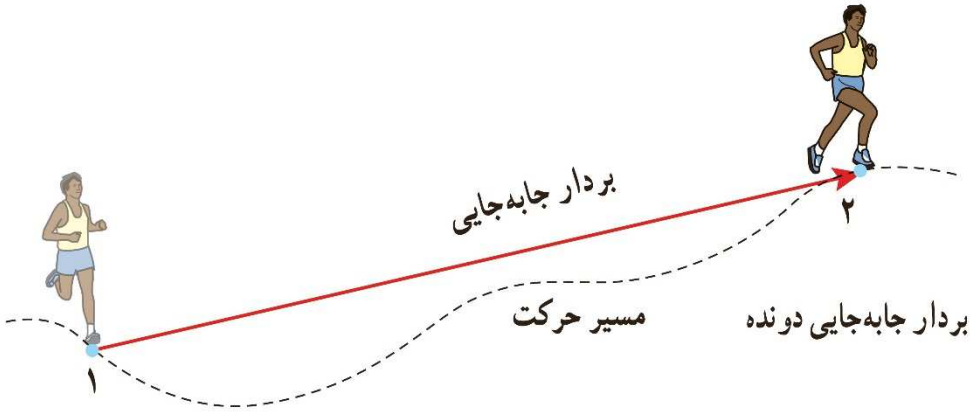
فیزیک۱۲: فصل اول: حرکت

مسافت و جابه‌جایی: شکل۱-۱ مسیر حرکت دونده‌ای را از مکان ۱ تا مکان ۲ نشان می‌دهد. طول این مسیر، مسافت پیموده شده یا به اختصار **مسافت** نامیده می‌شود. همچنین پاره‌خط جهت‌داری که مکان آغازین حرکت را به مکان پایانی حرکت وصل می‌کند **بردار جابه‌جایی** نامیده می‌شود.



شکل ۱ـ۱ مسیر حرکت و بردار جابه‌جایی دونده

برداری که مبدأ محور را به مکان جسم در هر لحظه وصل می‌کند **بردار مکان** جسم در آن لحظه نامیده می‌شود.

سرعت متوسط متحرک بین دو لحظه از زمان برابر شیب پاره‌خطی است که نقاط نظیر آن دو لحظه در نمودار مکان ـ زمان را به یکدیگر وصل می‌کند.

تندی متحرک در هر لحظه از زمان را تندی لحظه‌ای می‌نامند. اگر هنگام گزارش **تندی لحظه‌ای**، به جهت حرکت متحرک نیز اشاره شود، در واقع **سرعت لحظه‌ای** $(\vec{V})$ آن را، که کمیتی برادری است بیان کرده‌ایم.

سرعت در هر لحظهٔ دلخواه t، برابر شیب خط مماس بر نمودار مکان ـ زمان در آن لحظه است.

شتاب در هر لحظهٔ دلخواه t، برابر شیب خط مماس بر نمودار سرعت ـ زمان در آن لحظه است.

فصل دوم: دینامیک و حرکت دایره‌ای

قانون اول نیوتون: در علوم نهم دیدیم که اگر جسمی به‌طور هم‌زمان چند نیرو اثر کند و این نیروها اثر یکدیگر را خنثی کنند، به عبارت دیگر برایند نیروهای وارد بر جسم صفر شود، می‌گوییم نیروهای وارد بر جسم متوازن هستند. نیوتون نظر گالیله را به صورت یک قانون بیان کرد که به نام قانون اول نیوتون شهرت دارد:«یک جسم، حالت سکون یا حرکت با سرعت ثابت خود را حفظ می‌کند مگر آنکه نیروی خالصی (غیرصفر) به آن وارد شود». به عبارت دیگر وقتی نیروهای وارد بر جسمی متوازن باشند، اگر جسم ساکن باشد، همچنان ساکن باقی می‌ماند و اگر در حال حرکت باشد، سرعت جسم تغییر نمی‌کند و ثابت می‌ماند.

براساس قانون اول نیوتون، اگر بر جسم نیروی خالصی وارد نشود، جسم ساکن می‌ماند و یا با سرعت ثابت بهحرکتخود ادامه می‌دهد. به این خاصیت اجسام که میل دارند وضعیت حرکت خود را هنگامی که نیروی خالص وارد بر آنها صفر است حفظ کنند، لختی گویند.

چنین تجربیاتی در تأیید قانون دوم نیوتون است که بیان می‌کند:

هر گاه بر جسم نیروی خالصی وارد شود، جسم تحت تأثیر آن نیرو شتاب می‌گیرد که این شتاب با نیروی خالص وارد بر جسم نسبت مستقیم دارد و در همان جهت نیروی خالص است و با جرم جسم نسبت وارون دارد.

یکای **SI** نیرو، نیوتون است. یک نیوتون برابر با مقدار نیروی خالصی است که به جسمی به جرم یک کیلوگرم، شتابی برابر یک متر بر مربع ثانیه می‌دهد.

نیروها همواره به صورت جفت وجود دارند. اگریکی از این نیروها را **کنش** بنامیم، نیروی دیگر **واکنش** نامیده می‌شود.

قانون سوم نیوتون رابطهٔ کمّی بین نیروهای کنش و واکنش را به صورت زیر بیان می‌کند:

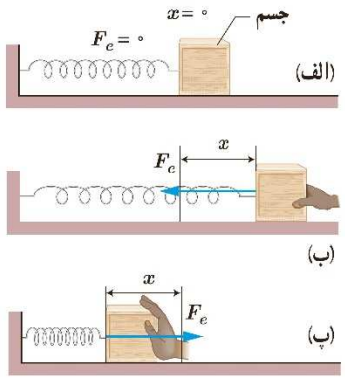
هر گاه جسمی به جسم دیگر نیرو وارد کند، جسم دو نیز به جسم اول نیرویی هم‌اندازه و هم‌راستا اما در خلاف جهت وارد می‌کند.

نیروی مقاومت شاره: وقتی جسمی مانند یک توپ را از بالای ساختمانی رها می‌کنیم، علاوه بر وزن جسم، نیرویدیگری از طرف هوا به جسم در خلاف جهت حرکت وارد می‌شود. به‌طور کلی وقتی جسمی در یک شاره (مایع یا گاز) قرار دارد و نسبت به آن حرکت می‌کند از طرف شاره نیرویی در خلاف جهت حرکت جسم، به آن وارد می‌شود که به آن **نیروی مقاومت شاره** می‌گویند و معمولاً آن را با $\vec{f}_D$ نشان می‌دهند. نیروی مقاومت شاره به بزرگی جسم، تندی آن و... بستگی دارد. هر چه تندی جسم بیشتر باشد، نیروی مقاومت شاره بیشتر خواهد شد. همان‌طور که می‌دانیم اگر جسم در هوا حرکت کند، به این نیرو، **نیروی مقاومت هوا** می‌گویند.

