

۴-۵ ساختار هسته

کشف پرتوزایی طبیعی در سال ۱۸۹۶ میلادی توسط فیزیک‌دان فرانسوی، هانری بکرل، آغازی برای پی بردن به وجود هسته اتم بود. با کاوش درون اتم، در مرکز آن، هسته را می‌یابیم که شعاع آن تقریباً $\frac{1}{100000}$ شعاع اتم است (شکل ۴-۲).

هسته 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 ۴-۲). جرم اتم‌ها و همچنین اجزای تشکیل‌دهنده اتم را، افزون بر یکای کیلوگرم با یکای جرم اتمی نیز بیان می‌کنند.

جدول ۴-۲ برخی از ویژگی‌های فیزیکی ذرات تشکیل‌دهنده اتم

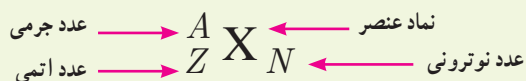
ذره	جرم		بار الکتریکی (C)
	یکای جرم اتمی (u)*	کیلوگرم (kg)	
الکترون	$5/4858 \times 10^{-4}$	$9/109389 \times 10^{-31}$	$-1/6 \times 10^{-19}$
پروتون	$1/007276$	$1/672622 \times 10^{-27}$	$+1/6 \times 10^{-19}$
نوترون	$1/008664$	$1/674929 \times 10^{-27}$	۰

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.

$$A = Z + N \quad (4-7)$$

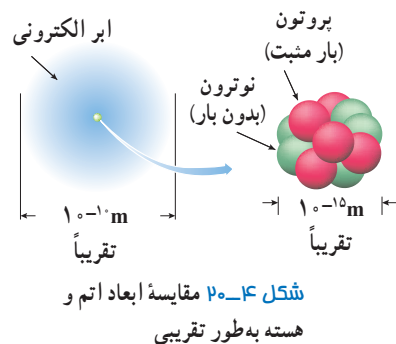
تعداد پروتون‌ها
تعداد نوترون‌ها
تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها
(عدد اتمی)
(عدد نوترونی)
(عدد جرمی)

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



مشخص کردن N در نمادنویسی بالا ضروری نیست؛ زیرا می‌توان آن را از رابطه ۴-۷ به‌دست آورد. همچنین در بسیاری موارد Z را هم می‌توان ذکر نکرد؛ زیرا نماد شیمیایی عنصر، نشان‌دهنده مقدار Z است. برای مثال، هسته اتم آلومینیم را به‌جای ${}_{13}^{27}\text{Al}_{14}$ می‌توان به‌صورت ${}_{13}^{27}\text{Al}$ یا ${}^{27}\text{Al}$ نمایش داد.

۱- در کتاب‌های تخصصی فیزیک هسته‌ای، این نماد را نماد نوکلئید (nuclide) می‌نامند.



* در شیمی ۱ دیدید $\frac{1}{12}$ 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 $12/0000000000$ است.



هانری بکرل (۱۸۵۲-۱۹۰۸ م.)

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



جیمز چادویک (۱۹۲۴-۱۸۹۱ م.)
 فیزیک‌دان انگلیسی، پس از طی دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد در دانشگاه منچستر، تحقیقاتش را زیر نظر رادرفورد ادامه داد. در سال ۱۹۱۴ برای نخستین بار، طیف پیوسته 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 جایزه نوبل فیزیک ۱۹۳۵ میلادی را به این منظور دریافت کرد.

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}C)، و دیگری از آنها از ۶ پروتون و ۷ نوترون (^{13}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. به جز هیدروژن، ایزوتوپ‌های مختلف یک هسته را با نام همان هسته مشخص می‌کنند (جدول ۴-۳).

جدول ۴-۳ ایزوتوپ‌های مختلف چند عنصر و درصد فراوانی آنها در طبیعت

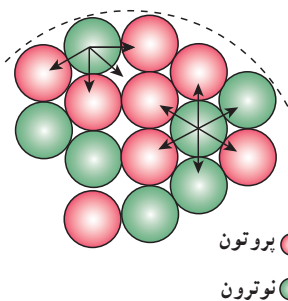
نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت	نام عنصر	نماد	Z	N	درصد فراوانی در طبیعت
هیدروژن ۱	H	۱	۰	۹۹/۹۸۸۵	کربن ۱۳	^{13}C	۶	۷	۱/۰۷
دوتریم (هیدروژن ۲، ^2H)	D	۱	۱	۰/۰۱۱۵	کربن ۱۴	^{14}C	۶	۸	یافت نمی‌شود
تریتیم (هیدروژن ۳، ^3H)	T	۱	۲	بسیار نادر	اورانیم ۲۳۵	^{235}U	۹۲	۱۴۳	۰/۷۱۶
کربن ۱۲	^{12}C	۶	۶	۹۸/۹۳	اورانیم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

