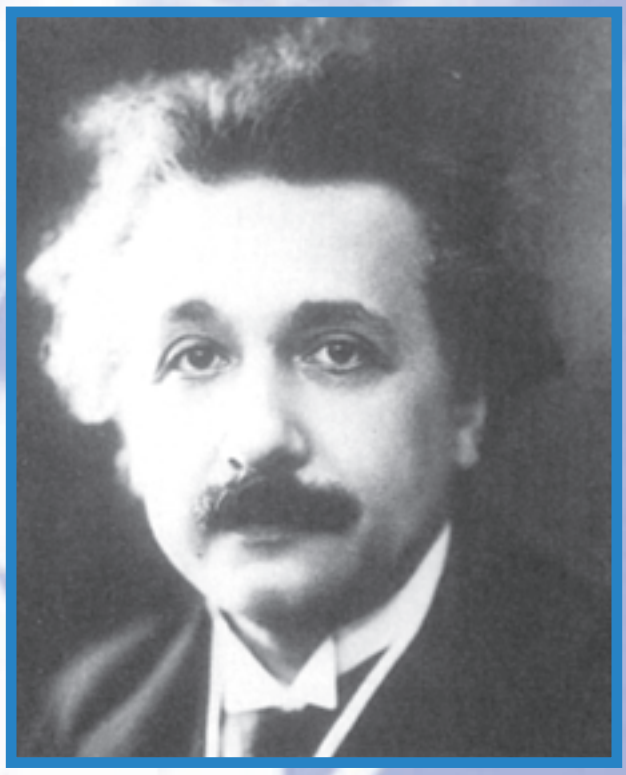
۴

آشنایی با ساختار هسته



آلبرت اینشتین
(۱۹۵۵ــ ۱۸۷۹م)

آشنایی با ساختار هسته

در فصل قبل با برخی از مفهوم‌های فیزیک جدید آشنا شدیم. نظریه‌های نسبیت و کوانتومی در سده‌ی بیستم میلادی، فیزیک را به‌طور کامل متحول ساخت. امروزه دانشمندان به کمک مفهوم‌ها و نظریه‌های مکانیک کوانتومی برای بسیاری از پدیده‌ها به توجیه‌های کاملاً سازگار با تجربه دست یافته‌اند.

در این فصل یکی از موضوع‌هایی که در فیزیک جدید مطرح می‌شود ؛ یعنی ساختار هسته‌ی اتم و برخی از ویژگی‌ها و واکنش‌های مربوط به آن را بررسی می‌کنیم.

۴ــ۱ــ ساختار هسته‌ی اتم

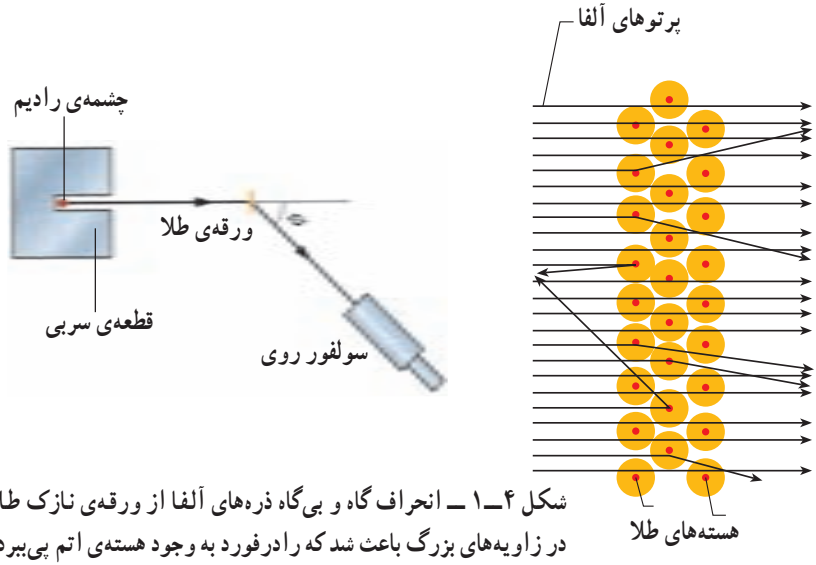
کشف پرتوزایی در سال ۱۸۹۶ میلادی (۱۲۷۵ هـ.ش) آغازی برای پی‌بردن به وجود هسته‌ی اتم بود. این کشف به شناخت کنونی ما از اتم انجامید و اطلاعاتی را در اختیار ما قرار داد که پیامدهای آن تأثیری ژرف بر جامعه‌ی بشری داشت.

کشف هسته‌ی اتم: چند سال پس از آن که اینشتین اثر فوتوالکتریک را توجیه کرد، ارنست رادرفورد آزمایشی را انجام داد که معلوم کرد اتم تقریباً از فضای تهی تشکیل شده و بیش‌تر جرم آن در بخش مرکزی به نام هسته متمرکز شده است.

در این آزمایش، باریکه‌ای از ذره‌های دارای بار مثبت (ذره‌های آلفا) گسیل شده از چشمه‌ای پرتوزا بر ورقه‌ای نازک از طلا فرود می‌آمدند. چون ذره‌های آلفا بسیار سنگین‌تر از الکترون‌ها هستند، انتظار می‌رفت که این ذره‌ها بدون برخورد با مانع از ورقه‌ی طلا بگذرند. در عمل نیز اغلب این ذره‌ها بدون انحراف یا با انحراف مختصر از ورقه می‌گذشتند و در برخورد با صفحه‌ی فلوئورسان، در پشت آن، جرقه‌های نورانی تولید می‌کردند. با این همه، برخی از این ذره‌ها در هنگام خروج از ورقه در زاویه‌های بزرگ منحرف می‌شدند و حتی تعدادی از آن‌ها به عقب برمی‌گشتند! رادرفورد می‌گفت :« مثل آن بود که گلوله‌ی توپی را به ورقه‌ی نازکی از کاغذ شلیک کنید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از برخورد گلوله، توپ بازگردد.»

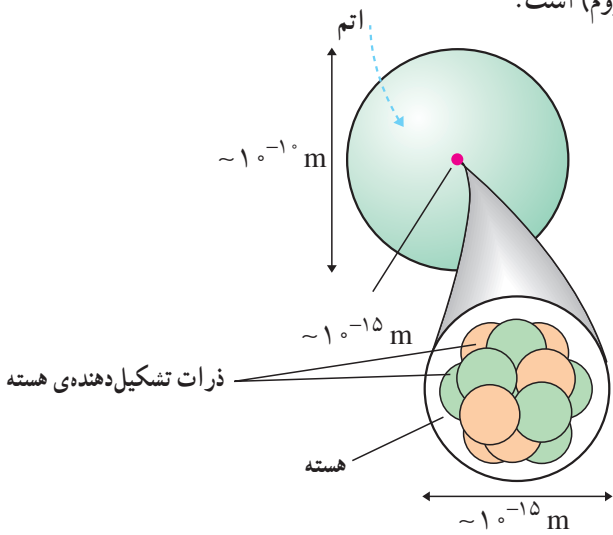
این ذره‌ها باید با چیز پرجرمی برخورد کرده باشند ؛ اما با چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد

که ذره‌های بدون انحراف باید از قسمت‌هایی از ورقه گذشته باشند که تهی بوده باشند، در حالی که ذره‌های با انحراف شدید از مرکزهایی بسیار چگال و دارای بار مثبت منحرف شده بودند. او نتیجه گرفت که هر اتم باید دارای **هسته‌ای** چگال و دارای بار مثبت باشد.



شکل ۴ــ۱ ــ انحراف گاه و بی‌گاه ذره‌های آلفا از ورقه‌ی نازک طلا در زاویه‌های بزرگ باعث شد که رادرفورد به وجود هسته‌ی اتم پی‌ببرد.

بررسی‌های رادرفورد نشان داد که ابعاد هسته‌ی اتم در حدود $10^{-15}\,m$ (۱ فرمی یا ۱ فمتومتر) و ابعاد اتم $10^{-10}\,m$ (۱آنگستروم) است.



شکل ۴ــ۲ــ مقایسه‌ی ابعاد هسته‌ی اتم و اتم

فعالیت ۴ــ۱

در یک زمین ورزشی ناحیه‌ای را مشخص کنید که ابعاد آن به همان اندازه کوچک‌تر از ابعاد زمین باشد که ابعاد هسته کوچک‌تر از ابعاد اتم است.

در زمان کشف هسته‌ی اتم فقط ذره‌های شناخته شده‌ی زیر اتمی الکترون و هسته‌ی هیدروژن معمولی (پروتون) بودند. بعدها با کشف نوترون معلوم شد که هسته از پروتون و نوترون ساخته شده است. جدول ۴ــ۱، جرم، بار الکتریکی و شعاع هر یک از این ذرات را نشان می‌دهد.

