اندازه، جرم، چگالی هسته و ذرات درون آن

**۱- اندازهٔ هسته:** هسته ناحیهٔ مرکزی بسیار کوچکی در اتم است که شعاع آن تقریباً $\frac{۱}{۱۰۰۰۰۰}$ شعاع اتم است. در فیزیک دهم خواندید که شعاع اتم از مرتبهٔ $۱۰^{-۱۰}\ m$ است؛ بنابراین شعاع هسته از مرتبهٔ $۱۰^{-۱۵}\ m$ است.

**۲- جرم هسته:** جرم الکترون‌ها در مقایسه با جرم ذرات درون هسته تقریباً ناچیز است. به همین خاطر در حدود ۹۹/۹ درصد جرم اتم در هسته متمرکز است.

**۳- چگالی هسته:** این جرم زیاد در آن حجم کم، یعنی چگالی خیلی‌خیلی‌خیلی زیاد هسته! چگالی هسته تقریباً از مرتبهٔ $۱۰^{۱۴}\ kg/m^۳$ است.

**۴- ذرات هسته:** درون هسته دو نوع ذره به نام‌های پروتون و نوترون قرار دارد. از نظر الکتریکی، پروتون دارای بار مثبت به اندازهٔ $۱/۶۰۲\times۱۰^{-۱۹}\ C$ است اما نوترون خاصیت الکتریکی ندارد. تفاوت پروتون و نوترون فقط به بار الکتریکی ختم نمی‌شود و در موارد دیگر با هم تفاوت دارند. یکی از آن‌ها جرم است. در واقع جرم نوترون اندکی از جرم پروتون بیشتر است. در جدول زیر مشخصات کامل‌تر الکترون، پروتون و نوترون را می‌بینید.

| نام ذره | بار الکتریکی | جرم برحسب کیلوگرم | جرم برحسب یکای جرم اتمی (u) |
|---|---|---|---|
| الکترون | $-۱/۶\times۱۰^{-۱۹}\ C$ | $۹/۱۰۹۳۸۹\times۱۰^{-۳۱}\ kg$ | $۵/۴۸۵۷۹۹\times۱۰^{-۴}$ |
| پروتون | $+۱/۶\times۱۰^{-۱۹}\ C$ | $۱/۶۷۲۶۲۲\times۱۰^{-۲۷}\ kg$ | ۱/۰۰۷۲۷۶ |
| نوترون | ۰ | $۱/۶۷۴۹۲۹\times۱۰^{-۲۷}\ kg$ | ۱/۰۰۸۶۶۴ |

**نکته:** با همهٔ تفاوت‌هایی که پروتون و نوترون‌ها دارند، به خاطر شباهتی بسیار مهم، هر دو ذره را «نوکلئون» می‌نامیم.

## تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها در هسته

**تعداد پروتون‌ها:** تعداد پروتون موجود در هستهٔ هر عنصر، عدد معینی است که به آن **عدد اتمی** می‌گوییم و آن را با **نماد** $Z$ نمایش می‌دهیم.

**نکته:** اگر اتم خنثی باشد، تعداد پروتون‌های هسته با تعداد الکترون‌هایی که به دور هسته در حال گردش‌اند، برابرند.

**تعداد نوترون‌ها:** تعداد نوترون‌ها در هر هسته را **عدد نوترونی** می‌نامیم و با **نماد** $N$ نمایش می‌دهیم.

**تعداد نوکلئون‌ها:** به مجموع تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها (نوکلئون‌ها) **عدد جرمی** می‌گوییم و آن را با **نماد** $A$ نمایش می‌دهیم.