نیروی اصطکاک: وقتی تلاش می‌کنیم جسمی را روی سطحی به حرکت درآوریم، چه جسم حرکت کند و چه ساکن بماند، با مقاومتی روبه‌رو می‌شویم که به آن **نیروی اصطکاک** گویند.

اگر یک خودروی ساکن بر سطح افقی خیابان را (که در وضعیت پارک است) هُل دهید، و نتوانید آن را به حرکت درآورید، در این حالت نیرویی در خلاف جهت هُل دادن شما بین لاستیک‌ها و سطح به وجود آمده است که با حرکت خودرو مخالفت می‌کند. این نیرو، نمونه‌ای از **نیروی اصطکاک ایستایی** است و آن را با $\mathbf{f_s}$ نشان می‌دهند.حال خودروی در حال حرکتی را در نظر بگیرید که راننده‌اش ترمز کرده و چرخ‌های خودرو قفل شده است. سرعت خودرو کاهش پیدا می‌کند و پس از طی مسافتی متوقف می‌شود. در این حالت نیز نیرویی در خلاف جهت حرکت از طرف سطح بر خودرو وارد می‌شود. این نیرو، نمونه‌ای از **نیروی اصطکاک جنبشی** است و آن را با $\mathbf{f_k}$ نشان می‌دهند.

نیروی اصطکاک بین دو جسم به جنس سطح جسم، و زبری و نرمی آنها و ... بستگی دارد؛ مثلاً اصطکاک بین کفش و سطح زمین به جنس زیره کفش و سطحی که روی آن حرکت می‌کنیم بستگی دارد. نیروی اصطکاک بین دو جسم به علت ناهمواری‌های محل تماس دو جسم ایجاد می‌شود. حتی سطوحی که بسیار هموار به نظر می‌آیند، ناهمواری‌های میکروسکوپی بسیاری دارند که سبب اصطکاک می‌شوند.

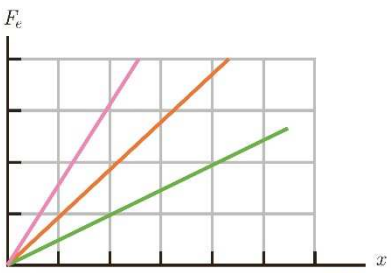


شکل ۲ ــ ۱۵ الف) فنر طول عادی دارد و جسم در نقطهٔ تعادل است، ب) فنر کشیده شده است و نیروی کشسانی رو به نقطهٔ تعادل به جسم وارد می‌کند، و پ) فنر فشرده شده است، و نیروی کشسانی رو به نقطهٔ تعادل به جسم وارد می‌کند.

اگر یک سر فنری را به نقطه‌ای محکم کنیم و سر دیگر آن را بکشیم، طول فنر افزایش می‌یابد. شکل ۲-۱۵، فنری را با طول عادی نشان می‌دهد که در آن، فنر به فشرده و نه کشیده شده است. اگر فنر را به اندازهٔ $\mathbf{x}$ بکشیم یافشرده کنیم (شکل ۲-۱۵ ب و پ)، فنر نیرویی به طرف نقطهٔ تعادل به جسم وارد می‌کند. تجربه نشان می‌دهد هر چه فنر را بیشتر بکشیم یا فشرده کنیم(در محدودهٔ معینی از تغییر طول فنر)، **نیروی کشسانی فنر** نیز بیشتر می‌شود.

$$\mathbf{F_e = kx} \qquad \text{اندازهٔ نیروی کشسانی فنر} \qquad (۲-۷)$$

ضریب $\mathbf{k}$ در رابطهٔ ۲-۷، ثابت فنر نام دارد. ثابت فنر از مشخصات فنر است و به اندازه،شکل و ساختار ماده‌ای که فنر از آن ساخته شده بستگی دارد. در رابطه ۲-۷ نیرو برحسب نیوتون $(\mathbf{N})$، $\mathbf{x}$ برحسب متر $(\mathbf{m})$ و $\mathbf{k}$ برحسب نیوتون بر متر $(\mathbf{N/m})$است. معادلهٔ ۲-۷ را به افتخار رابرت هوک، دانشمند انگلسی (۱۷۰۳-۱۶۳۵ م.) که این رابطه را کشف کرد، **قانون هوک** می‌نامند.

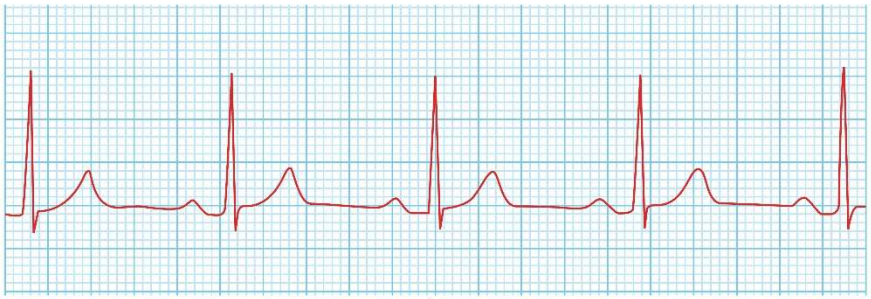


شکل ۲ ــ ۱۶ هرچه ثابت فنر بیشتر باشد، شیب نمودار بیشتر و فنر سخت‌تر است.

برای یک فنر انعطاف‌پذیر، $\mathbf{k}$ عددی کوچک (حدود $\mathbf{۱۰۰N/m}$) و برای یک فنر سفت $\mathbf{k}$ عددی بزرگ(حدود $\mathbf{۱۰۰۰۰N/m}$) است. نمودار نیروی کشسانی برحسب تغییر طول برای سه فنر با $\mathbf{k}$های متفاوت در شکل ۲-۱۶ رسم شده است.

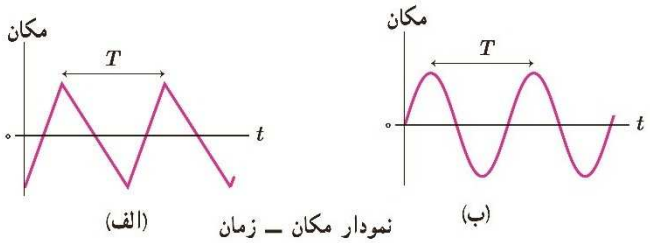
فصل سوم: نوسان و موج

نوسان‌ها می‌توانند دوره‌ای یا غیر دوره‌ای باشند؛ مثلا شکل تصویری از ضرباهنگِ (ریتمِ) قلب یک شخص را نشان می دهد که در هر دقیقه ۶۵ بار می‌زند. نقش‌های این تصویر به طور منظم تکرار می‌شوند، که به آن چرخهٔ (سیکل) نوسان گفته می‌شود. چنین نوسان‌هایی را که هر چرخهٔ آن در دوره‌ای دیگر تکرار شود نوسان دوره‌ای می‌نامند.