تمرین ۴-۴

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 فلور (F) با عدد نوترونی ۱۰

ب) ایزوتوپ قلع (Sn) با عدد نوترونی ۶۶

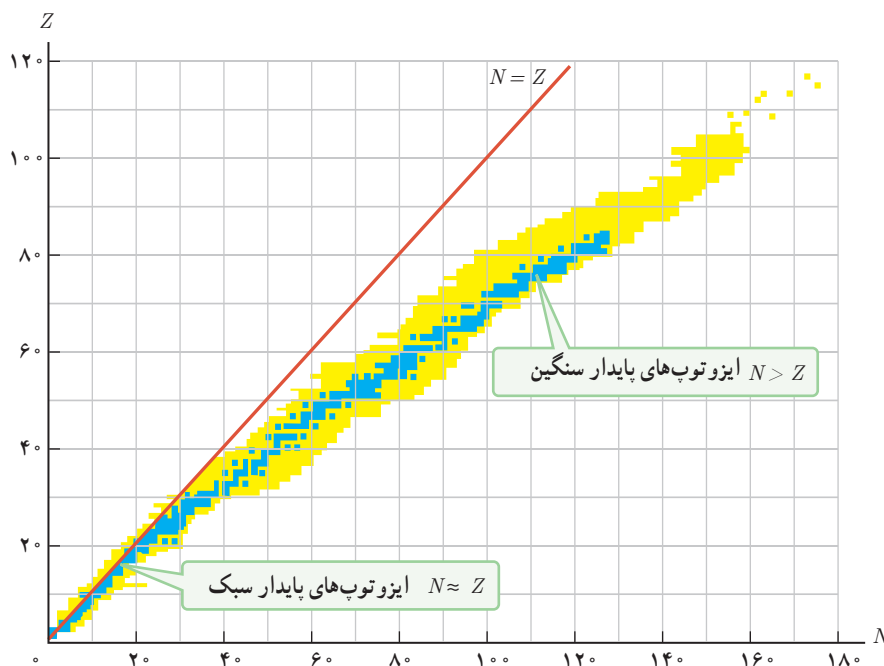


● پروتون
 ● نوترون

شکل ۴-۳۱ 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.

پایداری هسته: همان‌طور که در شکل ۴-۲۰ 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 مرتبه بزرگی چگالی هسته 10^{14}g/cm^3 است که به صورتی باورنکردنی بزرگ است (برای مقایسه توجه کنید که چگالی آب 1g/cm^3 است). موضوع وقتی شگفت‌انگیزتر می‌شود که به اندازه 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، جاذبه 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.

نیروی هسته‌ای، کوتاه‌برد است و تنها در فاصله‌ای کوچک‌تر از ابعاد هسته اثر می‌کند (شکل ۲۱-۴). 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. به همین 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 دافعه الکتروستاتیکی بین پروتون‌ها با نیروی جاذبه بین نوکلئون‌ها، که ناشی از نیروی هسته‌ای است، موازنه شده باشد. ولی به دلیل بلندبرد 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 ۲۲-۴ نموداری از Z برحسب N را برای عنصرهای مختلف نشان می‌دهد. هسته پایدار با بیشترین تعداد پروتون ($Z=83$)، متعلق به بیسموت (${}^{209}\text{Bi}$) است. به جز توریم ($Z=90$) و اورانیم ($Z=92$) که در طبیعت یافت می‌شوند سایر هسته‌های سنگین با عدد اتمی بزرگ‌تر از ۸۳ ناپایدارند. این دو عنصر، تنها عنصرهایی‌اند که واپاشی آنها چنان کند است که از هنگام تشکیل منظومه شمسی در چندین میلیارد سال پیش، فقط مقدار کمی از آنها بر اثر واپاشی، به عنصرهای سبک‌تر تبدیل شده‌اند.



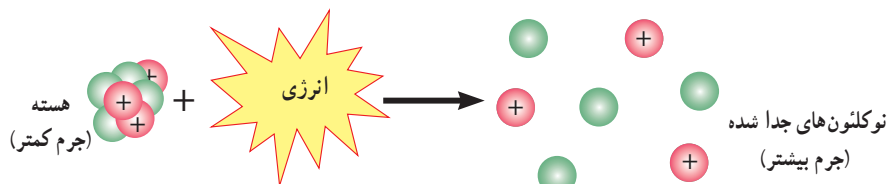
شکل ۲۲-۴ نمودار تغییرات Z برحسب N برای هسته‌های پایدار و پرتوزا. هر نقطه آبی رنگ نشان‌دهنده یک هسته پایدار است. نقاط زرد رنگ هسته‌های پرتوزای شناخته شده را نشان می‌دهند.

پوشش ۲-۴

هر نقطه آبی رنگ در نمودار شکل ۲۲-۴ نشان‌دهنده یک هسته 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 ۴-۲۳ این موضوع را به طور طرح‌وار نشان می‌دهد.

اندازه‌گیری‌های دقیق نشان داده است که جرم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل دهنده‌اش اندکی کمتر است. اگر این اختلاف جرم را که به آن **کاستی جرم هسته** گفته می‌شود، مطابق رابطه معروف اینشتین ($E = mc^2$)، در مربع تندی نور (c^2) ضرب کنیم **انرژی بستگی هسته‌ای** به دست می‌آید^۱. توجه کنید که هرچند اختلاف جرم هسته با مجموع جرم نوکلئون‌های تشکیل دهنده 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 ۴-۲۳ انرژی‌ای معادل انرژی بستگی هسته‌ای باید تأمین شود تا هسته به نوکلئون‌های تشکیل دهنده آن تقسیم شود.

انرژی نوکلئون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم، کواتیده‌اند 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. هسته برانگیخته با گسیل فوتون به تراز پایه برمی‌گردد. انرژی فوتون گسیل شده، با اختلاف انرژی بین تراز برانگیخته و تراز پایه برابر است. هسته برانگیخته را با گذاشتن ستاره روی نماد ${}^A_Z X$ به صورت ${}^A_Z X^*$ مشخص می‌کنند. نکته قابل توجه آن است که اختلاف بین ترازهای انرژی نوکلئون‌ها در هسته از مرتبه keV تا مرتبه MeV است، در حالی که اختلاف بین ترازهای انرژی الکترون‌ها در اتم از مرتبه eV است. از این رو، هسته‌ها در واکنش‌های شیمیایی برانگیخته نمی‌شوند.