تعداد پروتون‌های هسته با Z مشخص می‌شود و آن را «عدد اتمی» می‌نامند. چون اتم به لحاظ الکتریکی خنثی است، Z تعداد الکترون‌های اتم نیز هست. تعداد نوترون‌های هسته را با N نشان می‌دهند و آن را «عدد نوترونی» می‌نامند. مجموع عدد اتمی و عدد نوترونی یعنی $Z+N$ را «عدد جرمی» می‌نامند و آن را با A نشان می‌دهند.

$$A = Z + N \qquad (۱ــ۴)$$

در فیزیک هسته‌ای هر هسته را با نماد شیمیایی مربوط به آن و A و Z را به صورت زیر مشخص می‌کنند.

$$\text{هسته‌ی اتم X} = {}^{A}_{Z}X$$

مشخص کردن N ضروری نیست ؛ زیرا می‌توان آن را از تفاضل A و Z به دست آورد. همین‌طور در بسیاری موارد Z را هم ذکر نمی‌کنند ؛ زیرا نماد شیمیایی معرف آن است ؛ مثلاً :

هسته‌ی اتم هیدروژن = ${}^{1}H$ یا ${}^{1}_{1}H$

هسته‌ی اتم اکسیژن = ${}^{16}O$ یا ${}^{16}_{8}O$

هسته‌ی اتم آهن = ${}^{56}Fe$ یا ${}^{56}_{26}Fe$

ایزوتوپ‌ها: ویژگی‌های هر اتم را تعداد الکترون‌های آن اتم مشخص می‌کند. اما ویژگی‌های هسته را تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های آن تعیین می‌کند ؛ بنابراین، تعداد هسته‌های متفاوت موجود در طبیعت بسیار بیش‌تر از تعداد اتم‌های متفاوت است. اتم‌های با تعداد پروتون معین و تعداد نوترون‌های مختلف را ایزوتوپ (هم‌مکان) می‌نامند ؛ زیرا همگی در جدول مندلیف یک خانه را اشغال می‌کنند. ایزوتوپ‌ها دارای خواص شیمیایی یکسان و خواص هسته‌ای کاملاً متفاوت‌اند. این تفاوت ویژگی‌های هسته‌ای ایزوتوپ‌های مختلف را می‌توان با توجه به دو ایزوتوپ اورانیم ــ ۲۳۵ و اورانیم ــ ۲۳۸ به

خوبی نشان داد. ^{235}U به راحتی شکافته می‌شود و می‌توان از آن در راکتورهای هسته‌ای به عنوان سوخت استفاده کرد. ^{238}U این ویژگی را ندارد و چون به راحتی شکافته نمی‌شود نمی‌توان از آن مستقیماً به عنوان سوخت هسته‌ای استفاده کرد. هر عنصر هم دارای ایزوتوپ‌های پایدار و هم پرتوزاست عناصری هم وجود دارند مانند رادون که ایزوتوپ پایدار ندارند؛ از برخی ایزوتوپ‌های پرتوزا به عنوان ردیاب در موارد مختلف پزشکی، کشاورزی و صنعت استفاده می‌کنند. چون این ایزوتوپ‌های پرتوزا از نظر شیمیایی تفاوتی با ایزوتوپ‌های پایدار ندارند، پس رفتار آن‌ها هنگام جذب در بدن یا گیاهان مانند ایزوتوپ‌های پایدار است و چون پرتوهایی را از خود گسیل می‌دارند، می‌توان محل و تراکم آن‌ها را به دقت مشخص کرد.

جدول ۴ــ۱

نام ذره	بار (کولن)	جرم (kg)	شعاع (fm[1])
الکترون	$-1/6\times10^{-19} = -e$	$9/1\times10^{-31} = Me$	غیرقابل اندازه‌گیری با وسایل موجود
پروتون	$+1/6\times10^{-19} = +e$	$1/67\times10^{-27} = Mp$	۱/۲
نوترون	صفر	$1/68\times10^{-27} = Mn$	۱/۲

۱. فمتومتر یا فرمی

نیروی هسته‌ای :دیدیم که ابعاد هسته بسیار کوچک است (در حدود 10^{-15} m). همین‌طور گفتیم که بیش‌تر جرم اتم در هسته متمرکز شده است. با توجه به این نکته‌ها می‌توان چگالی هسته را به راحتی محاسبه کرد. با محاسبه‌ی آن به مقدار تقریباً 10^{14} g/cm^3 می‌رسیم که به صورتی باورنکردنی بزرگ است (چگالی آب ۱g/cm^3). موضوع وقتی شگفت‌انگیزتر می‌شود که توجه کنیم نیروی کولنی شناخته شده بین پروتون‌های دارای بار مثبت رانشی است. پس اصلاً انتظار نداریم که دستگاه متشکل از ذرات دارای بار هم‌نام پایدار باشد تا چه رسد به این که تا این حد هم چگال باشد. البته نیروی گرانشی موجود بین اجزای هسته ربایشی است اما، نیروی گرانشی بسیار ضعیف‌تر از نیروی کولنی است؛ پس نمی‌تواند عامل پایداری هسته و چگال بودن آن باشد.

این موضوع وجود نیروی جدیدی را در طبیعت مطرح کرد که به **نیروی هسته‌ای قوی** مشهور شد. این نیرو، با نیروی شناخته شده‌ی کولنی و گرانشی تفاوت بسیار دارد؛ زیرا اوّلاً، بسیار

قوی‌تر از این نیروهاست ؛ چون اجزای هسته را به رغم نیروی رانشی بین پروتون‌های آن به صورت بسیار فشرده در کنار هم نگه می‌دارد. دوم این که، این نیرو، برخلاف نیروهای کولنی و گرانشی، کوتاه بُرد است ؛ زیرا در ابعاد اتمی (10^{-10} m)، دیگر اثری از آن مشاهده نمی‌شود و اتم به کمک نیروی کولنی بین هسته‌ی دارای بار مثبت و الکترون دارای بار منفی بررسی می‌شود.

فعالیت ۴ــ۲

با مراجعه به کتاب‌های فیزیک ۲ و ۳ و با استفاده از جدول ۴ــ۳ نیروهای گرانشی و الکتریکی بین دو پروتون را که به فاصله‌ی r از یک‌دیگر قرار دارند، محاسبه کنید.

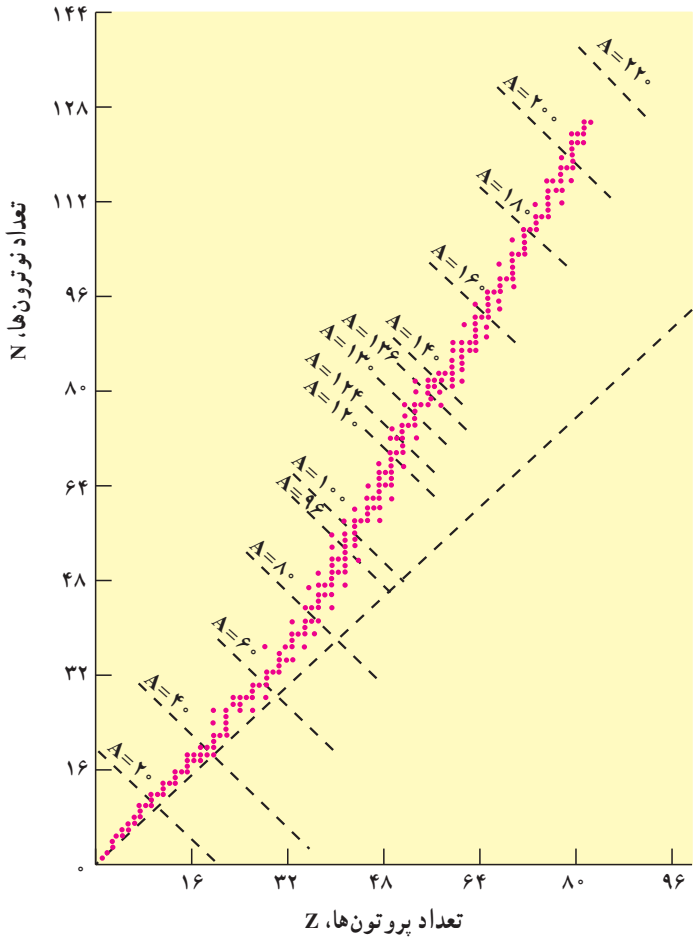
پایداری هسته‌ها: دیدیم که در هسته علاوه بر نیروی رانش کولنی بین پروتون‌ها، نیروی ربایش هسته‌ای بین کلیه اجزاء هسته اعم از پروتون‌ها و نوترون‌ها نیز حکمفرماست. از دید نیروی هسته‌ای، تفاوتی بین پروتون و نوترون وجود ندارد. از این رو آن‌ها را با نام عام «نوکلئون» نیز می‌نامند. پس وقتی می‌گوییم نوکلئون منظورمان پروتون یا نوترون است و آن‌ها از نظر نیروی هسته‌ای تفاوتی ندارند.

نیروی هسته‌ای گرچه بسیار قوی بوده اما **کوتاه بُرد** است ؛ بنابراین، هر نوکلئون فقط به نوکلئون‌های مجاور خود نیروی هسته‌ای وارد می‌کند. اما، نیروی کولنی گرچه دارای شدت کم‌تری است اما بلند برد است و هر پروتون به تمام پروتون‌های موجود در هسته نیروی رانشی وارد می‌سازد ؛ بنابراین، به تدریج با زیاد شدن تعداد پروتون‌ها در هسته نقش نیروی کولنی بارز می‌شود و اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند. این موضوع سبب ناپایداری هسته می‌شود. همان‌طور که قبلاً گفتیم، اغلب ایزوتوپ‌های عناصر، ناپایدارند. ایزوتوپ‌های ناپایدار با گذشت زمان واپاشیده می‌شوند و سرانجام به ایزوتوپ‌های پایدار تبدیل می‌شوند.

واپاشی برخی از ایزوتوپ‌ها بسیار سریع صورت می‌گیرد، در حالی که واپاشی بعضی از آن‌ها به قدری کُند است که از زمان تشکیل زمین تاکنون هنوز کاملاً از بین نرفته‌اند.

عدد اتمی عنصرهای طبیعی موجود در طبیعت $1 \leq Z \leq 92$ است. عناصر با $Z > 92$ را به طور مصنوعی در آزمایشگاه تولید می‌کنند و به آن‌ها «عناصر فرا اورانیمی» گویند. همین‌طور عدد نوترونی عنصرهای موجود در طبیعت $0 \leq N \leq 146$ است.

خط $N = Z$ و نمودار تغییرات N و Z عنصرهای پایدار در شکل ۴ــ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خطّ پایداری ایزوتوپ‌ها ابتدا بر خط $N = Z$ منطبق است اما با زیادشدن Z به تدریج از آن منحرف می‌شود و ایزوتوپ‌های پایدار سنگین‌تر دارای تعداد نوترون بیش از پروتون‌اند. دلیل آن نیز روشن است ؛ زیرا نوترون به هسته رایش هسته‌ای اضافه می‌کند بدون این که رانش کولنی داشته باشد.