با توجه به تعاریف بالا می‌توانیم رابطهٔ روبه‌رو را بنویسیم:

**عدد اتمی + عدد نوترونی = عدد جرمی**

$$A = N + Z$$

## نمایش هسته

اگر نماد شیمیایی یک عنصر $X$ باشد، هستهٔ آن عنصر به شکل روبه‌رو نمایش داده می‌شود:

$$^{\text{عدد جرمی}\ A}_{\text{عدد اتمی}\ Z}X^{\text{نماد عنصر}}_{\text{عدد نوترونی}\ N}$$

یعنی سمت چپ بالا تعداد نوکلئون، سمت چپ پایین تعداد پروتون و سمت راست پایین تعداد نوترون نوشته می‌شود:

$$^{\text{تعداد نوکلئون}}_{\text{تعداد پروتون}}X_{\text{تعداد نوترون}}$$

البته نوشتن عدد نوترونی $(N)$ ضرورتی ندارد؛ زیرا می‌توان آن را از تفاضل عدد جرمی از عدد اتمی $(N = A - Z)$ به دست آورد.

**مثال** در هر هسته عدد خواسته‌شده را بنویسید.

الف) ... $^{27}_{13}Al$ ب) $^{16}_{...}O_{8}$ پ) $^{...}_{26}Fe_{30}$

## ایزوتوپ (هم‌مکان)

گاهی یک عنصر چند نوع هسته دارد. تفاوت هسته‌های این عنصر به دلیل متفاوت‌بودن تعداد نوترون‌های آن است. **هسته‌هایی را که تعداد پروتون‌های یکسان، اما تعداد نوترون‌های متفاوت دارند، ایزوتوپ (به معنای هم‌مکان) می‌نامیم**؛ یعنی ایزوتوپ‌ها عدد اتمی یکسان اما عدد نوترونی و در نتیجه عدد جرمی متفاوت دارند. مثلاً هستهٔ اتم کربن ۶ پروتون دارد، اما ممکن است ۶، ۷ یا ۸ نوترون داشته باشد. در این صورت این سه نوع هسته را که ایزوتوپ‌های کربن می‌نامیم، به شکل‌های روبه‌رو نمایش می‌دهیم: $^{12}_{6}C_{6}$ , $^{13}_{6}C_{7}$ , $^{14}_{6}C_{8}$

با توجه به این موضوع می‌فهمیم که تعداد هسته‌های متفاوت موجود در طبیعت بسیار بیشتر از تعداد اتم‌های موجود در طبیعت است.

در مورد ایزوتوپ‌ها باید به ۳ نکتهٔ زیر توجه کنید:

۱) فراوانی ایزوتوپ‌ها در طبیعت یکسان نیست. مثلاً ۹۸/۹۳ درصد کربن موجود در طبیعت از نوع ایزوتوپ $^{12}C$ و ۱/۰۷ درصد از نوع $^{13}C$ است و ایزوتوپ $^{14}C$ به صورت طبیعی و پایدار در طبیعت وجود ندارد.

۲) ایزوتوپ‌های یک عنصر دارای خواص شیمیایی یکسان هستند، اما از نظر فیزیکی با هم متفاوت‌اند. به همین دلیل برای جداسازی آن‌ها از یکدیگر، تنها از روش‌های فیزیکی می‌توانیم استفاده کنیم.

۳) به‌جز ایزوتوپ‌های مربوط به هستهٔ هیدروژن، ایزوتوپ‌های مختلف یک هسته با نام همان هسته خوانده می‌شوند.

**ایزوتوپ‌های هیدروژن:** هیدروژن دارای سه ایزوتوپ است. هستهٔ ایزوتوپ اول فقط یک پروتون $(^{1}_{1}H)$ دارد. این ایزوتوپ، فراوان‌ترین ایزوتوپ هیدروژن در طبیعت است و آن را به همان نام هیدروژن می‌شناسیم (هیدروژن ـ ۱). هستهٔ ایزوتوپ دیگر هیدروژن دارای یک پروتون و یک نوترون است که آن را **دوتریم** می‌نامیم و با نماد $^{2}_{1}D$ نمایش می‌دهیم. ۰/۰۲٪ هیدروژن موجود در طبیعت دوتریم است (هیدروژن ـ ۲).