نمونه‌ای از نمودار الکتروقلب نگارهٔ[1] (نوار قلب) یک شخص

شکل، دو نمونهٔ دیگر از نوسان‌های دوره‌ای را با رسم نمودار مکان ـ زمان آنها نشان می‌دهد. هر دوی این نوسان‌ها دوره‌ای هستند، ولی نوسان شکل (ب)، به‌طور سینوسی رخ داده است. به نوسان‌های سینوسی، حرکت هماهنگ ساده (**SHM**) گفته می‌شود. حرکت هماهنگ ساده، مبنایی برای درک هر نوع نوسان دوره‌ای دیگر است زیرا در سطوح بالاتر نشان داده می‌شود که هر نوسان دوره‌ای را می‌توان مجموعی از نوسان‌های سینوسی در نظر گرفت.

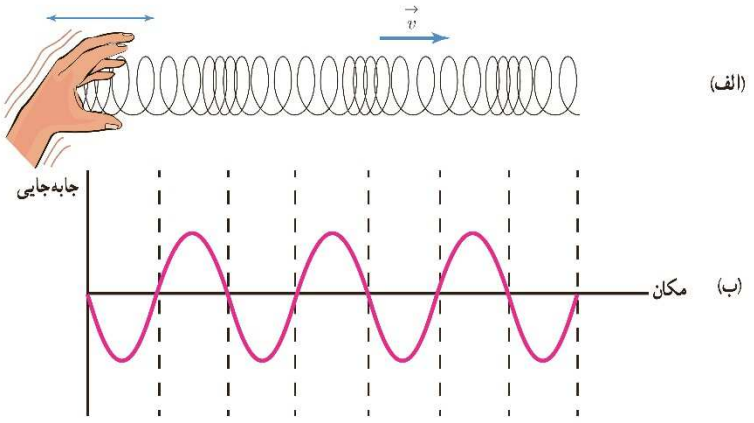


نمودار مکان ــ زمان برای دو نمونه از نوسان دوره‌ای

نوسانگر (مثلاً جرم ـ فنر یا آونگ ساده) با انحراف از وضع تعادل با بسامدی معیّن شروع به نوسان می‌کرد. به بسامد این نوسان‌ها بسامد طبیعی گفته می‌شود. مطابق این تعریف، بسامد طبیعی سامانهٔ جرم ـ فنر $f_0 = \sqrt{k/m}/2\pi$ و بسامد طبیعی آونگ ساده $f_0 = \sqrt{g/L}/2\pi$ است. اما این نوسانگرها می‌توانند با اعمال یک نیروی خارجی، با بسامدهای دیگری نیز به نوسان درآیند. به چنین نوسانی، نوسان واداشته گفته می‌شود و بسامد این نوسان را با f_d نمایش می‌دهند. مثالی از یک نوسان واداشته، تاب خوردن کودکی است که به‌طور دوره‌ای هُل داده می‌شود. نوسان تاب بی‌آنکه در ادامهٔ حرکت هُل داده شود مثالی از یک نوسان آزاد است، به‌طوری که نوسان‌های تاب، میرا و سرانجام متوقف می‌شود. ولی وقتی شخصی تاب را هُل می‌دهد، او انرژی تلف شده بر اثر اصطکاک و مقاومت هوا را جبران می‌کند و مانع از میراشدن نوسان تاب می‌شود. اگر دامنهٔ نوسان‌های تاب بزرگ‌تر و بزرگ‌تر شود حاکی از آن است که بسامد نوسان‌های واداشته با بسامد طبیعی تاب برابر شده است. در چنین وضعیتی ($f_d = f_0$) اصطلاحاً گفته

می‌شود که برای نوسانگر تشدید (رزونانس) رخ داده است. اگر تاب را با بسامدهایی بیشتر یا کمتر از بسامد طبیعی آن هُل دهیم، دامنهٔ نوسان کوچک‌تر از حالتی خواهد شد که آن را با بسامد طبیعی‌اش هل می‌دهیم.

به موج‌های عرضی و طولی که تا اینجا بررسی شد، موج های پیش‌رونده گفته می‌شود. زیرا، هر دوی این موج‌ها از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر حرکت کرده و انرژی را با خود منتقل می‌کنند.



الف) تصویری لحظه‌ای از ایجاد نواحی جمع‌شدگی و باز شدگی در طول یک فنر بلند کشیده، هنگام انتشار موج طولی سینوسی در فنر ب) نمودار جابه‌جایی ــ مکان برای موج ایجاد شده در فنر

یعنی دقت کنید تمام قسمت‌های فنر که کاملاً باز یا کاملاً فشرده هستند همان $y = 0$ است.

دقت کنید در پدیده دوپلر اگر سرعت حرکت منبع ناشنونده ثابت باشد مقدار بسامدی که شنونده می‌شنود با گذشت زمان تغییر نمی‌کند و ثابت است، البته دقت داشته باشید این بسامد بدلیل حرکت منبع یا شنونده حتماً نسبت به بسامد واقعی منبع بیشتر یا کمتر است اما عدد آن با گذشت زمان تغییر نمی‌کند.

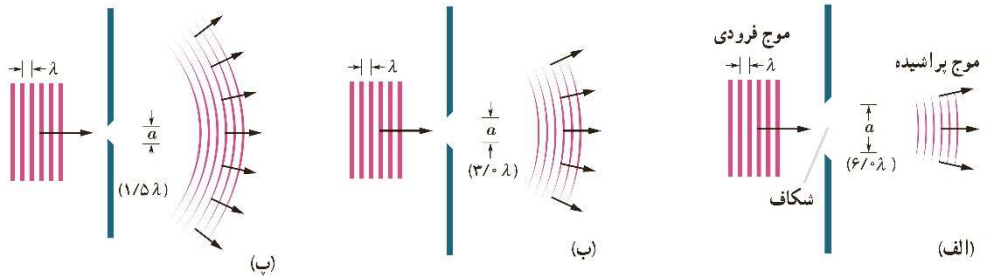
فصل چهارم: برهم‌کنش‌های موج

قانون شکست اسنل $\mathbf{n}_1 \sin\theta_1 = \mathbf{n}_2 \sin\theta_2$

پاشندگی نور: همان طور که در علوم هشتم دیدیم وقتی باریکهٔ نور سفید خورشید به وجهی از یک منشور می تابد، در عبور از منشور به رنگ‌های مختلفی تجزیه می‌شود دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیطی به جز خلأ به طول موج نور بستگی دارد؛ یعنی وقتی باریکهٔ نوری شامل پرتوهایی با طول موج‌های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های مختلفی شکسته می‌شوند. به این پخش شدگی نور، پاشندگی نور می‌گویند. عموماً ضریب شکست یک محیط معیّن برای طول موج های کوتاه‌تر، بیشتر است.