شکل ۴ــ۳

فعالیت ۴ــ۳

با توجه به شکل ۴ــ۳ و با بحث در گروه خود به پرسش‌های زیر پاسخ دهید ؛

الف) خط راست خط‌چین به چه مقدارهای Z، N و A مربوط می‌شود؟

ب) آیا نسبت تعداد نوترون به تعداد پروتون برای هسته‌های پایدار مختلف ثابت است یا تغییر می‌کند؟ اگر تغییر می‌کند این تغییر چگونه است؟

پ) ایزوتوپ‌های مختلف یک عنصر را چگونه می‌توان با استفاده از شکل تشخیص داد؟

اکنون با استفاده از راکتورهای هسته‌ای و شتابگرها می‌توان ایزوتوپ‌های مختلف را به طور مصنوعی تولید کرد. همان‌طور که قبلاً هم توضیح دادیم این ایزوتوپ‌ها کاربردهای روزافزونی در پزشکی برای تشخیص و درمان، در کشاورزی برای بررسی چگونگی جذب مواد در گیاهان، و در صنعت برای ردیابی جریان‌ها و کنترل کیفیت دارند.

انرژی بستگی هسته: اندازه‌گیری‌های دقیق نشان می‌دهد که جرم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل دهنده‌اش اندکی کم‌تر است. این موضوع در مورد اتم‌ها نیز درست است. به طوری که جرم اتم هم از مجموع جرم هسته و الکترون‌های آن کم‌تر است اما این تفاوت جرم برای هسته بیش‌تر است ؛ اگر جرم هسته‌ی X را با M_x و جرم پروتون را با M_p و جرم نوترون را با M_n نشان دهیم، خواهیم داشت :

$$M_x < ZM_p + NM_n \qquad (۲ــ۴)$$

اگر اختلاف جرم دو طرف رابطه‌ی بالا را با ΔM نشان دهیم، خواهیم داشت :

$$\Delta M = ZM_p + NM_n - M_x \qquad (۳ــ۴)$$

این اختلاف جرم طبق رابطه‌ی معروف اینشتین :

$$E = mc^2 \qquad (۴ــ۴)$$

به انرژی تبدیل می‌شود. این انرژی را «انرژی بستگی» می‌نامند و آن را با B نشان می‌دهند. پس داریم :

$$B = \Delta mc^2 = \left[ZM_p + NM_n - M_x\right] c^2 \qquad (۵ــ۴)$$

در موقع تشکیل هسته‌ی X از Z پروتون و N نوترون این انرژی آزاد می‌شود و برای جداکردن هسته به اجزاء تشکیل دهنده‌اش، این انرژی را باید مصرف کرد.

توجه داریم که در فرایندهای هسته‌ای معمولاً جرم محصولات فرایند از جرم ذرات اولیه اندکی کم‌تر است. این تفاوت جرم طبق رابطه‌ی ۴ــ۵ به انرژی تبدیل می‌شود. چون این اختلاف جرم در c^2 ضرب می‌شود، اختلاف جرم بسیار مختصر سبب تولید انرژی قابل ملاحظه می‌شود.

یکای جرم اتمی :در واکنش‌های هسته‌ای، با تبدیل جرم به انرژی سروکار داریم و جرمی که به انرژی تبدیل می‌شود، بسیار کوچک است ؛ بنابراین، نمی‌توان از یکاهای متداول جرم چون کیلوگرم و گرم استفاده کرد. یکای مورد استفاده در فیزیک هسته‌ای **یکای جرم اتمی** است که آن را با «u» نشان می‌دهند و عبارت است از $\frac{1}{12}$ جرم اتم کربن ۱۲ که آن را طبق تعریف ۱۲/۰۰۰۰۰۰u در نظر می‌گیرند. برحسب این یکا، جرم پروتون ۱/۰۰۷۲۷۶u و جرم نوترون ۱/۰۰۸۶۶۵u است.

مثال ۴ــ۱

الف : یکای جرم اتمی را برحسب کیلوگرم محاسبه کنید.

ب : اگر ۱u تبدیل به انرژی شود، این انرژی معادل چند الکترون است؟

پاسخ

می‌دانیم که یک مول از هر ماده حاوی تعداد ذرات (اتم، مولکول یا هر چیز دیگر) مساوی زیر است :

به ازای هر مول $N_A = 6/022137 \times 10^{23}$

پس یک مول کربن یعنی ۰/۰۱۲kg نیز حاوی همین تعداد اتم کربن است ؛ پس :

$$1u = \frac{1}{12}(0/012kg)\frac{1}{6/022137 \times 10^{23}} = 1/66054 \times 10^{-27} kg$$

حال انرژی معادل این جرم برابر است با :

$$c = 2/99792458 \times 10^{8} m/s$$

$$E = 1u \times c^2$$

$$= (1/66 \times 10^{-27} kg)(2/99792458 \times 10^{8} m/s)^2 = 1/49 \times 10^{-10} J$$

می‌دانیم که

$$1J = 6/24151 \times 10^{18} eV = 6/24151 \times 10^{12} MeV$$

پس، انرژی معادل جرم ۱u برابر است با :

$E = ۹۳۱/۵ MeV$

برای به دست آوردن انرژی آزاد شده در فرایندهای هسته‌ای کافی است اختلاف جرم دو طرف واکنش برحسب u را در ۹۳۱/۵ ضرب کنیم تا انرژی برحسب MeV به دست آید.

در فرایندهای هسته‌ای اصل پایستگی جرم و انرژی به تنهایی برقرار نیستند بلکه در این فرایندها **مجموع جرم و انرژی در برهم کنش پایسته می‌ماند.**

مثال ۴ــ۲

هسته‌ی دوتریم را که از یک پروتون و نوترون تشکیل شده است، «دوترن» می‌نامند. جرم اتمی ^{۲}H برابر ۲/۰۱۴۱۰۲u است. انرژی بستگی آن را محاسبه کنید.

پاسخ: ابتدا جرم هسته‌ی دوتریوم را حساب می‌کنیم.

جرم هسته‌ی دوتریوم = جرم اتم دوتریوم − جرم یک الکترون

$$m(^{۲}H) = M(^{۲}H) - M(e)$$

$$= ۲/۰۱۴۱۰۲u - ۰/۰۰۰۵۴۹u$$

$$= ۲/۰۱۳۵۵۳u$$

به این ترتیب انرژی بستگی هسته‌ی دوتریم برابر است با

$$B = \left[m_n + m_p - m(^{۲}H)\right] c^{۲}$$

$$= [۱/۰۰۸۶۶۵u + ۱/۰۰۷۲۷۶u - ۲/۰۱۳۵۵۳u] \times ۹۳۱/۵ = ۲/۲۲ \ MeV$$

تمرین ۴ــ۱

انرژی بستگی ^{۴}He را به دست آورید. جرم اتمی ^{۴}He برابر ۴/۰۰۲۶۰۳u است.

ترازهای انرژی هسته :انرژی نوکلئون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم کوانتیده‌اند و نوکلئون وابسته به هسته نمی‌تواند هر انرژی دلخواهی را اختیار کند. اما اختلاف انرژی ترازهای نوکلئون در هسته بسیار بیش از این اختلاف در اتم‌هاست. در فصل قبل دیدیم که اختلاف انرژی ترازهای الکترون‌ها در اتم حدود چند الکترون ولت است. در حالی که اختلاف انرژی ترازهای نوکلئون‌ها در هسته‌های سبک حدود میلیون الکترون ولت (MeV) و در هسته‌های سنگین حدود کیلوالکترون ولت (keV) است.

همان‌گونه که الکترون‌های اتم می‌توانند با جذب انرژی از حالت پایه به حالت برانگیخته بروند، نوکلئون‌ها نیز می‌توانند با جذب انرژی به ترازهای انرژی بالاتر بروند و هسته را برانگیخته سازند.

هسته‌های برانگیخته نیز درست مانند اتم‌های برانگیخته می‌توانند با گسیل فوتون به حالت پایه برگردند. انرژی فوتون گسیل شده نیز برابر اختلاف انرژی بین حالت برانگیخته و حالت پایه یا بین دو حالت برانگیخته است. هسته‌ی برانگیخته را با گذاشتن ستاره روی نماد ${}^{A}_{Z}X$ به صورت ${}^{A}_{Z}X^{*}$ مشخص می‌کنند.

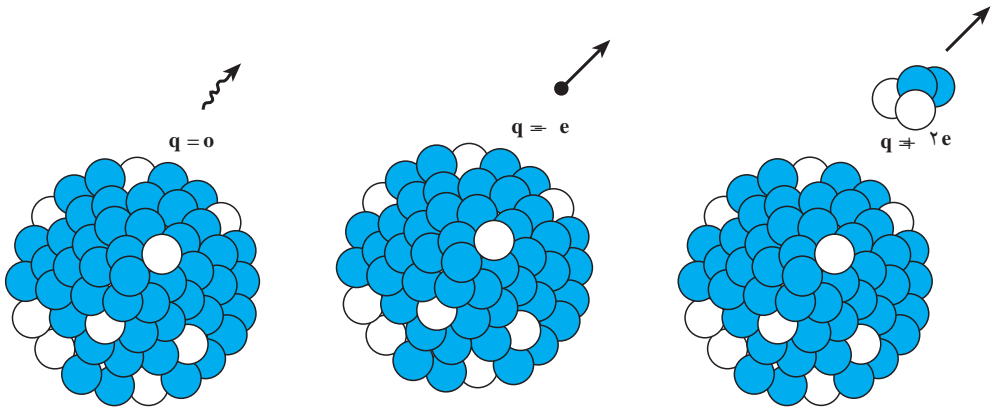
همان‌گونه که دیدیم، انرژی واکنش شیمیایی در حدود چند الکترون ولت و انرژی لازم برای برانگیختگی هسته‌ها معمولاً در محدوده‌ی کیلوالکترون ولت تا میلیون الکترون ولت است ؛ از این‌رو، هسته‌ها در واکنش‌های شیمیایی برانگیخته نمی‌شوند.