۴-۶ پرتوزایی طبیعی و نیمه عمر

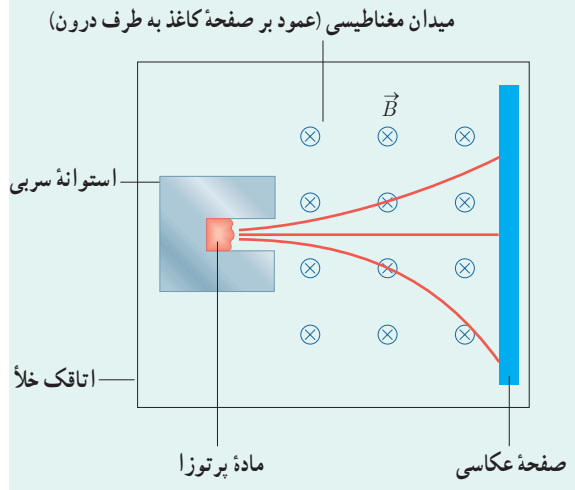
همان‌طور که در مقدمه فصل نیز اشاره کردیم کشف پرتوزایی طبیعی توسط هانری بکرل، آغازی برای پی بردن به وجود هسته اتم بود. وقتی یک هسته ناپایدار یا پرتوزا به طور طبیعی (یا اصطلاحاً خودبه‌خود) واپاشی می‌کند، نوع معینی از ذرات یا فوتون‌های پرتوزایی آزاد می‌شوند. این فرایند واپاشی، **پرتوزایی طبیعی** نامیده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

۱- با رابطه معروف اینشتین ($E = mc^2$)، در شیمی (۱) نیز آشنا شدید.

۲- آموزش محاسبه انرژی بستگی هسته خارج از برنامه درسی این کتاب است و ارزشیابی از آن نباید انجام شود.

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 ورقه نازک سربی با ضخامت ناچیز ($\approx 0.1 \text{ mm}$) متوقف می‌شوند، در حالی که پرتوهای β مسافت خیلی بیشتری را ($\approx 1 \text{ mm}$) در سرب نفوذ می‌کنند. پرتوهای γ بیشترین نفوذ را دارند و می‌توانند از ورقه‌ای سربی به ضخامت قابل ملاحظه‌ای ($\approx 100 \text{ mm}$) 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.

پرسش ۳-۴

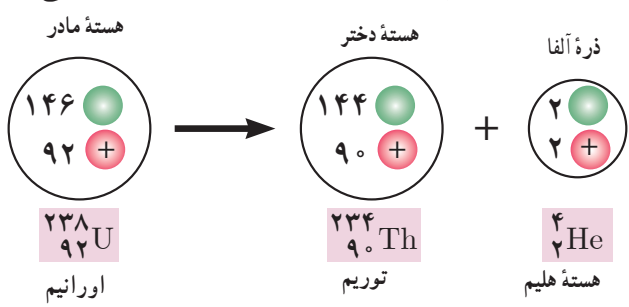


شکل روبه‌رو طرح آزمایش ساده‌ای را نشان می‌دهد که به کمک آن می‌توان سه نوع پرتوزایی طبیعی را مشاهده کرد و به تفاوت بار و جرم پرتوها از یکدیگر پی برد. قطعه‌ای از ماده پرتوزا را در ته حفره باریکی در یک استوانه سربی قرار می‌دهند. استوانه را درون اتاقکی می‌گذارند و هوای درون آن را تخلیه می‌کنند. سپس یک صفحه عکاسی مقابل حفره قرار می‌دهند و میدان مغناطیسی یکنواختی درون اتاقک برقرار می‌کنند. خطوط قرمز رنگ، 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، هسته ${}^A_Z X$ با گسیل ذره آلفا و امی پاشد. شواهد تجربی نشان می‌دهند که پرتوهای α ، ذرات باردار مثبت از جنس هسته اتم هلیم (${}^4_2\text{He}$) هستند و از دو پروتون و دو نوترون تشکیل شده‌اند. واپاشی α با رابطه زیر بیان می‌شود:



در این رابطه X هسته مادر و Y هسته دختر نامیده می‌شود. شکل ۴-۲۴، مثالی از واپاشی آلفا، برای اورانیم ۲۳۸ را نشان می‌دهد که به‌طور طبیعی رخ می‌دهد.



شکل ۴-۲۴ در واپاشی α یک هسته مادر ناپایدار، ذره α گسیل می‌کند و هسته متفاوتی (هسته دختر) به وجود می‌آید.

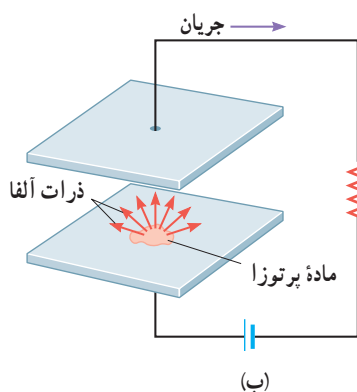


عکسی تاریخی از خانواده‌ای که همه آنها نوبل گرفتند.
 ماری کوری (۱۸۶۷-۱۹۳۴ م.)
 پیر کوری (۱۸۵۴-۱۹۰۶ م.)
 ایرن کوری (۱۸۹۷-۱۹۵۶ م.)
 ماری کوری فیزیک‌دان و شیمی‌دان لهستانی-فرانسوی است که مطالعات پیشگام وی در زمینه پرتوزایی طبیعی رادیم و سایر عناصرها، دو جایزه نوبل برای وی به همراه داشت: جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۰۳ به خاطر کشف پرتوزایی طبیعی (به‌طور مشترک با شوهرش پیر کوری و هانری بکرل) و جایزه نوبل شیمی در سال ۱۹۱۱ به خاطر جدا کردن رادیم خالص. وی پژوهشگر رادیم را در دانشگاه پاریس تأسیس کرد و در آنجا به پژوهش در زمینه کاربردهای پزشکی مواد پرتوزا پرداخت. دخترش ایرن، جایزه نوبل شیمی سال ۱۹۳۵ را به خاطر کشف پرتوزایی مصنوعی، یک سال پس از درگذشت مادرش دریافت کرد.