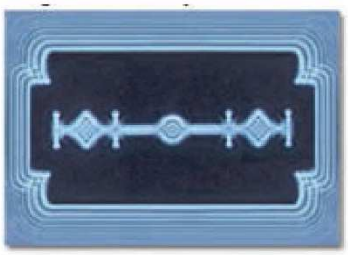
مخصوص رشته ریاضی

به این پدیده که موج در عبور از یک شکاف با پهنایی از مرتبهٔ طول موج، به اطراف گسترده می‌شود، **پراش** می‌گویند. پراش فقط به وضعیت عبور موج از یک شکاف باریک (یا روزنه) محدود نمی‌شود بلکه هنگام عبور موج از لبه‌های مانعی که ابعاد آن در حدود طول موجِ موج باشد نیز رخ می‌دهد. پراش برای همهٔ انواع موج اتفاق می‌افتد.

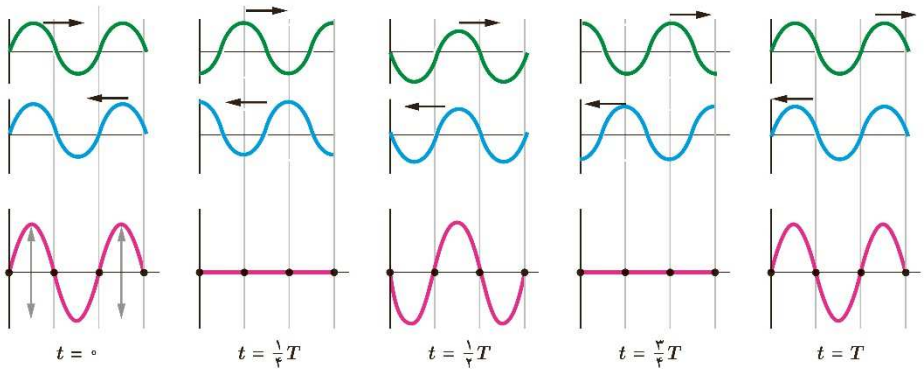


البته پراش در واقع چیزی فراتر از صرفاً یک گستردگی بیشتر موج است و مثلاً اگر پراش نوری تکفام از یک شکاف باریک یا لبه ای تیز را روی یک پرده ملاحظه کنیم، همواره نوارهای تاریک و روشنی موسوم به نقش پراش را موازی با لبه‌های شکاف مشاهده می‌کنیم. شکل نقش پراش نوری تکفام از لبه های تیز درون و بیرون یک تیغ را نشان می دهد. تحلیل نقش پراش مبتنی بر بحثِ تداخل امواج است.

پراش امواج تخت هنگام عبور
از شکافی باریک در تشت موج


پراش نوری تکفام که از لبه‌های تیز درون و
بیرون یک تیغ ایجاد شده است.

نوارهای روشن و تاریک روی پرده که ناشی از تداخل‌های سازنده و ویرانگرند، نقش تداخلی خوانده می‌شود.



چند عکس لحظه‌ای
از تشکیل یک موج ایستاده در یک
ریسمان کشیده شده در مدت یک دوره

دقت کنید از تداخل شکل‌های آبی و سبز شکل قرمز ساخته می‌شود. یعنی سرجلسه کنکور ممکن است شکل آبی و سبز را بدهند و شما باید بتوانید تشخیص دهید.

تشدید در بطری و تشدیدگر هلمهولتز: اگر در دهانهٔ باریک یک بطری بدمید، می توانید آن را به صدا درآورید در واقع یک بطری مانند یک لولهٔ صوتی با یک انتهای باز است که بسامدهای تشدیدی معیّنی دارد. وقتی در دهانهٔ یک بطری می‌دمیم گستره وسیعی از بسامدها ایجاد می‌شود. حال اگر یکی از این بسامدها با یکی از بسامدهای تشدیدی بطری منطبق باشد، یک موج صوتی قوی ایجاد می‌شود. البته نوسان‌های بطری دقیقا مانند نوسان‌هایی نیست که در یک لولهٔ صوتی ساده ایجاد می‌شود، زیرا بطری یک گردن دارد و هوای موجود در این گردن با هوای موجود در بقیهٔ قسمت های بطری چیزی موسوم به تشدیدگر هلمهولتز را تشکیل می‌دهد که این موجب نوسانات هوای درون بطری می‌شود. نوع اولیهٔ تشدیدگر هلمهولتز کره‌هایی توخالی با دهانه‌ای باز به شکل یک گردن است که در سال ۱۸۵۰ میلادی توسط دانشمند آلمانی، هرمن فون هلمهولتز، ساخته شد (شکل) تشدیدگرهای هلمهولتز نیز همانند لوله‌های صوتی بسامدهای تشدیدی معیّنی دارند و هرگاه بسامد یک صوت برابر با یکی از بسامدهای تشدیدی آنها باشد، تشدیدگر پاسخ قوی‌تری به این صوت می‌دهد.

(ب) (الف)

الف) طرحی از تشدیدگر اولیه هلمهولتز و
ب) تصویری از چند تشدیدگر هلمهولتز کروی با اندازه‌های متفاوت

مشترک بین ریاضی و تجربی

در فیزیک ۱ دیدیم که همهٔ اجسام در هر دمایی که باشند، از خود امواج الکترومغناطیسی گسیل (نشر) می‌کنند که به آن تابش گرمایی گفته می‌شود.

برای یک جسم جامد، نظیر رشتهٔ داغ یک لامپ روشن، این امواج شامل گستره پیوسته‌ای از طول موج‌هاست. به همین دلیل طیف ایجاد شده در این شرایط را طیف گسیلی پیوسته یا به اختصار طیف پیوسته می‌نامند.