۴ــ۲ــ پرتوزایی

همان‌طور که قبلاً گفتیم، تحول‌هایی در فیزیک که به پیدایش فیزیک جدید و گسترش فیزیک هسته‌ای انجامید با کشف پدیده‌ی پرتوزایی شکل گرفت. در سال ۱۸۹۶ میلادی، **هانری بکرل** به صورت کاملاً تصادفی متوجه شد که سنگ معدن اورانیم پرتوهای نافذی را از خود گسیل می‌دارد. هسته‌های پرتوزا ناپایدارند و با گذشت زمان خود به خود و بدون تأثیرپذیری از شرایط خارجی، پرتوهایی را گسیل می‌دارند و به تدریج به هسته‌های پایدار تبدیل می‌شوند. همان‌گونه که در شکل ۴ــ۴ نشان داده شده است، هسته‌های پرتوزا با گسیل یکی از پرتوهای زیر واپاشیده می‌شوند.

۱ــ واپاشی آلفازا: در این نوع واپاشی که در هسته‌های سنگین صورت می‌گیرد، هسته‌ی ${}^{A}_{Z}X$ با گسیل ذره‌ی α (${}^{4}_{2}He$) متشکل از دو پروتون و دو نوترون وا می‌پاشد (شکل ۴ــ۴ ــ الف).

$$ {}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He \qquad (۶ــ۴) $$



الف ــ گسیل پرتو α ب ــ گسیل پرتو β پ ــ گسیل پرتو γ

شکل ۴ــ۴

هسته‌ی X را «هسته‌ی مادر» و هسته‌ی Y را «هسته‌ی دختر» می‌نامند ؛ هسته‌ی Y محصول واپاشی دارای عددجرمی $A-۴$ و عدد اتمی $Z-۲$ است. این واپاشی با آزاد شدن انرژی همراه است که این انرژی بین محصولات واپاشی تقسیم می‌شود و بخش عمده‌ی آن را ذره‌ی α به همراه می‌برد. ذره‌های آلفا سنگین و دارای دو بار مثبت‌اند. بُرد این ذره‌ها بسیار کوتاه است و به سرعت جذب می‌شوند ولی اگر این ذره‌ها از راه تنفس یا دستگاه گوارش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت‌های بدن می‌شوند، بنابراین، باید مواظب بود که مواد آلفا گسیل هرگز وارد بدن نشوند.

۲ــ واپاشی بتازا: این متداول‌ترین نوع واپاشی در هسته‌هاست. در این واپاشی هسته‌ی ناپایدار با گسیل الکترون یا پوزیترون (ذره‌ای دارای جرم برابر جرم الکترون و بار مخالف آن) به هسته‌ی جدیدی تبدیل می‌شود (شکل ۴ــ۴ــ ب).

این نوع واپاشی بسیار شگفت‌انگیز است ؛ زیرا الکترون قبلاً در هسته وجود ندارد و در حین واپاشی به وجود می‌آید. در فرایند واپاشی همراه با گسیل الکترون یک نوترون در هسته تبدیل به پروتون و الکترون می‌شود. فرایند را می‌توان به صورت زیر نوشت :

$$^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A}_{Z+۱}Y + {}^{۰}_{-۱}e^{-} \qquad (۷ــ۴)$$

در فرایند گسیل پوزیترون یک پروتون به نوترون و پوزیترون تبدیل می‌شود که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت :

$$^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A}_{Z-۱}Z + {}^{۰}_{+۱}e^{+} \qquad (۸ــ۴)$$

محصول این نوع واپاشی هسته‌ی جدیدی است که عدد اتمی آن برخلاف مورد گسیل الکترون که عدد اتمی هسته‌ی دختر یک واحد بیش‌تر از هسته‌ی مادر است، یک واحد از هسته‌ی مادر کم‌تر است.

۳ــ واپاشی گامازا: در این نوع واپاشی، هیچ یک از عددهای جرمی و اتمی هسته تغییر نمی‌کند بلکه هسته‌ای که در حالت برانگیخته است، با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسد. (شکل ۴ــ۴ــپ) این فرایند را می‌توان به صورت زیر نشان داد :

$$ {}^{A}_{Z}X^{*} \longrightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{0}_{0}\gamma \qquad (۴ــ۹) $$

اغلب هسته‌ها پس از گسیل ذره‌های آلفا و بتا در حالت برانگیخته هستند و با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسند ؛ بنابراین، گسیل پرتو گاما اغلب با گسیل آلفا و بتا همراه است. پرتو گاما همان ویژگی‌های پرتو X را دارد ولی از آن پر انرژی‌تر است و می‌تواند در ماده بیش‌تر نفوذ کند.

در تمام فرایندهای واپاشی اصول پایستگی زیر برقرار است :

۱ــ مجموع بارالکتریکی در دو طرف رابطه‌های (۴ــ۷ تا ۱۰) یکسان است.

۲ــ مجموع عددهای جرمی در دو طرف رابطه‌های بالا یکسان است.

مثال ۴ــ۳

در واپاشی هسته‌ی اورانیم ــ ۲۳۸ $\left[{}^{238}_{92}U\right]$ یک ذره‌ی آلفا گسیل می‌شود. معادله‌ی این واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که براثر این واپاشی چه عنصری تولید می‌شود.

پاسخ

معادله‌ی واپاشی به صورت زیر است :

$$ {}^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{4}_{2}He $$

با استفاده از پایستگی عدد جرمی داریم :

$$ 238 = A + 4 $$

$$ A = 234 $$

و با بهره‌گیری از عدد اتمی دو طرف داریم :

$$ 92 = 2 + Z $$

$Z = ۹۰$

با مراجعه به جدول تناوبی معلوم می‌شود که عنصر با $Z = ۹۰$ توریم است ؛ پس داریم :

$$^{۲۳۸}_{۹۲}U \longrightarrow {}^{۲۳۴}_{۹۰}Th + {}^{۴}_{۲}He$$

تمرین ۴ــ۲

فسفر ــ ۳۲ $\left[{}^{۳۲}_{۱۵}P\right]$ با گسیل الکترون وامی‌پاشد. معادله‌ی این واپاشی را بنویسید و تعیین کنید که در آن چه عنصری تولید می‌شود.

تمرین ۴ــ۳

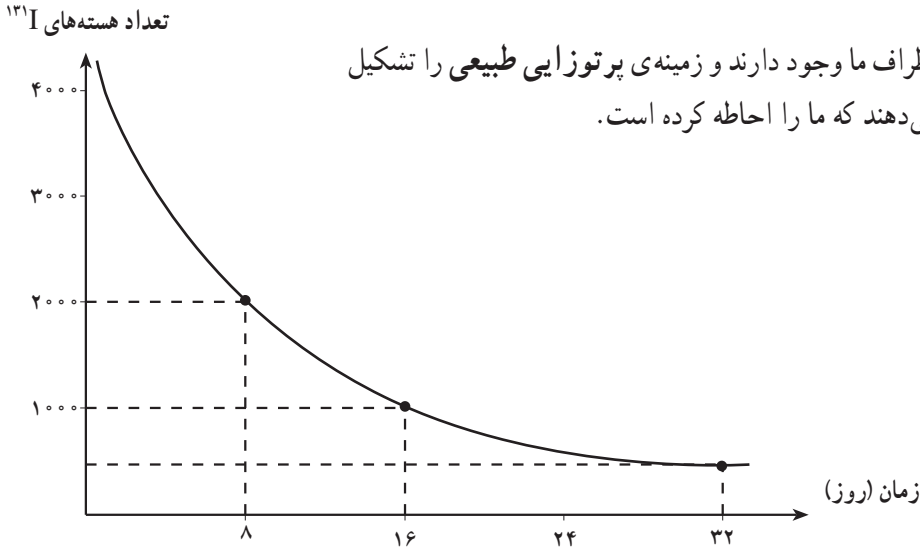
آلومینیم ــ ۲۵ $\left[{}^{۲۵}_{۱۳}A\right]$ با گسیل پوزیترون وامی‌پاشد. معادله‌ی واپاشی را بنویسید و عنصر محصول آن را مشخص کنید.

نیمه عمر ماده‌ی پرتوزا

ایزوتوپ‌های پرتوزا با گذشت زمان واپاشیده می‌شوند. احتمال واپاشی یک هسته پرتوزا در یک ثانیه با **ثابت واپاشی** λ مشخص می‌شود. λ فقط تابع نوع هسته‌ای است که واپاشیده می‌شود و عامل‌های خارجی مانند دما، فشار، یا میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تأثیری در آن ندارند.

اگر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های موجود در یک نمونه را برحسب زمان رسم کنیم نمودار شکل ۴ــ۵ به دست می‌آید. معمولاً سرعت واپاشی یک ایزوتوپ را با **نیمه عمر** مشخص می‌کنند. نیمه عمر زمانی است که طول می‌کشد تا تعداد هسته‌های پرتوزای موجود در یک نمونه به نصف برسد. اغلب ایزوتوپ‌های پرتوزا دارای نیمه عمرهایی در حدود چند روز تا چند سال هستند که بسیار کوتاه‌تر از سن زمین ($۴/۵\times۱۰^{۹}$ سال) است. بنابراین بیش‌تر این ایزوتوپ‌ها به عنصر پایدار واپاشیده‌اند. اما، برخی از آن‌ها دارای نیمه عمرهای در حدود سن زمین هستند. این عناصر هنوز در

اطراف ما وجود دارند و زمینه‌ی **پرتوزایی طبیعی** را تشکیل می‌دهند که ما را احاطه کرده است.



شکل ۴ــ۵ــ نمودار واپاشی ایزوتوپ ^{131}I

مثال ۴ــ۴

در حادثه‌ی چرنوبیل یکی از ایزوتوپ‌هایی که مشکل آلودگی مواد غذایی را به وجود آورد ^{131}I بود. این ایزوتوپ، فرّار است و همراه با جریان‌های جوّی تا نقطه‌های دوردست حرکت کرد و با نشستن بر روی برگ گیاهان سبب آلودگی گوشت و شیر دام‌هایی که این گیاهان را می‌خوردند، شد. نیمه عمر این ایزوتوپ ۸/۰ روز است؛ پس از گذشت ۴۰ روز از حادثه، چه کسری از هسته‌های ^{131}I باقی مانده بود؟

پاسخ

۴۰ روز برابر ۵ نیمه عمر ^{131}I است. اگر N_0 تعداد هسته‌های اولیه باشد، می‌توان جدول زیر را تنظیم کرد.