و اما هستهٔ ایزوتوپ آخر دارای دو نوترون و یک پروتون است و آن را **تریتیم** نامیده و با نماد $^{3}_{1}T$ نشان می‌دهیم. این ایزوتوپ در طبیعت بسیار نادر است (هیدروژن ـ ۳).

درون هسته پروتون‌ها و نوترون‌ها قرار دارند. پروتون‌ها بار مثبت دارند و یکدیگر را دفع می‌کنند. نوترون‌ها هم که خاصیت الکتریکی ندارند.
با این اوضاع، هسته باید از هم بپاشد اما می‌دانیم اغلب هسته‌ها پایدار هستند؛ پس کدام نیرو باعث قرارگرفتن نوکلئون‌ها در کنار هم می‌شود؟
شاید بگویید نیروی گرانشی بین نوکلئون‌ها

نسبت نیروی الکتریکی به نیروی گرانشی بین دو پروتون فرضی را محاسبه می‌کنیم تا ببینیم نیروی الکتریکی چند برابر نیروی گرانشی است؟

نیروی الکتریکی از رابطهٔ $F_E = \frac{kq_1q_2}{r^2}$ و نیروی گرانشی از رابطهٔ $F_g = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$ به دست می‌آید؛ پس نسبت آن‌ها برابر است با:

$$\frac{F_E}{F_g} = \frac{\frac{kq_1q_2}{r^2}}{\frac{Gm_1m_2}{r^2}} = \frac{kq_1q_2}{Gm_1m_2} = \frac{(9\times10^9\ \frac{N.m^2}{C^2})(1/6\times10^{-19}\ C)^2}{(6/67\times10^{-11}\ \frac{N.m^2}{kg^2})(1/67\times10^{-27}\ kg)^2} \simeq 10^{36}$$

نیروی دافعهٔ الکتریکی بین دو پروتون $10^{36}$ برابر نیروی جاذبهٔ گرانشی بین همان دو پروتون است؛ بنابراین در هسته اصلاً زور جاذبهٔ گرانشی به دافعهٔ الکتریکی نمی‌رسد

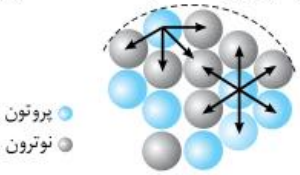
## نیروی هسته‌ای

نیروی هسته‌ای **نیروی جاذبه‌ای** است که نوکلئون‌ها (چه پروتون‌ها و چه نوترون‌ها) بر یکدیگر وارد می‌کنند. این نیرو با خنثی‌کردن نیروی دافعهٔ الکتریکی بین پروتون‌ها، موجب پایداری هسته می‌شود.

در مورد نیروی هسته‌ای باید به دو مورد زیر توجه کنید:

**۱- نیروی هسته‌ای ربطی به بار الکتریکی ندارد.** از دید این نیرو تفاوتی بین پروتون‌ها (که بار الکتریکی دارند) و نوترون‌ها (که بار الکتریکی ندارند) نیست؛ یعنی در فاصله‌ای کوچک‌تر از ابعاد هسته، این نیرو بین دو پروتون $(P-P)$ یا دو نوترون $(N-N)$ و یا یک پروتون و یک نوترون $(P-N)$ تقریباً یکسان است. در واقع، علت این‌که پروتون‌ها و نوترون‌ها را به طور کلی نوکلئون می‌نامیم، همین است.

**۲- نیروی هسته‌ای بسیار کوتاه برد است؛** یعنی این نیرو در فواصل بسیار کوچک (در حد $10^{-15}\ m$) قابل توجه است اما با افزایش فاصله به شدت کاهش می‌یابد و عملاً صفر می‌شود. به همین علت برخلاف نیروی دافعهٔ الکتریکی در هسته که از طرف هر پروتون بر تمامی پروتون‌های موجود در هسته وارد می‌شود، نیروی هسته‌ای تنها از طرف هر نوکلئون بر نوکلئون مجاور وارد می‌شود.