تشکیل طیف پیوسته توسط جسم جامد، ناشی از برهم کنش قوی بین اتم‌های سازنده آن است. حال آنکه گازهای کم فشار و رقیق، که اتم‌های منفرد آنها از برهم‌کنش‌های قوی موجود در جسم جامد آزادند به جای طیف پیوسته، طیفی گسسته را گسیل می‌کنند که شامل طول موج‌های معیّنی است. این طیف گسسته را، معمولاً طیف گسیلی خطی یا به اختصار طیف خطی می‌نامند و طول موج‌های ایجادشده در آن، برای اتم های هر گاز منحصر به فرد هستند و سرنخ‌های مهمی را درباره نوع و ساختار اتم‌های آن گاز به دست می‌دهند.

$n=3 \rightarrow \lambda_1 = 656/20 nm$ (خط قرمز)

$n=4 \rightarrow \lambda_2 = 486/08 nm$ (خط آبی)

$n=5 \rightarrow \lambda_3 = 434/00 nm$ (خط نیلی)

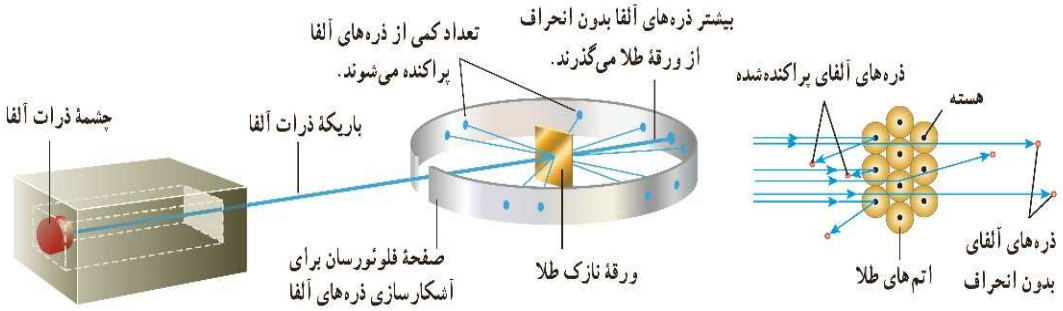
$n=6 \rightarrow \lambda_4 = 410/13 nm$ (خط بنفش)

مدل اتم رادرفورد ـ بور

جوزف تامسون فیزیک دان انگلیسی، در سال ۱۸۹۶ میلادی موفق به کشف الکترون و اندازه‌گیری نسبت بار به جرم e/m آن شد. کشف الکترون، تامسون را ترغیب کرد تا مدلی برای اتم ارائه دهد. این مدل سرانجام در سال ۱۹۰۴ میلادی ارائه شد. بنابر مدل تامسون، اتم همچون کره‌ای است که بار مثبت به طور همگن در سرتاسر آن گسترده شده است و الکترون‌ها که سهم ناچیزی در جرم اتم دارند در جاهای مختلف آن پراکنده شده اند. این مدل را گاهی مدل کیک کشمشی هم می‌گویند، زیرا الکترون‌ها مانند دانه‌های کشمش در آن پخش شده‌اند.

در مدل اتمی تامسون، وقتی الکترون‌ها با بسامدهای معیّنی حول وضع تعادلشان نوسان می‌کنند این نوسان سبب تابش امواج الکترومغناطیسی از اتم می‌شود. یکی از ناکامی‌های مدل تامسون این بود که بسامدهای تابش گسیل شده از اتم، که این مدل پیش‌بینی می کرد، با نتایج تجربی سازگار نبود.

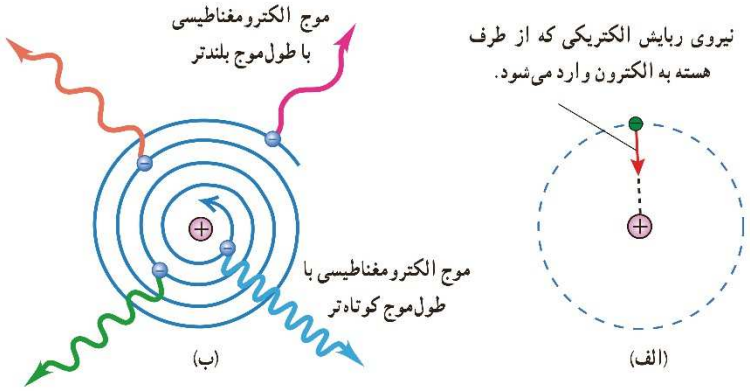
وقتی ارنست رادرفورد در سال ۱۹۱۱ میلادی نتایج آزمایش‌هایی را انتشار داد که مدل تامسون نمی‌توانست آنها را توضیح دهد، این مدل کنار گذاشته شد. رادرفورد و همکارانش باریکه‌ای از ذره‌های دارای بار مثبت را (از جنس هستهٔ اتم هلیم که به آن ذرهٔ آلفا گفته می‌شود) بر سطح ورقه ای نازک از جنس طلا فرو تاباندند. رادرفورد بنابر مدل تامسون انتظار داشت که تمامی ذره های آلفا، با انحراف بسیار اندکی از ورقهٔ طلا بگذرند. در عمل نیز بیشتر این ذره ها بدون انحراف یا با انحراف اندکی از ورقهٔ طلا می‌گذشتند و در برخورد با صفحهٔ فلوئورسان، در پشت آن، جرقه های نورانی تولید می‌کردند. با وجود این، برخی از ذره‌های آلفا در هنگام خروج از ورقهٔ نازک طلا، در زاویه‌های بزرگ منحرف و پراکنده می‌شدند و حتی تعدادی از آنها نیز به عقب برمی‌گشتند! رادرفورد پس از انجام این آزمایش و براساس مدل تامسون و شناختی که از باریکهٔ ذرات آلفا داشت، گفت: «مثل آن بود که گلولهٔ توپی را به ورقهٔ نازکی از کاغذ شلیک کنید و با شگفتی مشاهده کنید که پس از برخورد گلولهٔ توپ با سطح کاغذ، گلوله بازگردد.»این ذره ها باید با چیز پرجرمی برخورد کرده باشد؛ اما با چه چیزی؟ رادرفورد استدلال کرد که ذره‌های بدون انحراف باید از قسمت‌هایی از ورقه گذشته باشند که تهی بوده باشد، در حالی که ذره‌های با انحراف شدید از مرکزهایی بسیار چگال و دارای بار مثبت منحرف شده‌اند. وی سرانجام نتیجه گرفت باید هسته‌ای چگال و دارای بار مثبت در مرکز هر اتم باشد که با مدل اتمی تامسون به طور آشکار مغایرت داشت.



آزمایش پراکندگی رادرفورد که در آن ذرات α از یک ورقهٔ نازک طلا پراکنده شده‌اند. تمام وسیله‌ها در یک اتاقک خلأ قرار دارد که در این شکل نشان داده نشده است.