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

بنابراین، پس از گذشت ۴۰ روز تعداد هسته‌های پرتوزای موجود و در نتیجه،

فعالیت آن‌ها به $\frac{۱}{۳۲}$ مقدار اولیه می‌رسد. نیمه عمر کوتاه ^{۱۳۱}I باعث شد که خسارت وارد به محصولات کشاورزی چندان شدید نباشد.

برای تعداد نیمه عمرهای عدد صحیح، تعداد هسته‌های فعال باقی مانده را می‌توانیم از رابطه‌ی $\frac{N_۰}{۲^n}$ به دست آوریم که در آن n از رابطه‌ی $n = \frac{t}{T_{\frac{۱}{۲}}}$ به دست می‌آید. t زمان موردنظر برای واپاشی و $T_{\frac{۱}{۲}}$ نیمه عمر ایزوتوپ است.

مطالعه‌ی آزاد

نکته‌های ایمنی

حفاظت در برابر پرتوها: یکی از ویژگی‌های مهّم ذرات و پرتوهایی که از موادّ پرتوزا گسیل می‌شود این است که حواس معمولی ما به آن‌ها حساس نیستند ؛ مثلاً، وقتی دستمان را به آتش نزدیک می‌کنیم سوزش ناشی از آن باعث می‌شود که آن را عقب بکشیم ولی این موضوع در مورد پرتوهای کیهانی و آن‌چه از مواد پرتوزا خارج می‌شود، صادق نیست ؛ بنابراین باید به کمک دستگاه‌هایی آن‌ها را آشکار ساخت و به وجود آن‌ها پی‌برد.

ذره‌های دارای بار الکتریکی مانند ذره‌های آلفا و بتا هنگام عبور از ماده به واسطه‌ی بار الکتریکی خود باعث برانگیختگی و یونش اتم‌های محیط می‌شوند و می‌توان از این موضوع برای آشکارسازی آن‌ها استفاده کرد. البته، این برانگیختگی و یونش تغییرهای شیمیایی را در بدن به‌وجود می‌آورد که باعث آسیب‌رساندن به بافت‌های زنده می‌شود. البته هر چه این ذره‌ها انرژی خود را در مسافت کوتاه‌تری از بافت از دست بدهند، آسیب وارده شدیدتر و ترمیم آن دشوارتر خواهد بود ؛ بدین سبب، آسیب ذره‌های آلفا بسیار شدیدتر از ذره‌های بتا خواهد بود.

پرتوهای بدون باری چون پرتوهای X و γ نیز بر اثر برهم کنش با ماده، ذره‌های باردار ثانویه به وجود می‌آورند و این ذره‌های ثانویه به بافت‌های زنده آسیب می‌رسانند. از این ویژگی پرتوها برای از بین بردن غده‌های سرطانی بهره می‌گیرند ؛ بدین ترتیب که با تمرکز این پرتوها بر روی غده‌ها آن‌ها را نابود می‌سازند. این کار را «پرتودرمانی» می‌نامند. نوترون‌ها نیز گرچه بدون بارند ولی در هنگام ورود به بدن بر اثر برخورد با هیدروژن‌های آب ــ که بخش اعظم بدن را تشکیل می‌دهد ــ انرژی خود را به آن منتقل می‌کنند و

باعث به حرکت درآمدن یک پروتون پرانرژی در بدن می‌شوند که اثر زیان‌بار آن بسیار شدید است ؛ بنابراین، نوترون‌ها مخصوصاً وقتی سریع باشند، بسیار خطرناک‌اند.

آسیب وارد از تابش بر بدن ممکن است، یا بافت زنده را کاملاً از بین ببرد یا بدون از بین بردن آن باعث جهش در ژن‌های آن شود. **یاخته‌هایی که از این یاخته‌های جهش یافته به وجود می‌آیند**، با آن تفاوت خواهند داشت. این جهش‌ها می‌تواند به تولید بافت‌های سرطانی یا نوزادان ناقص‌الخلقه بینجامد. البته در مواردی نیز از این جهش‌ها برای تولید گیاهانی استفاده می‌شود که از گیاهان معمولی مقاوم‌ترند یا ویژگی بهتری دارند.

به این ترتیب، در برخورد با مواد پرتوزا بایستی همواره احتیاط کرد تا پرتوگیری از این مواد به کم‌ترین مقدار ممکن برسد. چشمه‌های پرتوزا باید حفاظ داشته باشند و در هنگام کار باید آن‌ها را به کمک وسیله‌هایی در فاصله‌ی دور از بدن نگه داشت.

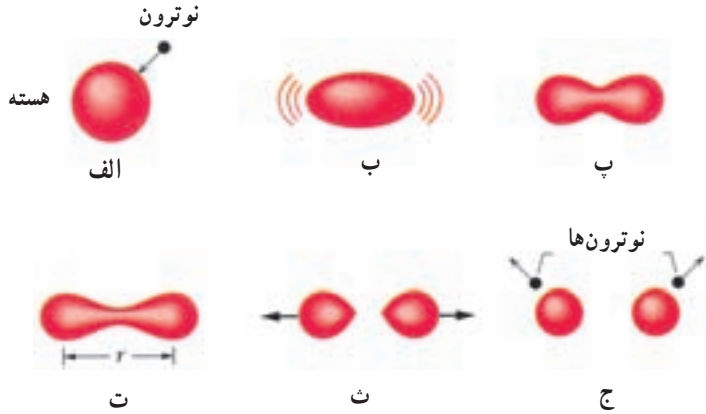
۴ــ۳ــ انرژی هسته‌ای

در اواخر سال ۱۹۳۸ میلادی، دو دانشمند آلمانی، اوتوهان[۱] و فریتس اشتراسمن[۲]، به طور تصادفی کشفی کردند که جهان را تغییر داد. آن‌ها در حین بمباران نمونه‌ای از اورانیم با نوترون به امید به وجود آوردن عناصر جدید، در نهایت تعجب متوجه تولید باریم شدند که جرمش در حدود نصف اورانیم بود. این دو تمایلی به باور نتیجه‌ی آزمایش خود نداشتند. اوتوهان خبر این کشف را برای همکار سابق خود لیزمایتنر[۳] که پناهنده‌ای از آلمان نازی بود و در سوئد کار می‌کرد فرستاد. او در طول تعطیلات کریسمس در این باره با خواهرزاده‌اش، اوتوفریش[۴]، که او هم به دانمارک پناهنده شده بود، بحث کرد. این دو به اتفاق هم توصیفی برای این پدیده یافتند که بدین صورت بود، هسته‌ی اورانیم بر اثر بمباران نوترونی به دو قسمت تقسیم شده است. مایتنر و فریش این فرایند را با توجه به فرایند مشابه در زیست‌شناسی «شکافت» نامیدند.

در تمام هسته‌های شناخته شده، نیروهای جاذبه‌ی هسته‌ای بر دافعه‌ی کولنی غلبه می‌کنند. در هسته‌ی اورانیم غلبه‌ی نیروی هسته‌ای بر نیروی کولنی بسیار شکننده است و با اندک اختلالی چون جذب یک نوترون که سبب تغییر شکل هسته می‌شود، از بین می‌رود. اگر هسته‌ی اورانیم اندکی کشیده شود (شکل ۴ــ۶)، نیروهای الکتریکی می‌توانند آن را کشیده‌تر کنند. اگر این کشیدگی از مرحله‌ی بحرانی

۱ــ Otto Hahn ۲ــ Fritz Strassman ۳ــ Lise Meitner ۴ــ Otto Frisch

بگذرد، نیروهای هسته‌ای تسلیم نیروهای الکتریکی می‌شوند و هسته به دو بخش تقسیم می‌شود. جذب نوترون در هسته‌ی اورانیم انرژی لازم جهت این کشیده شدن را تأمین می‌کند و هسته شکافته می‌شود.

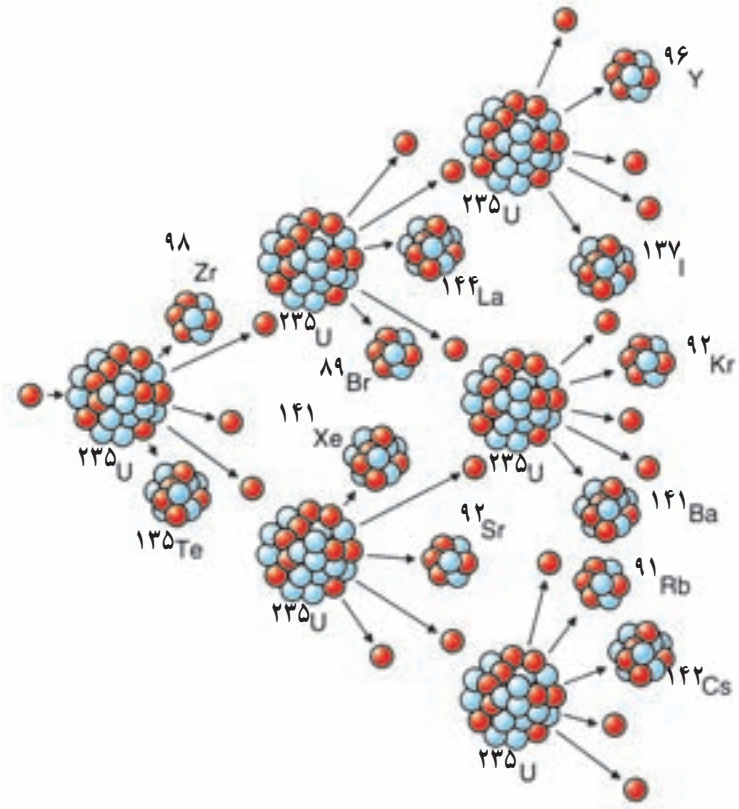


شکل ۴ــ۶ــ تغییر شکل هسته‌ای وقتی به وجود می‌آید که نیروی دافعه‌ی الکتریکی بر نیروی جاذبه‌ی هسته‌ای غلبه کند (شکل ت)، که در این صورت شکافت صورت می‌گیرد.