### هسته‌های پایدار

کوتاه‌بُردبودن نیروی هسته‌ای قوی در پایداری هسته نقش اساسی دارد. تا زمانی‌که پروتون‌های یک هسته به هم نزدیک باشند، نیروی هسته‌ای به راحتی بر نیروی دافعهٔ الکتریکی غلبه می‌کند. وقتی پروتون‌ها دور از هم قرار می‌گیرند، نیروی جاذبهٔ هسته‌ای که کوتاه‌بُرد است، از نیروی دافعهٔ الکتریکی که نسبتاً بلندبُرد است، کم‌تر می‌شود و پایداری هسته کاهش می‌یابد. به همین خاطر هر چه تعداد پروتون‌ها در هسته بیشتر شود، برای پایدارماندن هسته، تعداد نوترون‌ها نیز باید افزایش یابد. چون نوترون‌ها بدون آن‌که نیروی دافعهٔ الکتریکی داشته باشند، سایر نوکلئون‌ها را جذب می‌کنند و به این ترتیب نیروی دافعهٔ الکتریکی بین پروتون‌ها خنثی می‌شود.

در هسته‌های سبک که تعداد نوکلئون‌ها کم است، معمولاً تعداد پروتون‌ها با نوترون‌ها برابر است $(N=Z)$ و این هسته‌ها به خوبی پایدارند.

در هستهٔ عنصرهای سنگین‌تر (با عدد اتمی بیشتر) تعداد نوترون‌های بیشتری لازم است تا نیروی هسته‌ای بین نوکلئون‌ها با نیروی دافعهٔ الکتریکی بین پروتون‌ها متوازن شود. به همین دلیل در هستهٔ این عنصرها به تدریج تعداد نوترون‌ها از تعداد پروتون‌ها بیشتر می‌شود $(N>Z)$.

**نکته** در بین همهٔ عناصر و ایزوتوپ‌هایشان، بیشترین تعداد پروتونی که در یک هستهٔ پایدار وجود دارد، برابر $Z=83$ و مربوط به بیسموت است $(^{209}_{83}Bi)$ (تأکید می‌کنیم در بین هسته‌های پایدار!!). تعداد نوترون‌های این هسته برابر است با $N=A-Z=209-83=126$ و نسبت $\frac{N}{Z}$ برای هستهٔ بیسموت تقریباً ۱/۵ است. در واقع نسبت $\frac{N}{Z}$ برای هسته‌های پایدار از عدد صفر (برای هیدروژن) تا حدود ۱/۵ (برای بیسموت) متغیر است.

### هسته‌های ناپایدار

اضافه‌شدن نوترون‌ها به هسته در ابتدا به پایداری هسته کمک می‌کند اما اگر با افزایش عدد اتمی، تعداد نوترون‌ها به حدی زیاد شود که شعاع هسته و فاصلهٔ نوکلئون‌ها تا حد زیادی افزایش یابد، پایداری هسته کاهش می‌یابد. چون با زیادشدن فاصلهٔ بین نوکلئون‌ها، نیروی جاذبهٔ هسته‌ای که نیرویی کوتاه‌بُرد است، به شدت کاهش می‌یابد؛ بنابراین توازن نیروها در هسته به سود نیروی دافعهٔ الکتریکی بین پروتون‌ها به هم خورده و هسته به شدت ناپایدار می‌شود.