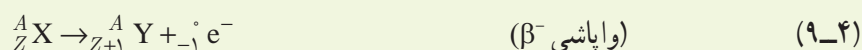
ذره‌های آلفا، سنگین‌اند و بار مثبت دارند. بُرد این ذره‌ها کوتاه است. این ذرات پس از طی مسافت کوتاهی در هوا (۱ تا ۲ سانتی‌متر) و یا با عبور از لایه‌ای نازک از مواد جذب می‌شوند. اگر این ذره‌ها از راه تنفس یا دستگاه گوارش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت‌های بدن می‌شوند. بنابراین، باید مراقب بود که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

فناوری و کاربرد: واپاشی آلفا و آشکارسازهای دود

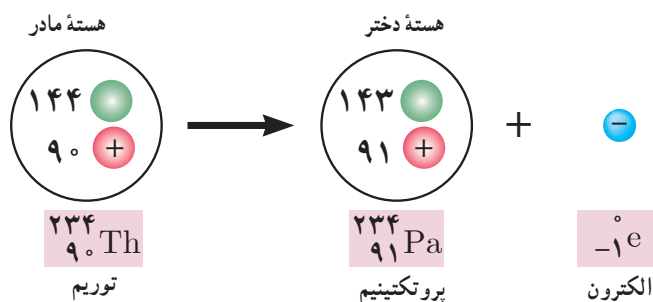
یکی از کاربردهای گسترده واپاشی α در آشکارسازهای دود است (شکل الف). شکل ب، مدار و بخش اصلی یک آشکارساز دود را نشان می‌دهد. دو صفحه کوچک و موازی فلزی در فاصله حدود یک سانتی‌متر از یکدیگر قرار داده می‌شوند. مقدار اندکی ماده پرتوزا را که ذرات α گسیل می‌کند در وسط یکی از صفحه‌ها می‌گذارند. ذرات α با مولکول‌های هوای بین دو صفحه برخورد می‌کنند، مولکول‌های هوا یونیده می‌شوند و یون‌های مثبت و منفی به وجود می‌آیند. ولتاژ باتری باعث می‌شود یک صفحه مثبت و صفحه دیگر منفی باشد، به طوری که هر صفحه یون‌های با بار مخالف را جذب می‌کند. در نتیجه در مدار متصل به صفحه‌ها جریانی به وجود 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 به کار می‌اندازد.



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 هسته مادر وجود ندارد و همچنین یکی از الکترون‌های مدار اتم نیست؛ این الکترون وقتی به وجود می‌آید که نوترونی درون هسته، به پروتون و الکترون تبدیل شود. فرایند واپاشی β^- را با رابطه زیر بیان می‌کنند:



شکل ۴-۲۵ مثالی از واپاشی β^- ، برای توریم $^{234}_{90}\text{Th}$ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.



شکل ۴-۲۵ واپاشی β^- وقتی رخ می‌دهد که نوترونی در یک هستهٔ مادر ناپایدار به پروتون و الکترون تبدیل شود. الکترون به صورت ذره β^- گسیل می‌شود.



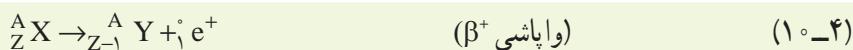
چی ان - شی جونگ وو (۱۹۹۷-۱۹۱۲ م.)

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 به طور تجربی به تأیید رساند. چی ان - شی جونگ اولین زنی بود که در سال ۱۹۷۵ میلادی به سمت رئیس انجمن فیزیک آمریکا 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 ببیمایم.»

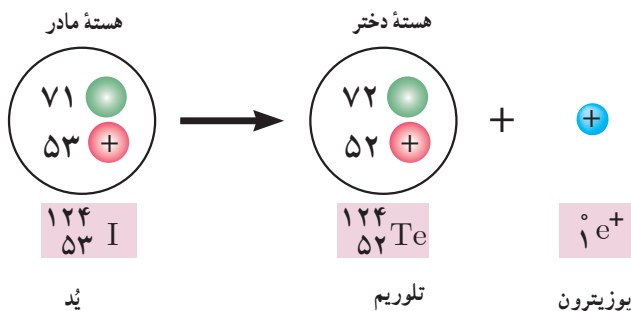
تمرین ۴-۵

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

در نوعی دیگر از فرایند واپاشی بتا، ذرهٔ گسیل شده 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.



شکل ۴-۲۶ مثالی از واپاشی β^+ ، برای ید $^{124}_{53}\text{I}$ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.

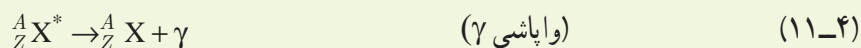


شکل ۴-۲۶ واپاشی β^+ وقتی رخ می‌دهد که نوترونی در یک هستهٔ مادر ناپایدار، به نوترون و پوزیترون تبدیل شود. پوزیترون به صورت ذره β^+ گسیل می‌شود.

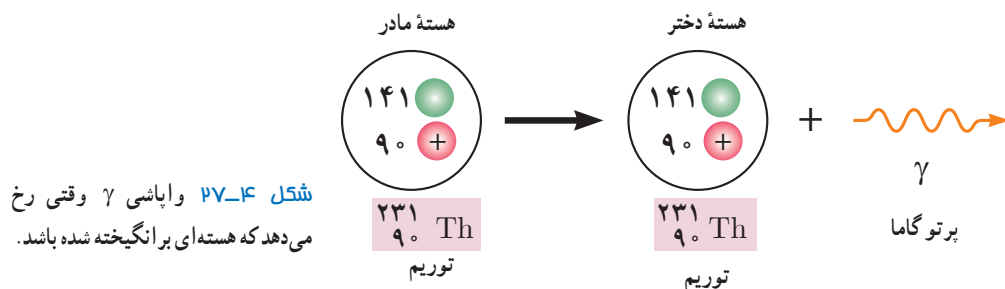
۱- در واپاشی β^+ ، ذره‌ای دیگر به نام نوترینو را نیز باید در نظر بگیریم ($^A_Z X \rightarrow ^A_{Z-1} Y + ^0_{+1} e^+ + \bar{\nu}$). همچنین در واپاشی β^- ، ذره‌ای دیگر به نام پادنوترینو را نیز باید در نظر بگیریم ($^A_Z X \rightarrow ^A_{Z+1} Y + ^0_{-1} e^- + \nu$). در این کتاب برای سادگی از آنها صرف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

ایزوتوپ (^{18}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.