بنابر مدل رادرفورد، اتم دارای یک هستهٔ بسیار چگال و کوچک (10^{-15}m≈شعاع) و با بار مثبت است که با تعدادی الکترون در فاصله‌هایی به نسبت دور احاطه شده است. در حالت طبیعی، اتم از نظر الکتریکی خنثاست؛ زیرا بار مثبت هسته، درست مساوی مجموع بار منفی الکترون‌هایی است که هسته را دربرگرفته‌اند. مدل اتمی رادرفورد که آن را مدل اتم هسته‌ای یا مدل هسته‌ای اتم می‌نامند، در مواردی با موفقیت همراه بود، ولی با چالش‌های تازه‌ای نیز مواجه شد. این چالش ها برای خود رادرفورد نیز مطرح شده بود، ولی به طور صریح می‌گفت که: «نباید از مدلی که بر اساس بعضی نتایج تجربی ساخته شده است انتظار داشته باشیم که به تمامی چالش‌ها پاسخ دهد.»

اگر الکترون ها را نسبت به هسته ساکن فرض کنیم، مطابق شکل (الف)، باید تحت تأثیر نیروی ربایشی الکتریکی بین هسته و الکترون، روی هسته سقوط کنند و در نتیجه اتم باید ناپایدار باشد؛ چیزی که با واقعیت جور درنمی آید. همچنین اگر الکترون‌ها، مانند سیاره‌های منظومهٔ خورشیدی که دور خورشید می‌چرخند، به دور هسته در گردش باشند، باز هم این حرکت پایدار نمی‌ماند. زیرا حرکت مداری الکترون به دور هسته، شتابدار است. بنا بر فیزیک کلاسیک، این حرکت شتابدار الکترون سبب تابش امواج الکترومغناطیسی می‌شود که بسامد آن، با بسامد حرکت مداری الکترون برابر است. با تابش موج الکترومغناطیسی توسط الکترون، از انرژی آن کاسته می‌شود. این کاهش انرژی باعث می‌شود که شعاع مدار الکترون به دور هسته به تدریج کوچک‌تر و بسامد حرکت آن به تدریج بیشتر شود. این افزایش تدریجی بسامد حرکت مداری الکترون‌ها، سبب می‌شود تا بسامد موج الکترومغناطیسی گسیل شده نیز به تدریج زیاد شود. به این ترتیب باید طیف امواج الکترومغناطیسی گسیل شده از اتم، پیوسته باشد و الکترون پس از گسیل پی در پی امواج الکترومغناطیسی روی هسته فرو افتد شکل (ب) این نتیجه افزون بر اینکه با واقعیت ناسازگار است با طیف خطی گسیل شده توسط اتم‌ها نیز جور درنمی‌آید.



ناتوانی مدل اتم هسته‌ای رادرفورد در تبیین پایداری اتم. الف) اگر الکترون نسبت به هسته ساکن فرض شود بر اثر نیروی ربایش الکتریکی، روی هسته سقوط می‌کند. ب) اگر الکترون دور هسته بچرخد، طیفی پیوسته گسیل می‌کند و سرانجام روی هسته فرو می‌افتد.

امروزه می‌دانیم بسیاری از خط‌های تاریکی که فرانهوفر در طیف خورشید کشف کرد، ناشی از جذب طول موج‌های مربوط به این خط‌ها توسط گازهای جو خورشید است. خط‌های دیگر به سبب جذب نور در گازهای جو زمین پدید می‌آیند.

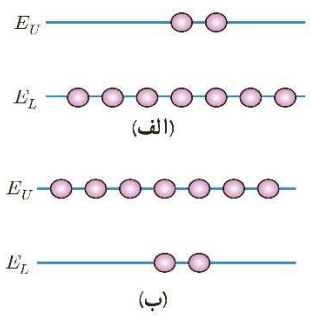
هم در طیف گسیلی و هم در طیف جذبی اتم‌های گاز هر عنصر، طول موج های معیّنی وجود دارد که از مشخصه‌های آن عنصر است. یعنی طیف گسیلی و طیف جذبی هیچ دو گازی همانند یکدیگر نیست.

اتم‌های هر گاز دقیقاً همان طول موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کنند که اگر دمای آنها به اندازهٔ کافی بالا رود و یا به هر صورت دیگر برانگیخته شوند، آنها را تابش می‌کنند.

موفقیت‌ها و نارسایی‌های مدل بور: مدل بور تصویری از چگونگی حرکت الکترون‌ها به دور هسته ارائه می‌کند. این مدل در تبیین پایداری اتم، طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی و محاسبهٔ انرژی یونش اتم هیدروژن با موفقیت همراه است. افزون بر این، مدل بور را برای اتم‌های هیدروژن گونه نیز می‌توان به کار برد. اتم هیدروژن گونه به اتم‌هایی گفته می‌شود که تنها یک الکترون دارند. برای مثال، اتم لیتیم که در حالت خنثی سه الکترون دارد اگر دو الکترون خود را از دست داده باشد، یک اتم هیدروژن گونه است. مدل بور می تواند انرژی یونش و همچنین طول موج‌های طیف خطی اتم‌های هیدروژن گونه مانند لیتیم دو بار یونیده (Li^{2+}) را پیش‌بینی کند که با تجربه سازگاری خوبی دارد.

مدل بور به رغم موفقیت‌هایی که اشاره شد، نارسایی‌هایی نیز دارد که تنها به دو مورد از آنها اشاره می‌کنیم. این مدل برای وقتی که بیش از یک الکترون به دور هسته می‌گردد به کار نمی‌رود، زیرا در مدل بور، نیروی الکتریکی که یک الکترون بر الکترون دیگر وارد می‌کند به حساب نیامده است. همچنین این مدل نمی تواند متفاوت بودن شدت خط های طیف گسیلی را توضیح دهد. برای مثال مدل بور نمی‌تواند توضیح دهد که چرا شدت خط قرمز با شدت خط آبی در طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی با یکدیگر متفاوت است.

در گسیل القایی یک چشمهٔ انرژی خارجی مناسب باید وجود داشته باشد تا الکترون‌ها را به ترازهای انرژی بالاتر برانگیخته کند. این انرژی می‌تواند به روش های متعددی از جمله درخش‌های شدید نور معمولی و یا تخلیه‌های ولتاژ بالا فراهم شود. اگر انرژی کافی به اتم‌ها داده شود، الکترون های بیشتری به تراز انرژی بالاتر برانگیخته خواهند شد، شرطی که به وارونی جمعیت معروف است. وارونی جمعیت الکترون‌ها در یک محیط لیزری، مربوط به وضعیتی است که تعداد الکترون‌ها در ترازهایی موسوم به ترازهای شبه‌پایدار نسبت به تراز پایین‌تر بسیار بیشتر باشند. در این ترازها، الکترون‌ها مدت زمان بسیار طولانی‌تری (10^{-3} s) نسبت به حالت برانگیختهٔ معمولی (10^{-8} s) باقی می‌مانند. این زمان طولانی‌تر، فرصت بیشتری برای افزایش وارونی جمعیت و در نتیجه تقویت نور لیزر فراهم می‌کند.