در فرایند شکافت، ترکیب‌های مختلفی از هسته‌های کوچک‌تر به وجود می‌آیند که یک نمونه‌ی آن را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت :

$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \longrightarrow \ ^{91}_{36}Kr + ^{142}_{56}Ba + 3(^{1}_{0}n)$$

توجه کنید که در این واکنش، یک نوترون، شکافت اورانیم را آغاز می‌کند و براثر شکافت، سه نوترون به وجود می‌آید. چون نوترون‌ها بارالکتریکی ندارند، هسته آن‌ها را دفع نمی‌کند و به راحتی و بدون برخورد با مانع در آن نفوذ می‌کند و در نتیجه، باعث شکافت در سه هسته‌ی اورانیم دیگر شده و نه نوترون آزاد می‌کند. اگر این نوترون‌ها نیز موفق به شکافت اتم‌های اورانیم شوند، بیست و هفت نوترون آزاد می‌شود و ... . این رشته را «واکنش زنجیره‌ای» می‌نامند (شکل۴ــ۷). در هر واکنش شکافت ۲۰۰/۰۰۰/۰۰۰ الکترون ولت (۲۰۰MeV) انرژی آزاد می‌شود (برای مقایسه، در هر انفجار مولکول TNT فقط ۳۰ الکترون ولت انرژی آزاد می‌شود). مجموع جرم پاره‌های شکافت و نوترون‌های تولید شده در واکنش از جرم اورانیم اولیه اندکی کم‌تر است. این اختلاف جرم مختصر طبق رابطه‌ی، $E = mc^2$ اینشتین به انرژی تبدیل می‌شود. بد نیست بدانید که بیش‌تر این انرژی به صورت انرژی جنبشی محصولات شکافت در می‌آید که همراه نوترون‌ها از محل واکنش خارج می‌شوند. بخش اندکی از این انرژی نیز به صورت پرتوهای مختلف درمی‌آید. شاید این پرسش مطرح شود که چرا واکنش زنجیره‌ای هم‌اکنون به طور طبیعی در معدن‌های اورانیم رخ نمی‌دهد؟



شکل ۴ــ۷ــ واکنش زنجیره‌ای

پاسخ آن است که شکافت معمولاً فقط در ایزوتوپ کمیاب U^{235} که فقط ۰/۷۲ درصد اورانیم طبیعی را تشکیل می‌دهد، رخ می‌دهد. ایزوتوپ فراوان‌تر U^{238} نوترون‌ها را جذب می‌کند ولی معمولاً شکافته نمی‌شود و در نتیجه، واکنش زنجیره‌ای را ناممکن می‌سازد.

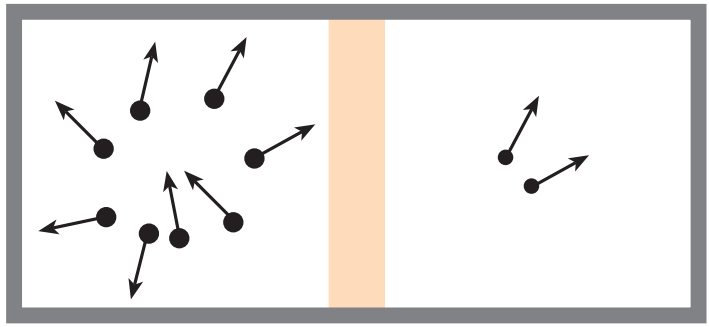
اگر واکنش زنجیره‌ای در قطعه‌ای از اورانیم به اندازه‌ی کافی بزرگ رخ دهد، به احتمال زیاد انفجاری به وقوع می‌پیوندد اما ؛ واکنش زنجیره‌ای در قطعه‌ای کوچک از اورانیم، انفجاری را به وجود نمی‌آورد ؛ زیرا نوترون‌های تولید شده در فرایند شکافت در اورانیم، پیش از برخورد با هسته‌ی اورانیم باید مسافتی را طی کنند. اگر اندازه‌ی قطعه‌ی اورانیمی که در آن شکافت صورت می‌گیرد کوچک باشد، نوترون‌ها پیش از برخورد با هسته‌ی اورانیم دیگر، از قطعه فرار می‌کند.

جرم بحرانی: جرمی است که برای آن هر شکافت به طور میانگین شکافت دیگری را به وجود می‌آورد. جرم **زیر بحرانی**، جرمی است که در آن واکنش زنجیره‌ای ادامه نمی‌یابد. جرم **فوق بحرانی**،

جرمی است که در آن واکنش زنجیره‌ای به صورت انفجاری رشد می‌کند.

غنی‌سازی اورانیم: واکنش زنجیره‌ای معمولاً در اورانیم **طبیعی خالص** به وقوع نمی‌پیوندد؛ زیرا بخش اعظم آن (۹۹/۳ درصد) از ^{238}U تشکیل شده است. برای انفجارهای هسته‌ای به ^{235}U خالص نیاز داریم و برای استفاده در نیروگاه‌های هسته‌ای نیز باید فراوانی ^{235}U را به صورت مصنوعی زیاد کرد که این کار را «**غنی‌سازی**» می‌نامند. جداساختن ایزوتوپ کمیاب ^{235}U از ایزوتوپ فراوان ^{238}U بسیار دشوار است؛ زیرا هر دو ایزوتوپ به لحاظ شیمیایی یکسان‌اند و نمی‌توان از واکنش‌های شیمیایی استفاده کرد. جداسازی این دو ایزوتوپ براساس اختلاف جرم آن‌ها صورت می‌گیرد.

یکی از روش‌های انجام این عمل استفاده از فرایند پخش است. در این روش، اورانیم در ترکیب با فلوئور به صورت گاز هگزافلوراید اورانیم (UF_6) در می‌آید. چون ایزوتوپ سبک‌تر ^{235}U در دمای مساوی، سرعت متوسط آن کمی بیش از ایزوتوپ ^{238}U است و با آهنگ بیش‌تری از غشایی نازک می‌گذرد. پخش از هزاران مرحله، سرانجام باعث تولید نمونه‌ی اورانیم با غنای مناسب می‌شود. این مقدار برای نیروگاه‌های تولید برق در حدود ۳ درصد است.



شکل ۴ــ۸ــ مولکول‌های سبک‌تر در دمای یک‌سان سریع‌تر از مولکول‌های سنگین‌تر حرکت می‌کنند و در نتیجه، با سرعت بیش‌تری از غشای نازک می‌گذرند.

امروزه جداسازی اورانیم با استفاده از روش سانتریفوژ گازی راحت‌تر صورت می‌گیرد. گاز هگزافلوراید اورانیم در یک استوانه با سرعت‌های فوق‌العاده زیاد از مرتبه‌ی ۱۵۰۰ کیلومتر در ساعت چرخانده می‌شود. مولکول‌های گاز حاوی ^{238}U سنگین، مانند شیر در جداکننده‌های لبنیات، به خارج رانده می‌شوند و مولکول‌های گاز حاوی ^{235}U سبک‌تر، از مرکز استخراج می‌شوند. مشکلات مهندسی این روش در سال‌های اخیر برطرف شده است.

راکتورهای شکافت هسته‌ای : دیدیم که واکنش شکافت زنجیره‌ای معمولاً در اورانیم طبیعی *خالص* صورت نمی‌گیرد، زیرا بخش اعظم آن $U^{۲۳۸}$ است، و نوترون‌های آزاد شده در شکافت $U^{۲۳۵}$ که نوترون‌های سریع هستند را اتم‌های $U^{۲۳۸}$ جذب می‌کنند بدون این که باعث شکافت شوند. این واقعیت تجربی مهم که نوترون‌های کُند را $U^{۲۳۵}$ با احتمال بیش‌تر از $U^{۲۳۸}$ جذب می‌کند اهمیت بسیار دارد. اگر نوترون‌ها را بتوان کُند ساخت، احتمال جذب نوترون ناشی از شکافت در یک اتم $U^{۲۳۵}$ دیگر، حتی در حضور $U^{۲۳۸}$، افزایش می‌یابد. این افزایش احتمال می‌تواند برای به‌وجود آوردن واکنش زنجیره‌ای کافی باشد.

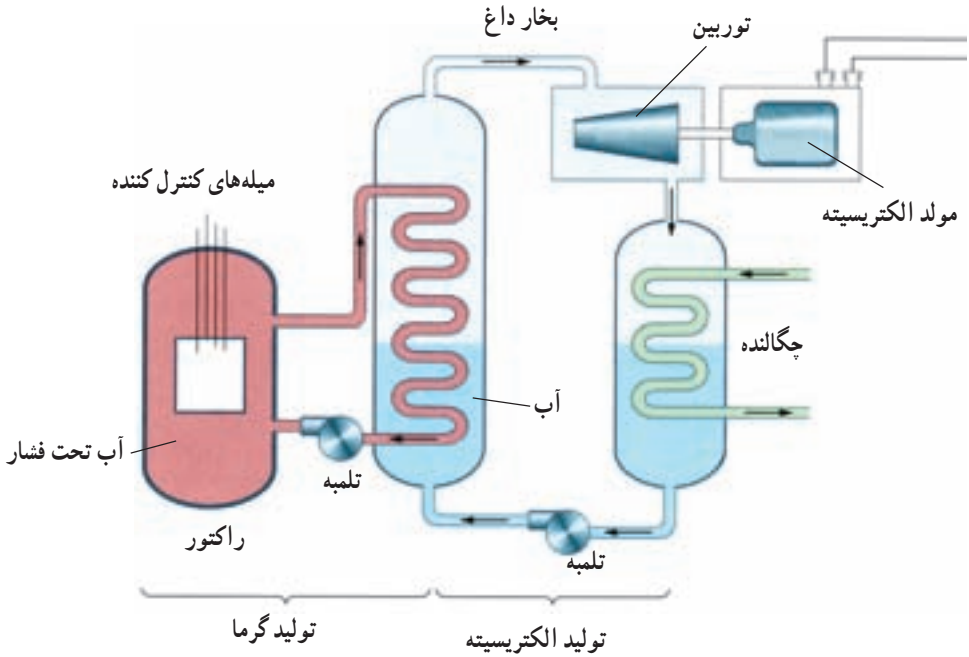
در کمتر از یک سال پس از کشف شکافت هسته‌ای، دانشمندان متوجه شدند که اگر اورانیم به قطعه‌های کوچک‌تر تقسیم شود و در بین این قطعه‌ها ماده‌ای قرار گیرد که نوترون‌های حاصل از شکافت* را کند و احتمال جذب آن‌ها در اورانیم را زیاد سازد، می‌توان با استفاده از اورانیم طبیعی واکنش زنجیره‌ای به‌وجود آورد.