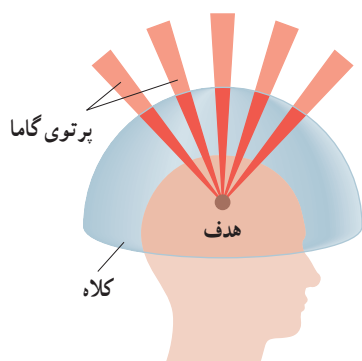
واپاشی γ : اغلب هسته‌ها پس از واپاشی آلفا یا بتا، در حالت برانگیخته قرار می‌گیرند و با گسیل فوتون‌های پر انرژی (پرتو گاما) به حالت پایه می‌رسند. در این فرایند، Z و A تغییر نمی‌کنند؛ بلکه هستهٔ برانگیخته که با علامت * مشخص شده است، با گسیل پرتو گاما به حالت پایه می‌رسد. واپاشی γ با رابطهٔ زیر بیان می‌شود.



شکل ۴-۲۷ مثالی از واپاشی γ ، برای توریم ۲۳۱ را نشان می‌دهد که به طور طبیعی رخ می‌دهد.



جراحی با پرتوهای گاما



(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 سوراخ‌ها، روی هدف تعیین‌شده در مغز، متمرکز می‌شوند.

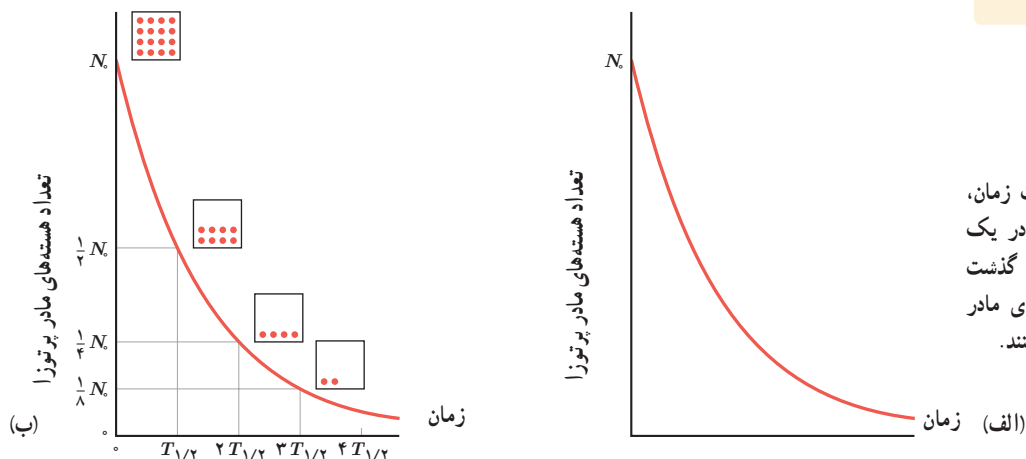
جراحی با پرتوهای گاما، روش پزشکی نویدبخشی است که در سال‌های اخیر برای درمان مشکلات خاصی در مغز، از جمله تخریب غده‌های خوش‌خیم و سرطانی و نیز رفع نقص‌ها در رگ‌های خونی استفاده می‌شود. در این روش که از هیج چاقویی استفاده نمی‌شود، از باریکه‌های بسیار متمرکز و توانمندی از پرتوهای گاما که متوجه غده و نقص در رگ‌ها می‌شود بهره می‌گیرند. پرتوهای γ توسط چشمهٔ کبالت ^{60}Co 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 سوراخ‌ها، روی هدف مورد نظر درون مغز متمرکز می‌شوند. از این رو 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.

نیمه عمر: ایزوتوپ‌های پرتوزا با گذشت زمان واپاشیده می‌شوند. برای یک نمونه از یک ماده پرتوزا، بر اساس داده‌های تجربی می‌توان بیان کرد که در پایان زمان معینی، چه کسری از ماده پرتوزا و امی باشد. برای مثال در مورد هسته‌های توریم ^{232}Th پس از زمان معینی می‌توان گفت که چه کسری از آنها به رادیم ^{228}Ra تبدیل شده است.



روزالیند یالو (۱۹۱۱-۲۰۱۱ م). فیزیکدان آمریکایی، پس از دریافت دکترای فیزیک هسته‌ای، در زمینه 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 شماره‌ها استفاده می‌شود. اهمیت این روش با اعطای جایزه نوبل پزشکی در سال ۱۹۷۷ به وی بیشتر مشخص شد.

برای بررسی بیشتر این موضوع، یک نمونه پرتوزا را در نظر بگیرید. فرض کنید در لحظه $t=0$ 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 ۴-۲۸ الف به دست می‌آید. 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 $T_{1/2}$ نشان می‌دهیم. بنا به تعریف، نیمه‌عمر، مدت زمانی است که طول می‌کشد تا تعداد هسته‌های مادر موجود در یک نمونه، به نصف برسد (شکل ۴-۲۸ ب). برخی از ایزوتوپ‌ها مانند اورانیم ^{238}U ، دارای نیمه‌عمری در حدود سن زمین (۴/۵ میلیارد سال) هستند. این عناصر منشأ پرتوزایی طبیعی در محیط پیرامون ما هستند.



شکل ۴-۲۸ 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 ۴-۵

در حادثه انفجار نیروگاه هسته‌ای چرنوبیل، یُد ^{131}I (^{131}I)، یکی از ایزوتوپ‌هایی بود که وارد محیط زیست شد. این ایزوتوپ، فزار است و همراه با جریان‌های جوی، 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 حادثه چرنوبیل، چه کسری از هسته‌های مادر اولیه در محیط زیست باقی مانده بود؟

پاسخ: نیمه‌عمر ایزوتوپ یُد ^{131}I برابر ۸ روز است و ۴۰ روز را معادل ۵ نیمه‌عمر ^{131}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 سپری شده	۰	۱	۲	۳	۴	۵
هسته‌های مادر باقی مانده	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 حادثه چرنوبیل، تنها $\frac{1}{32}$ از هسته‌های مادر اولیه در محیط زیست باقی ماندند.