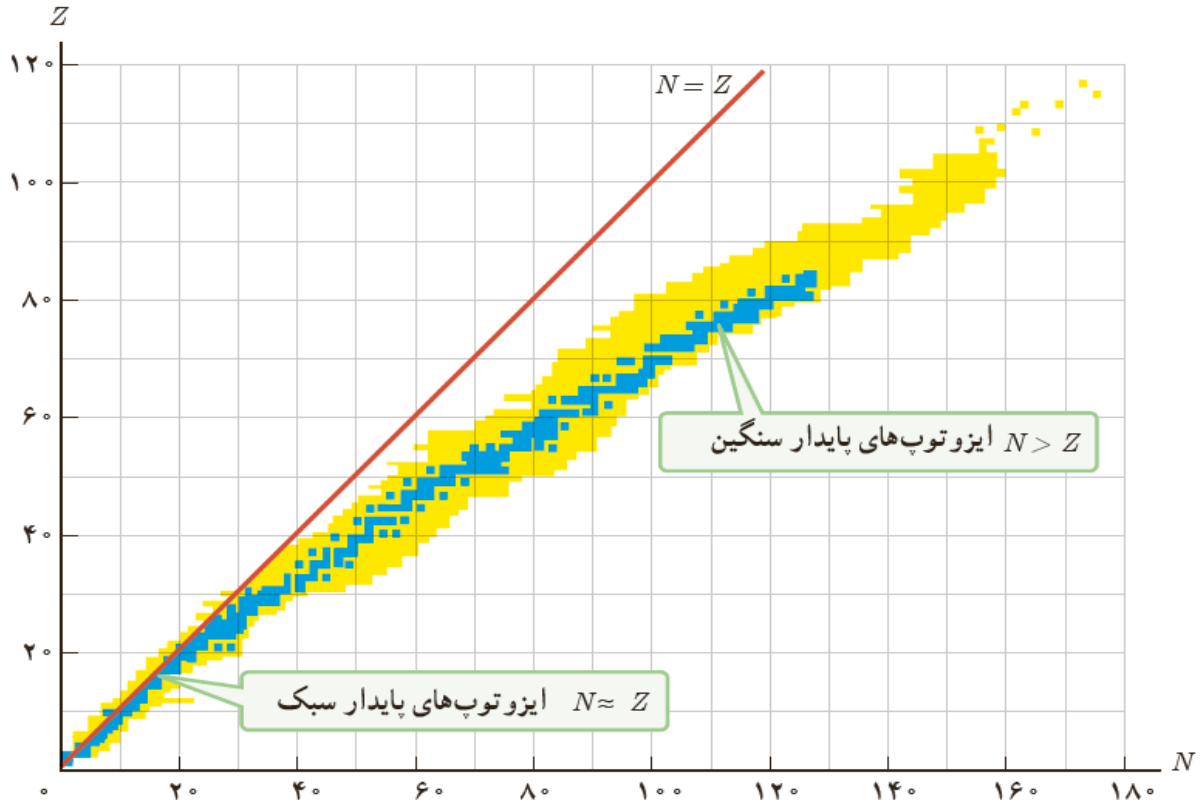
**نکته** همهٔ هسته‌هایی که بیش از ۸۳ پروتون دارند $(Z>83)$ ناپایدارند و نسبت $\frac{N}{Z}$ آن‌ها بیش از ۱/۵ است. این هسته‌ها به تدریج واپاشیده شده و از بین رفته و یا خواهند رفت و به هسته‌های پایدارتر و سبک‌تر تبدیل خواهند شد. توریم و اورانیم تنها عنصرهایی هستند که به علت کندبودن واپاشی آن‌ها پس از میلیاردها سال هنوز در طبیعت یافت می‌شوند.

پس به طور خلاصه:

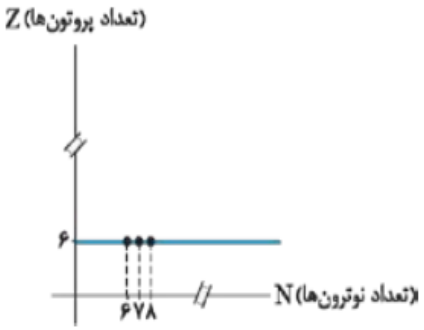
هسته‌های ناپایدار : $\frac{N}{Z}>1/5$ , $Z>83$ هسته‌های پایدار : $0\le\frac{N}{Z}\le 1/5$ , $Z\le 83$

## یک نمودار مفید

در نمودار روبه‌رو، همهٔ عناصر و ایزوتوپ‌هایشان با توجه به تعداد پروتون (عدد اتمی) و تعداد نوترون (عدد نوترونی) هستهٔ آن‌ها با یک نقطه نشان داده شده است.