این روش را اولین بار انریکوفرمی در سال **۱۹۴۲** میلادی (**۱۳۲۱** هـ.ش) در دانشگاه شیکاگو انجام داد. در اولین واکنش زنجیره‌ای کنترل شده، از گرافیت برای کُند کردن نوترون‌ها استفاده شده بود. دلیل استفاده از گرافیت این بود که نوترون در برخورد با آن، بخش قابل ملاحظه‌ای از انرژی خود را از دست می‌داد. اگر نوترون از هسته‌ای سنگین پس زده شود، سرعت و انرژی آن تغییر چندانی نخواهد کرد اما در برگشت از هسته‌ی سبک‌کربن، سرعتش به طور قابل ملاحظه‌ای کم می‌شود. می‌گویند گرافیت «کُند کننده‌ی» نوترون است. کل این دستگاه را «راکتور» می‌نامند.

راکتورهای هسته‌ای کنونی علاوه بر سوخت هسته‌ای دارای کُند کننده، میله‌های کنترل، و شاره‌ای (معمولاً آب) برای خارج ساختن گرما از راکتورند. سوخت هسته‌ای در درجه‌ی اوّل $U^{۲۳۸}$ به علاوه ۳ درصد $U^{۲۳۵}$ است. چون $U^{۲۳۵}$ با $U^{۲۳۸}$ بسیار رقیق شده است، امکان انفجار هسته‌ای مانند بمب در آن وجود ندارد. با واردکردن میله‌های کنترل به داخل راکتور، آهنگ واکنش یعنی تعداد نوترون‌های موجود برای به‌وجود آوردن شکافت، تنظیم می‌شود. میله‌های کنترل معمولاً از مواد جذب‌کننده نوترون، مانند کادمیم یا بور، ساخته می‌شوند. آبی که سوخت هسته‌ای را احاطه کرده است معمولاً تحت فشار زیاد قرار می‌دهند تا بدون جوشیدن به دماهای زیاد برسد. آبی که بر اثر واکنش شکافت هسته‌ای گرم شده است، به دستگاهی با فشار آب کم‌تر منتقل می‌شود که با تولید بخار، توربین و ژنراتور الکتریسیته را به کار می‌اندازد ؛ از این‌رو، از دو دستگاه آب، به طور جداگانه، استفاده

---

* ــ انرژی جنبشی متوسط این نوترون‌ها ۲MeV است.



شکل ۴ــ۹ــ نمودار یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

می‌شود تا مواد پرتوزا وارد توربین نشوند.

تولید پلوتونیم :وقتی ^{238}U نوترونی را جذب می‌کند، شکافتی صورت نمی‌گیرد. هسته‌ی حاصل از جذب نوترون، ^{239}U ، پرتوزاست. این هسته با نیمه عمر **۲۳** دقیقه، یک ذره‌ی بتا گسیل می‌کند و به اوّلین عنصر فرا اورانیمی به نام نپتونیم (Np ؛ نام اوّلین سیاره‌ای که از طریق قانون گرانش نیوتون کشف شد) تبدیل می‌شود. این ایزوتوپ ^{239}Np نیز پرتوزاست و با نیمه عمر **۲/۳** روز و گسیل ذره‌ی بتا به پلوتونیم تبدیل می‌شود (Pu ؛ نام پلوتون، دومین سیاره‌ای که به کمک قانون گرانش نیوتون کشف شد).

نیمه عمر ایزوتوپ ^{239}Pu برابر **۲۴۰۰۰** سال است. ^{239}Pu نیز مانند ^{235}U با جذب نوترون شکافته می‌شود. جالب توجه آن که ^{239}Pu از ^{235}U شکافت پذیرتر است.

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{239}_{92}U^{*} \longrightarrow e^{-} + {}^{239}_{93}Np \longrightarrow e^{-} + {}^{239}_{94}Pu \cdots$$

^{238}U با جذب نوترون به ^{239}U تبدیل می‌شود. این ایزوتوپ با گسیل ذره‌ی بتا به ^{239}Np تبدیل می‌شود که آن هم با گسیل یک ذره‌ی بتای دیگر به ^{239}Pu تبدیل می‌شود.

استفاده از شکافت در تولید انرژی :انرژی حاصل از شکافت هسته‌ای با انفجار بمب‌های

هیروشیما و ناکازاکی به جهانیان معرفی شد. این تصویر هولناک هنوز از تفکری که در مورد انرژی هسته‌ای وجود دارد، رخت برنبسته است. فاجعه‌ی انفجار چرنوبیل در سال ۱۹۸۶ میلادی (۱۳۶۵هـ.ش) نیز به این وحشت از انرژی هسته‌ای اضافه کرد. با وجود این، در بسیاری از کشورها بخش عمده‌ای از انرژی مورد نیاز از این طریق تأمین می‌شود. راکتور هسته‌ای درست مانند کوره‌ای معمولی، آب را به جوش می‌آورد و بخار تولید می‌کند. مهم‌ترین تفاوت آن، مقدار سوخت دخیل در این کار است. یک کیلوگرم سوخت اورانیم، قطعه‌ای کوچک‌تر از یک توپ تنیس، بیش از ۳۰ کامیون بزرگ پر از زغال سنگ انرژی تولید می‌کند.

شکل ۴ــ۱۰ــ نمونه‌ای از یک نیروگاه شکافت هسته‌ای

نقطه ضعف اصلی استفاده از شکافت هسته‌ای تولید پسماندهای پرتوزاست. همان طور که قبلاً گفتیم، برای پایدار ماندن هسته باید با زیاد شدن عدد اتمی، نسبت نوترون به پروتون افزایش یابد. این نسبت برای هسته‌های سبک برابر ۱، در هسته‌های متوسط ۱/۲ و در هسته‌ی سنگینی چون سرب ۱/۵ است. وقتی هسته‌ی سنگینی چون اورانیم دو پاره می‌شود، این پاره‌ها دیگر برای پایداری به نسبت نوترون به پروتونی مانند اورانیم نیاز ندارند و باید این نسبت را کم کنند ؛ بنابراین، تعدادی از نوترون‌ها مستقیماً در فرایند شکافت آزاد می‌شوند و بقیه در فرایند واپاشی پرتوزای پاره‌های شکافت به تدریج به پروتون تبدیل می‌شوند ؛ بنابراین، پاره‌های شکافت پرتوزا هستند. اما بیش‌تر آن‌ها دارای نیمه عمر کوتاه‌اند و به سرعت از بین می‌روند. با این همه، تعدادی از آن‌ها دارای نیمه عمرهای هزاران ساله‌اند. دور ریختن همراه با ایمنی این پسماندها و موادی که در جریان تولید سوخت‌های هسته‌ای به وجود می‌آیند به روش‌ها و استفاده از محفظه‌های خاص نیاز دارد. گرچه بیش از نیم قرن از به کارگیری انرژی

هسته‌ای می‌گذرد، اما فناوری دورریزی پسماندهای هسته‌ای هنوز در مرحله‌های اولیه است.

مزیت‌های توان هسته‌ای عبارتند از (۱) توانایی تولید الکتریسیته فراوان با استفاده از این انرژی ؛ (۲) حفظ بیلیون‌ها تن زغال سنگ، نفت و گاز طبیعی که عملاً هر سال به گرما و دود تبدیل می‌شود و در دراز مدت می‌توان از آن‌ها به عنوان منابع غنی از مولکول‌های آلی گرانبها استفاده کرد ؛ و (۳) حذف میلیون‌ها تن دی‌اکسید گوگرد و سایر مواد سمی، و همین طور گاز گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن، که هر سال با سوزاندن سوخت‌های فسیلی وارد جو می‌شود و با به‌وجود آوردن مسئله‌ی گرم‌شدن گلخانه‌ای تهدیدی عظیم برای محیط زیست انسان است.

مطالعه‌ی آزاد

همجوشی هسته‌ای

در واکنش شکافت هسته‌ای، دیدیم که هسته‌ی سنگین با جذب یک نوترون به دو هسته‌ی سبک‌تر شکافته می‌شود و مقداری انرژی آزاد می‌شود.

یک نوع واکنش هسته‌ای دیگر نیز وجود دارد که همجوشی هسته‌ای نام دارد و در آن دو هسته‌ی سبک با یک‌دیگر ترکیب می‌شوند و هسته‌ی سنگین‌تری تولید می‌کنند. در این واکنش نیز جرم هسته‌ی تولید شده کم‌تر از جرم هسته‌های اولیه است و در نتیجه مقداری انرژی آزاد می‌شود.

$$^{1}_{1}H + {}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{2}_{1}H + e^{+} + \nu$$

$$^{2}_{1}H + {}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{2}He + \gamma$$

$$^{3}_{2}He + {}^{3}_{2}He \longrightarrow {}^{4}_{2}He + 2\,{}^{1}_{1}H$$

کل فرآیند را می‌توان به‌صورت زیر نوشت :

$$4\,{}^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + 2e^{+} + \text{مقداری انرژی}$$

در این واکنش چهار هسته‌ی اتم هیدروژن (یعنی چهار پروتون) با هم ترکیب می‌شوند و یک هسته‌ی هلیم ۴ (یعنی یک ذره‌ی آلفا) به اضافه‌ی یک پوزیترون ($+e$) تولید می‌کنند و مقداری انرژی نیز آزاد می‌نمایند. پوزیترون پاد ذره‌ی الکترون است که جرم آن با جرم الکترون برابر و بار آن مثبت است.