اگر تعداد هسته‌های مادر اولیه در یک نمونه پرتوزا N_0 باشد، پس از گذشت زمان t ، تعداد هسته‌های پرتوزای باقی مانده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad (\text{تعداد هسته‌های پرتوزای باقی مانده}) \quad (۱۲-۴)$$

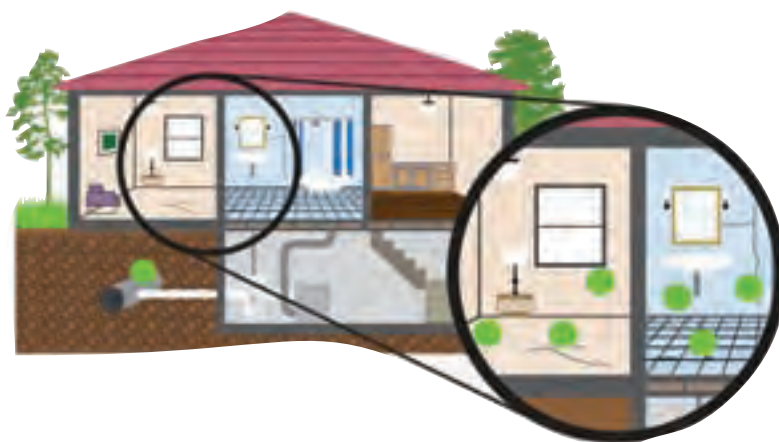
که در آن n از رابطه $\frac{t}{T_{1/2}}$ به دست می‌آید^۱.

تمرین ۴-۷

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؟

گاز رادون پرتوزا در خانه‌ها

رادون (${}^{222}_{86}\text{Rn}$)، گازی پرتوزاست که به طور طبیعی به وجود می‌آید و محصول واپاشی رادیم (${}^{226}_{88}\text{Ra}$) است. رادون درون خاک به شکل گاز است و می‌تواند از محل‌هایی مانند شکاف‌های روی دیوارها و کف 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 به طور چشمگیری بالا رود، به نوع احداث ساختمان و غلظت رادون در خاک اطراف ساختمان بستگی دارد. گاز رادون با نیمه‌عمر $3/83$ 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.



۱- 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.

۴-۱ اثر فوتوالکتریک و فوتون

۱. یک لامپ حاوی گاز کم فشار سدیم، فوتون هایی با طول موج 589nm گسیل می کند.

الف) بسامد و انرژی فوتون های گسیلی را حساب کنید. انرژی را بر حسب ژول و همچنین الکترون ولت بیان کنید.

ب) فرض کنید توان تابشی مفید لامپ 50W است. در هر دقیقه چند فوتون از این لامپ گسیل می شود؟

۲. توان باریکه نور خروجی یک لیزر گازی هلیم نئون 50mW است. اگر توان ورودی این لیزر 50W باشد، الف) بازده لیزر را حساب کنید.

ب) اگر طول موج باریکه نور خروجی 633nm باشد، شمار فوتون هایی را پیدا کنید که در هر ثانیه از این لیزر گسیل می شود.

۳. یک لامپ رشته ای با توان 100W از فاصله یک کیلومتری دیده می شود. فرض کنید نور لامپ به طور یکنواخت در فضای

اطراف آن منتشر می شود و بازده لامپ 5% درصد است (یعنی 5W تابش مرئی گسیل می کند) و فقط 1% درصد این تابش دارای

طول موجی در حدود 550nm است. در هر ثانیه چه تعداد فوتون با این طول موج وارد مردمک های چشم ناظری می شود که در

این فاصله قرار دارد؟ (قطر مردمک را 2mm در نظر بگیرید).

۴. شدت تابشی خورشید در خارج جو زمین حدود 1360W/m^2 است؛ یعنی در هر ثانیه به سطحی برابر 1m^2 ، مقدار انرژی 1360J می رسد. وقتی این تابش به سطح زمین می رسد مقداری زیادی از

شدت آن، به علت جذب در جو و ابرها از دست می رود. اگر شدت تابشی متوسط خورشید در سطح زمین به ازای هر متر مربع حدود

300W/m^2 باشد، در هر ثانیه چند فوتون به هر متر مربع از سطح زمین می رسد؟ طول موج متوسط فوتون ها را 570nm فرض کنید.

۵. الف) منظور از اثر فوتوالکتریک چیست؟

ب) توضیح دهید نظریه کوانتومی تابش که توسط اینشتین مطرح شد و در آن نور به صورت مجموعه ای از بسته های انرژی در نظر

گرفته شد چگونه به تبیین اثر فوتوالکتریک کمک کرد؟

۶. توضیح دهید برای یک فلز معین، تغییر هر یک از کمیت های زیر چه تأثیری در نتیجه اثر فوتوالکتریک دارد.

الف) افزایش یا کاهش بسامد نور فرودی نسبت به بسامد آستانه
ب) افزایش شدت نور فرودی در بسامدهای کوچک تر از بسامد آستانه

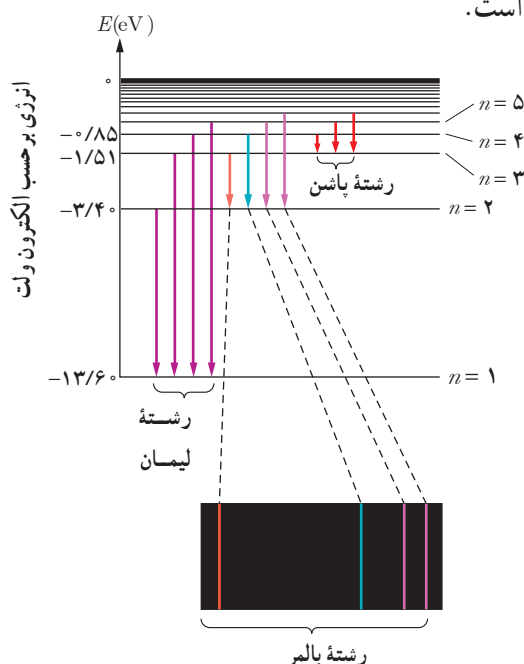
پ) کاهش شدت نور فرودی در بسامدهای بزرگ تر از بسامد آستانه

۴-۲ و ۴-۳ طیف خطی و مدل اتم رادرفورد - بور

۷. الف) طیف گسیلی یک جسم در چه مواردی پیوسته و در چه مواردی گسسته یا خطی است؟ منشأ فیزیکی این تفاوت را توضیح دهید.