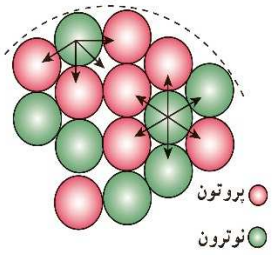


الف) به طور معمول و در دمای اتاق، بیشتر الکترون‌ها در تراز انرژی پایین‌تر قرار دارند. ب) در وضعیتی که وارونی جمعیت به وجود آید بیشتر الکترون‌ها در تراز بالاتری (در مقایسه با تراز پایین‌تر) قرار دارند.

فصل۶: آشنایی با فیزیک هسته‌ای

هستهٔ اتم از نوترون‌ها و پروتون‌ها تشکیل شده است که به‌طور کلی نوکلئون نامیده می‌شوند.

نام دیگر ایزوتوپ، هم مکان است.



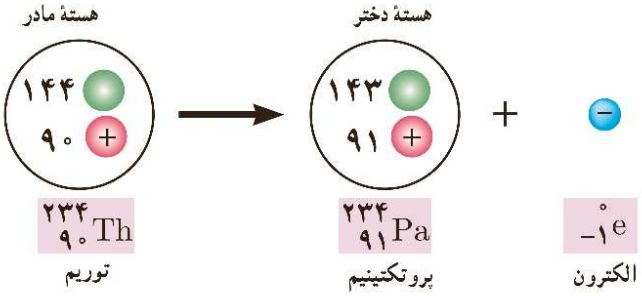
قسمتی از هسته و نوکلئون‌های آن که به صورت طرح‌وار نشان داده شده است. هر نوکلئون، فقط به نزدیک‌ترین نوکلئون‌های مجاورش نیروی هسته‌ای وارد می‌کند.

پایدار هسته: همان‌طور که در شکل ۶-۱ نشان داده شده است ابعاد هسته در مقایسه با ابعاد اتم کوچک 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 هستهٔ $10^{14}\ g/cm^3$ 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 می شود.

نیروی هسته‌ای، کوتاه بُرد است و تنها در فاصله‌ای کوچک‌تر از ابعاد هسته اثر می‌کند. (شکل) 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 هسته ای، تفاوتی بین پروتون و نوترون وجود ندارد و دلیل نام‌گذاری آنها با نام عام نوکلئون نیز همین است.

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.

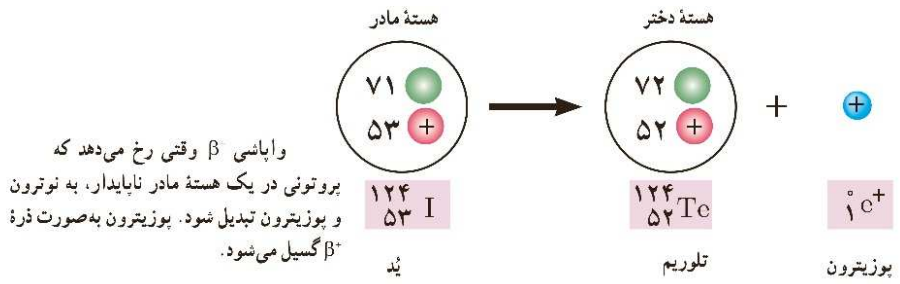
اندازه‌گیری‌های دقیق نشان داده است که جم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل‌دهنده‌اش اندکی کمتر است. اگر این اختلاف جرم را که به آن کاستی جرم هسته گفته می‌شود، مطابق رابطهٔ معروف اینشتین $(E = mc^2)$، در مربع تندی نور (c^2) ضرب کنیم انرژی بستگی هسته‌ای به‌دست می‌آید.



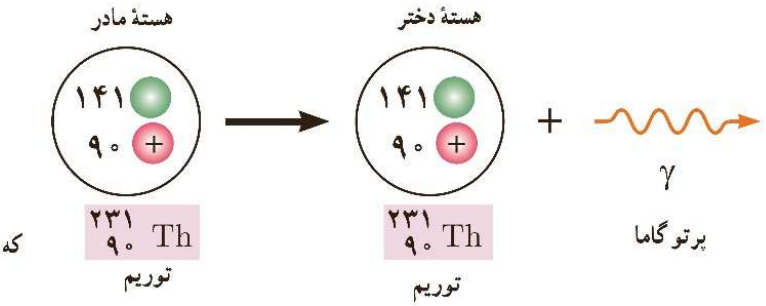
واپاشی β^- وقتی رخ می‌دهد که نوترونی در یک هستهٔ مادر ناپایدار به پروتون و الکترون تبدیل شود. الکترون به صورت ذرهٔ β^- گسیل می‌شود.

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.

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



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



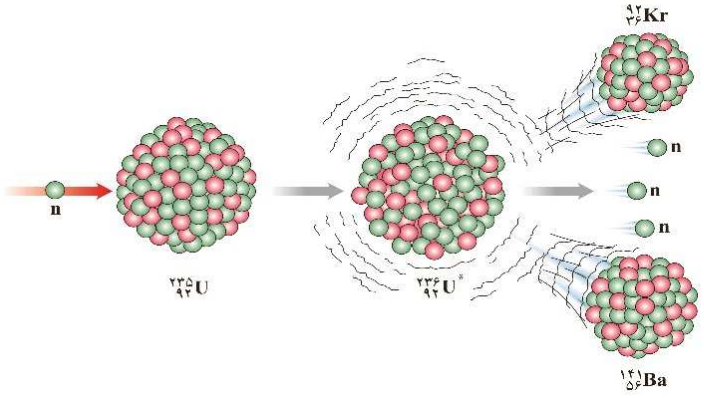
واپاشی γ وقتی رخ می‌دهد که هسته‌ای برانگیخته شده باشد.