واکنش همجوشی هسته‌ای با یک مشکل بزرگ همراه است، و آن این که ذره‌هایی که در این واکنش باید با هم ترکیب شوند بار مثبت دارند و برای آن که با هم ترکیب شوند (به‌هم جوش بخورند) باید بر نیروی رانشی الکتریکی غلبه کنند. برای این کار در ابتدای فرایند باید مقدار زیادی انرژی صرف کرد.

برای مثال برای این که دو پروتون را به اندازه‌ی کافی به هم نزدیک کنیم باید آن‌ها را با انرژی حدود ۰/۱MeV به طرف هم برانیم. این کار را می‌توان به کمک دستگاه‌هایی به نام شتاب دهنده انجام داد. اما انرژی لازم برای راه‌اندازی چنین دستگاهی خیلی بیش‌تر از انرژی حاصل از واکنش همجوشی است.

راه دیگری که برای تأمین این انرژی وجود دارد گرما دادن به هسته‌ها تا دمای $۱۰^{۷}\ ^{\circ}C$ است. در چنین دمایی انرژی جنبشی هسته‌ها برای غلبه بر رانش الکتریکی بین آن‌ها کافی خواهد بود.

چنین دمای بالایی در ستارگان و خورشید وجود دارد. مثلاً دمای درونی خورشید در حدود $۲\times۱۰^{۷}\ ^{\circ}C$ است ، در نتیجه واکنش همجوشی هسته‌ای در خورشید و ستارگان به‌طور عادی صورت می‌گیرد.

بخش عمده‌ی انرژی خورشیدی از طریق واکنش همجوشی تأمین می‌شود. این انرژی به‌اندازه‌ای است که هم خورشید را داغ نگه می‌دارد و هم انرژی لازم را برای منظومه‌ی خورشیدی و از آن جمله سیاره‌ی زمین فراهم می‌کند.

تمرین‌های فصل چهارم

۱ــ استرانسیوم ۹۰ ($^{۹۰}_{۳۸}Sr$) در اثر انفجارهای هسته‌ای تولید می‌شود و نیم‌عمر آن ۲۸ سال است. این ایزوتوپ را گیاهان جذب می‌کنند و از طریق غذا وارد بدن انسان می‌شود. تعداد پروتون‌ها، نوترون‌ها و الکترون‌های موجود در هر اتم با هسته‌ی $^{۹۰}_{۳۸}Sr$ چقدر است؟

۲ــ آیا ایزوتوپ $^{۶۱}_{۲۵}X$ را می‌توان با روش شیمیایی از ایزوتوپ $^{۵۹}_{۲۵}Y$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ $^{۶۱}_{۲۶}Z$ چطور؟

۳ــ هنگامی که از ایزوتوپی یک ذره‌ی آلفا گسیل می‌شود، چه تغییری در هسته رخ می‌دهد؟ هنگام گسیل یک ذره‌ی بتا چطور؟ هنگام گسیل پرتو گاما چطور؟

۴ــ گاهی گفته می‌شود که «جرم را نمی‌توان تولید و نابود کرد» این گفته را تحلیل کنید.

۵ــ گاهی گفته می‌شود که تمام منابع انرژی از انرژی هسته‌ای حاصل شده‌اند. آیا سوخت‌هایی مانند زغال‌سنگ و نفت هم از انرژی هسته‌ای به‌دست آمده‌اند؟ توضیح دهید.

۶ــ هریک از اتم‌های زیر چند الکترون، چند پروتون و چند نوترون دارند؟

الف : بریلیوم ۹ ب : کلسیم ۴۰ پ : نقره ۱۰۷

ت : طلا ۱۹۷ ث : سرب ۲۰۸ ج : اورانیوم ۲۳۸

۷ــ واکنش‌های زیر را کامل کنید برای تعیین نماد ایزوتوپ‌ها از جدول تناوبی استفاده کنید.

$$^{231}_{91}\mathrm{Pa} \longrightarrow \alpha +$$

$$^{27}_{\ }\mathrm{Si} \longrightarrow {}^{27}_{\ }\mathrm{Al} +$$

$$^{240}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow \beta +$$

$$^{74}_{\ }\mathrm{As} \longrightarrow {}^{74}_{\ }\mathrm{Se} +$$

$$^{131}\mathrm{I} \longrightarrow {}^{131}\mathrm{Xe} +$$

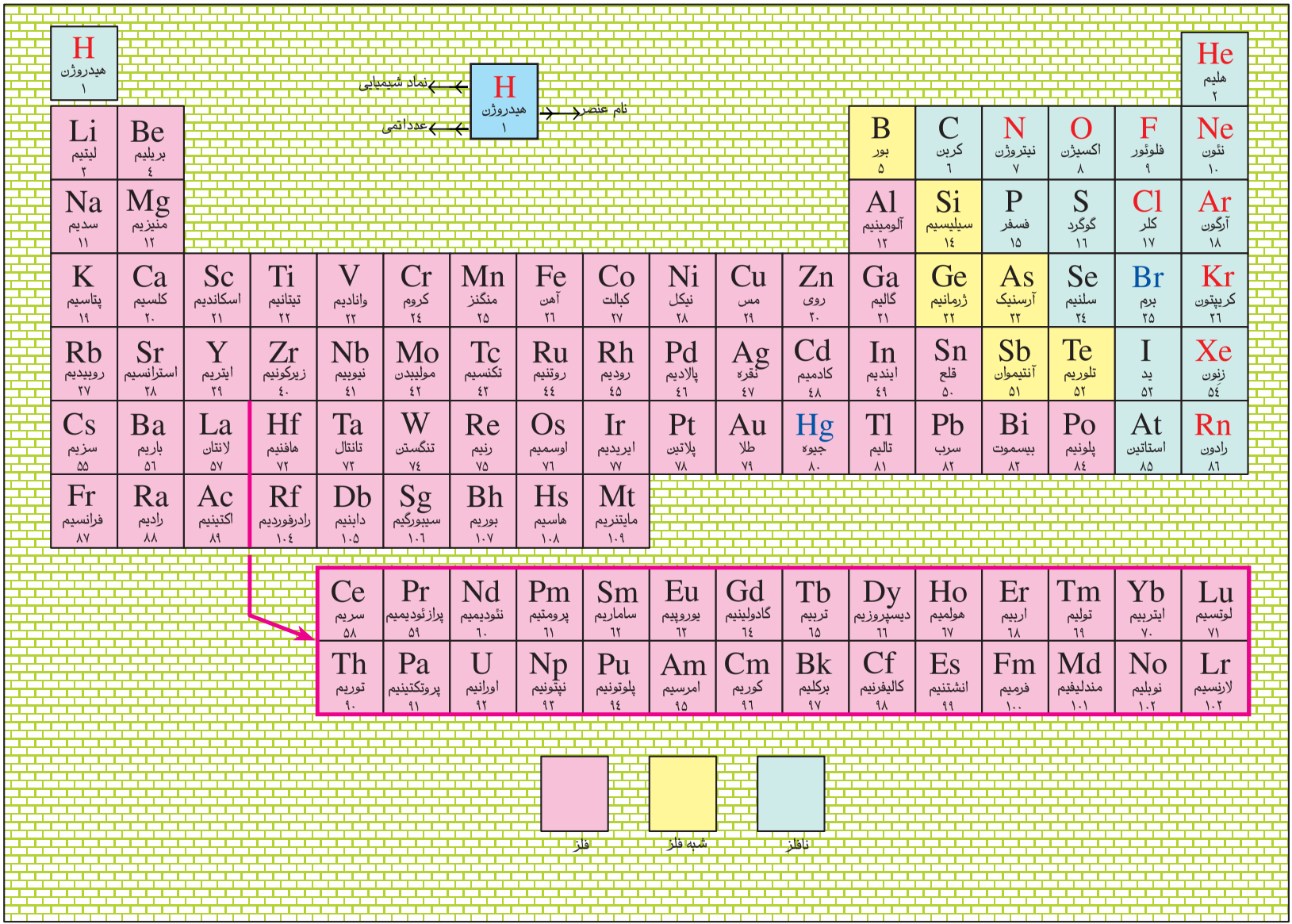
$$^{99}_{43}\mathrm{T} \longrightarrow \gamma +$$

۸ــ نیم‌عمر بیسموت ۲۱۲ در حدود ۶۰ دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از ماده‌ی اولیه باقی‌مانده است؟

۹ــ آلومینیوم تنها یک ایزوتوپ پایدار $^{27}_{13}\mathrm{Al}$ به جرم اتمی ۲۶/۹۸۱۵۴۱u دارد. جرم اتمی دو ایزوتوپ ناپایدار $^{26}_{13}\mathrm{Al}$ و $^{28}_{12}\mathrm{Al}$ به ترتیب برابر ۲۵/۹۸۶۹۸۲u و ۲۷/۹۸۱۹۰۵u است. انرژی بستگی هر یک از سه ایزوتوپ را برحسب MeV حساب کنید.

۱۰ــ انرژی بستگی کل، B، و انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون B/A، را برای $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ و $^{238}_{92}\mathrm{U}$ حساب کنید.(جرم $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ برابر $9/29\times10^{-26}\,\mathrm{kg}$ و جرم $^{238}_{92}\mathrm{U}$ برابر $3/95\times10^{-25}\,\mathrm{kg}$ است.)

۱۱ــ در جریان یک حفاری باستان‌شناسی یک اجاق مخصوص پخت وپز کشف می‌شود. کربن موجود در زغال اجاق، ۱/۵۶ درصد (معادل $\frac{1}{64}$) مقدار عادی کربن ۱۴ است. سن تقریبی زغال چه مقدار است؟ (نیمه عمر کربن ۱۴برابر ۵۷۳۰ سال است).



جدول تناوبی عنصرها