ب) توضیح دهید چگونه می توان طیف های گسیلی پیوسته و خطی را ایجاد کرد.

۸. شکل زیر سه رشته طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی را روی نمودار تراز انرژی نشان می دهد که بر اساس مدل اتمی بور رسم شده است.



الف) منظور از $n=1$ و انرژی -13.6eV چیست؟

ب) بر اساس مدل اتمی بور دلیل خطی بودن طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی را توضیح دهید.

پ) اختلاف کوتاه ترین و بلندترین طول موج در هر رشته را، گستره طول موج های آن رشته می نامند. گستره طول موج های رشته لیمان ($n'=1$) را پیدا کنید.

۱۱. با استفاده از رابطه بور برای انرژی الکترون در اتم هیدروژن، الف) اختلاف انرژی $\Delta E(n_U \rightarrow n_L) = E_U - E_L$ را حساب کنید. ب) نشان دهید که:

$$\Delta E(4 \rightarrow 2) = \Delta E(4 \rightarrow 3) + \Delta E(3 \rightarrow 2)$$

$$\Delta E(4 \rightarrow 1) = \Delta E(4 \rightarrow 2) + \Delta E(2 \rightarrow 1)$$

۱۲. الکترون اتم هیدروژنی در تراز $n = 5$ قرار دارد.

الف) با در نظر گرفتن تمام گذارهای ممکن، اگر این اتم به حالت پایه برود، امکان گسیل چند نوع فوتون با انرژی متفاوت وجود دارد؟

ب) فرض کنید فقط گذارهای $\Delta n = 1$ مجاز باشند، در این صورت امکان گسیل چند نوع فوتون با انرژی متفاوت وجود دارد؟

۴-۴ لیزر

۱۳. شکل زیر فرایند ایجاد باریکه لیزر را به طور طرح‌وار در ۴ مرحله نشان می‌دهد.

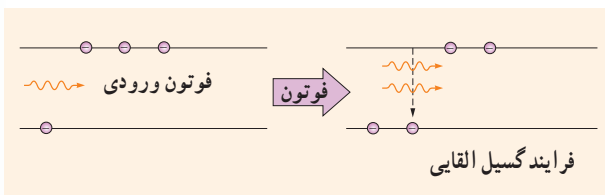
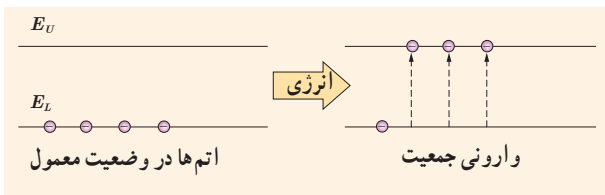
الف) منظور از عبارت «اتم‌ها در وضعیت معمول» چیست؟

ب) نقش انرژی داده‌شده چیست و معمولاً این انرژی چگونه تأمین می‌شود؟

پ) منظور از «وارونی جمعیت» چیست؟

ت) انرژی فوتون ورودی چقدر باید باشد تا فرایند گسیل القایی انجام شود؟

ث) فوتون‌هایی که بر اثر فرایند گسیل القایی و جهش الکترون‌ها به تراز پایین‌تر ایجاد می‌شوند چه ویژگی‌های مشترکی دارند؟



۴. الف) فرایند جذب فوتون توسط اتم را توضیح دهید.

ب) با استفاده از مدل بور، چگونه می‌توانید خط‌های تاریک در طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی را توجیه کنید؟

پ) وقتی که نور فرابنفش به بسیاری از مواد تابیده شود، تابش مرئی از خود گسیل می‌کنند. این پدیده فیزیکی نمونه‌ای از فلوئورسانسی است. آزمایش نشان می‌دهد در پدیده فلوئورسانسی طول‌موج‌های گسیل‌یافته معمولاً برابر همان طول‌موج نور فرودی یا بزرگ‌تر از آن است. این پدیده را چگونه به کمک مدل بور می‌توانید تبیین کنید؟

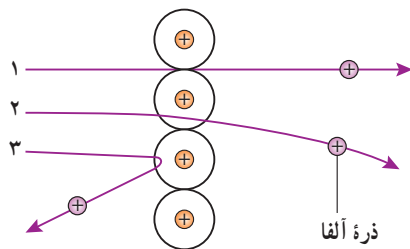
۱۰. مبنای مدل رادرفورد، نتایج آزمایش‌هایی بود که از پراکندگی ذره‌های آلفا توسط یک ورقه نازک طلا به دست آمده بود (شکل الف).

الف) توضیح دهید چرا بیشتر ذره‌های آلفا مانند ذره‌های ۱ و ۲ یا اصلاً منحرف نمی‌شوند یا به مقدار کمی منحرف می‌شوند.