مختص ریاضی

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. شکل، 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:

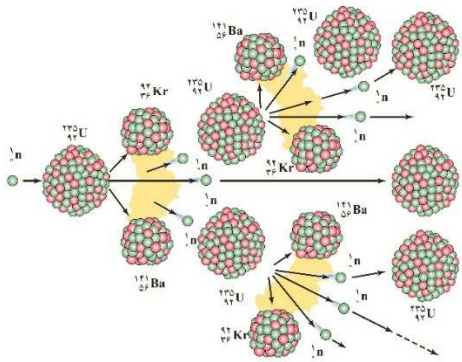
$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow \underbrace{^{236}_{92}U^*}_{\text{هستهٔ مرکّب (ناپایدار)}} \rightarrow \underbrace{^{141}_{56}Ba}_{\text{باریم}} + \underbrace{^{92}_{36}Kr}_{\text{کریپتون}} + \underbrace{3\,^{1}_{0}n}_{\text{سه نوترون}}$$



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 (به طور عمده انرژی جنبشی) هستند.

واکنش زنجیری: همان‌طور که دیدیم فایند 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 بارالکتریکی ندارند، هسته‌های دیگر آنها را دفع نمی‌کنند. نوترون‌ها پس از کُندشدن، 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، واکنش زنجیری می‌نامند.

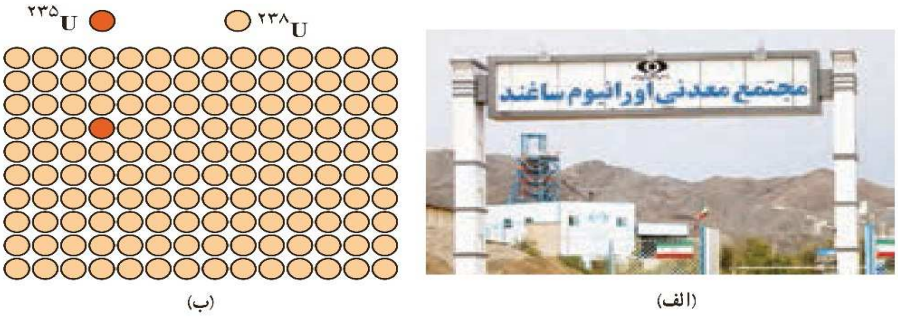


مدل ساده‌ای از واکنش زنجیری. یک نوترون وارد هستهٔ اورانیم ۲۳۵ می‌شود و فرایند شکافت رخ می‌دهد. برای سادگی، به‌جز باریم و کریپتون، محصولات دیگر شکافت را در این شکل نشان نداده‌ایم.

در واکنش‌های شکاف 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، 10^8 برابر انرژی آزادشده به ازای هر مولکول در یک واکنش شیمیایی معمولی، نظیر سوختن بنزین یا زغال‌سنگ است. حتی در انفجار تری‌نیتروتولوئن (TNT)، انرژی آزاد شده به ازای هر مولکول، در حدود ۳۰eV است.

شکل (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 معدن های اورانیم رخ نمی دهد؟ 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 ب) . اگر چه $^{238}_{92}U$ فراوان‌ترین ایزوتوپ اورانیم است، احتمال اینکه نوترونی را گیر بیندازد و شکافته شود، بسیار کم است و در نتیجه واکنش زنجیری را ناممکن می‌سازد.

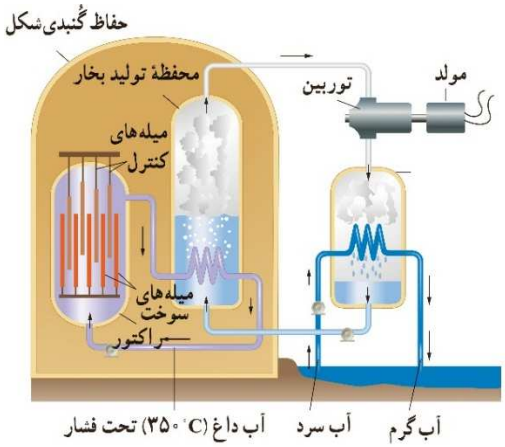


الف) معدن اورانیم ساغند با بیشترین ظرفیت تولید در ایران در حوالی شهر اردکان یزد واقع است. ب) در سنگ معدن اورانیم از هر ۱۴۰ اتم اورانیوم، تنها یکی ایزوتوپ ۲۳۵ است.

غنی سازی اورانیم: همان طور که اشاره کردیم، واکنش زنجیری در سنگ معدن اورانیم رخ نمی‌دهد. برای استفاده از اورانیم به عنوان سوخت در نیروگاه های هسته‌ای یا استفاده در انفجارهای هسته ای، باید فراوانی ایزوتوپ ۲۳۵ را در یک نمونهٔ اورانیم، افزایش دهیم. به فرایند افزایش درصد یا غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در یک نمونه، غنی سازی گفته می‌شود. بیشتر راکتور های تجاری تولید برق، مانند راکتور نیروگاه هسته‌ای بوشهر، از اورانیمی استفاده می‌کنند که

در آنها ایزوتوپ $^{235}_{92}U$ تا ۳ درصد غنی‌سازی شده است. همچنین در بیشتر راکتورهای پژوهشی، مانند راکتور پژوهشی دانشگاه تهران، از سوختی استفاده می‌شود که ایزوتوپ $^{235}_{92}U$ تا ۲۰ درصد غنی‌سازی شده است.

راکتورهای شکافت هسته‌ای: نوترون‌های آزاد شده در فرایند شکافت ایزوتوپ $^{235}_{92}U$، انرژی جنبشی زیادی دارند (به‌طو متوسط حدود $2MeV$)و به نوترون‌های تُند معروف‌اند. این نوترون‌ها، با احتمال بسیار بیشتری جذب ایزوتوپ $^{238}_{92}U$ می‌شوند. تجربه نشان می‌دهد که 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)، آب‌سنگین (D_2O)و گرافیت (اتم‌های کربن) از جمله موادی هستند که به عنوان کُندساز نوترون‌ها در واکنش‌های شکافت هسته‌ای استفاده می‌شوند.



راکتور هسته‌ای، جایی است که در آن واکنش زنجیری شکافت به شکل 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 به کار می‌روند.

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)

سوخته هسته‌ای (معمولاً با حدود ۳ درصد ایزوتوپ $^{235}_{92}U$) به صورت میله‌هایی با قطر حدود $1cm$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 به وجود آوردن شکافت، تنظیم می‌شود. میله‌های کنترل معمولاً از مواد جذب کنندهٔ نوترون، مانند کادمیم یا بور، ساخته می شوند. در نوعی از راکتورها، که به راکتورهای آب تحت فشار (PWR) معروف‌اند، آبی که سوخت هسته ای 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 انتقال یافته به سامانهٔ دوم، سبب تولید بخار می‌شود که توربین و مولد الکتریسیته را به کار می‌اندازد.