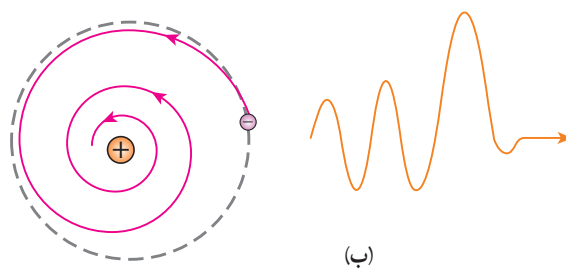
ب) تنها تعداد بسیار کمی از ذره‌ها مانند ذره ۳ منحرف می‌شوند. این امر چه نکته‌ای را درباره ساختار اتم طلا نشان می‌دهد؟

پ) چرا رادرفورد در آزمایش خود از صفحه بسیار نازک طلا استفاده کرده بود؟

ت) شکل ب، به کدام مشکل مدل رادرفورد اشاره دارد؟ در مدل بور چگونه این مشکل رفع شده است؟



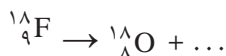
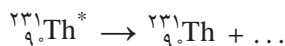
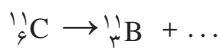
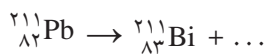
(الف)



(ب)

۴-۶ پرتوزایی طبیعی و نیمه عمر

۱۹. جاهای خالی در فرایندهای واپاشی زیر نشان دهنده یک یا چند ذره α ، β^+ یا β^- است. در هر واکنش، جای خالی را کامل کنید.



۲۰. هسته دختر به دست آمده از هر یک از واپاشی‌های زیر را به صورت

${}^A_Z\text{X}$ مشخص کنید.

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

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

(پ) نیتروژن ${}^{13}_7\text{N}$ واپاشی β^- انجام دهد.

(ت) ${}^{15}_8\text{O}$ واپاشی β^+ انجام دهد.

۲۱. سرب ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ هسته 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 هسته مادر را به صورت ${}^A_Z\text{X}$ مشخص کنید.

۲۲. نپتونیم ${}^{237}_{93}\text{Np}$ ایزوتوپی است که در راکتورهای هسته‌ای

تولید می‌شود. این ایزوتوپ ناپایدار است و واپاشی آن از طریق

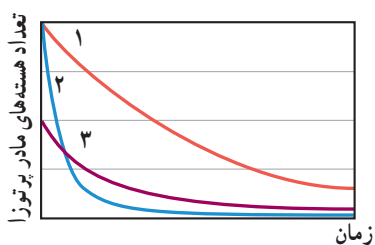
گسیل ذرات α ، β ، α و α صورت می‌گیرد. پس از وقوع تمام

این واپاشی‌ها، عدد اتمی و عدد جرمی هسته نهایی چقدر است؟

۲۳. شکل زیر نمودار تغییرات تعداد هسته‌های مادر پرتوزای سه

نمونه را برحسب زمان نشان می‌دهد. نیمه عمر این سه نمونه را با هم

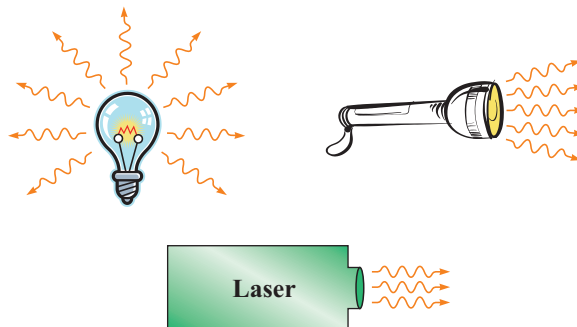
مقایسه کنید.



۱۴. در شکل زیر نحوه گسیل فوتون‌ها از سه چشمه نور شامل لامپ رشته‌ای، چراغ قوه با لامپ رشته‌ای و لیزر با یکدیگر مقایسه شده است.

(الف) با توجه به آنچه در این فصل فراگرفتید تفاوت فوتون‌های گسیل شده از هر چشمه را با یکدیگر بیان کنید.

(ب) چرا توصیه جدی می‌شود که هیچ‌گاه به طور مستقیم به باریکه نور ایجادشده توسط لیزر نگاه نکنید؟



۴-۵ ساختار هسته

۱۵. مرتبه بزرگی تعداد نوترون‌هایی را که می‌توان تنگ هم در

یک توپ تنیس به شعاع $3/2\text{ cm}$ جای داد، تخمین بزنید. در این

صورت مرتبه بزرگی جرم این توپ چقدر است؟

(مرتبه بزرگی شعاع و جرم نوترون را به ترتیب 10^{-15} m و 10^{-27} kg

در نظر بگیرید.)

۱۶. برای ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ مطلوب است:

(الف) تعداد نوکلئون‌ها (ب) تعداد نوترون‌ها

(پ) بار الکتریکی خالص هسته

۱۷. در هر یک از موارد زیر نماد X چه عنصری را نشان می‌دهد

و در هسته هر یک چند نوترون وجود دارد؟ در صورت لزوم از

جدول تناوبی استفاده کنید.

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

۱۸. آیا می‌توان ایزوتوپ ${}^{61}_{29}\text{X}$ را با روش شیمیایی از ایزوتوپ

${}^{59}_{29}\text{X}$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ ${}^{61}_{29}\text{Y}$ چطور؟ پاسخ خود را توضیح

دهید.

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 5730 سال رو به کاهش می‌گذارد.

کربن ۱۴ موجود در یک نمونه زغال قدیمی، $1/56$ درصد (معادل $\frac{1}{16}$) مقدار عادی کربن ۱۴ موجود در زغالی است که تازه تولید شده است. سن تقریبی این زغال قدیمی چقدر است؟

۲۵. نیمه‌عمر بیسموت ۲۱۲ حدود 60 دقیقه است. پس از گذشت چهار ساعت، چه کسری از ماده اولیه، در نمونه‌ای از این بیسموت، باقی می‌ماند؟

۲۴. هنگامی که نیتروژن جو 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 به طور طبیعی در جو وجود دارد درهم می‌آمیزد. بررسی‌ها نشان داده است که به ازای هر 10000 میلیارد اتم پایدار کربن ۱۲، تقریباً یک اتم پرتوزای کربن ۱۴ از این طریق وارد جو می‌شود.

اتم‌های کربن جوّی از طریق فعالیت‌های بیولوژیکی از قبیل فتوسنتز و تنفس، به نحو کاتوره‌ای مکان خود را عوض می‌کنند و به بدن جانداران منتقل می‌شوند. به طوری که اتم‌های کربن هر