از این نمودار چه چیزهایی می‌توانیم بفهمیم:

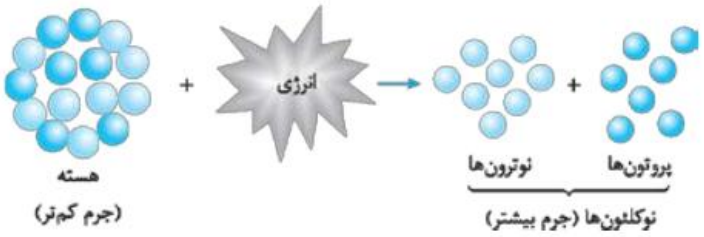



۱ اگر در این نمودار، از عدد اتمی مربوط به هر عنصر، خطی به موازات محور N (عمود بر محور Z) رسم کنیم، نقاطی از نمودار که روی این خط قرار می‌گیرند ایزوتوپ‌های یک عنصر خاص را نشان می‌دهند؛ مثلاً اگر از $Z = ۶$ که مربوط به کربن است، خطی به موازات محور N (محور افقی) رسم کنیم، دو نقطهٔ $N = ۶$، $N = ۷$ و $N = ۸$ روی این خط قرار می‌گیرند که نشان‌دهندهٔ تعداد نوترون‌های ایزوتوپ‌های کربن است.

۲ با توجه به نمودار می‌بینیم که در هستهٔ اتم‌های سبک $(Z < ۲۰)$، اغلب تعداد پروتون‌ها با تعداد نوترون‌ها برابر است $(\frac{N}{Z} = ۱)$؛ اما هر چه عدد اتمی (تعداد پروتون‌ها) بیشتر می‌شود، نسبت $\frac{N}{Z}$ افزایش می‌یابد. برای این‌که این موضوع بهتر دیده شود، خط $N = Z$ را رسم کرده‌ایم. معلوم است که با زیادشدن Z اغلب عناصر، پایین این خط یعنی جایی‌که تعداد نوترون‌ها از پروتون‌ها بیشتر است، قرار می‌گیرند.

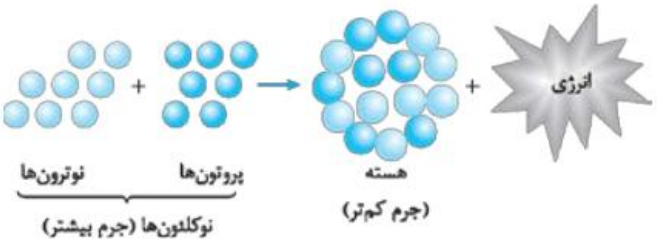
## انرژی بستگی هسته

برای جداکردن نوکلئون‌های یک هستهٔ پایدار، باید به هسته انرژی بدهیم. این انرژی را انرژی **بستگی هسته**[1] می‌نامیم و آن را با نماد $B$ نمایش می‌دهیم. هر چه‌قدر هسته پایدارتر باشد، انرژی بستگی بیشتر است؛ یعنی برای جداکردن نوکلئون‌ها به انرژی بیشتری نیاز داریم.




**هنگام واپاشی هسته**

از طرفی هنگام پیوستن نوکلئون‌ها به هم و تشکیل هسته، انرژی‌ای به اندازهٔ انرژی بستگی آزاد می‌شود. اما این انرژی از کجا آمده است؟




**هنگام تشکیل هسته**

ما انتظار داریم که جرم یک هسته با مجموع جرم پروتون‌ها و جرم نوترون‌ها برابر باشد؛ یعنی، توقع داریم جرم هسته برابر باشد با:

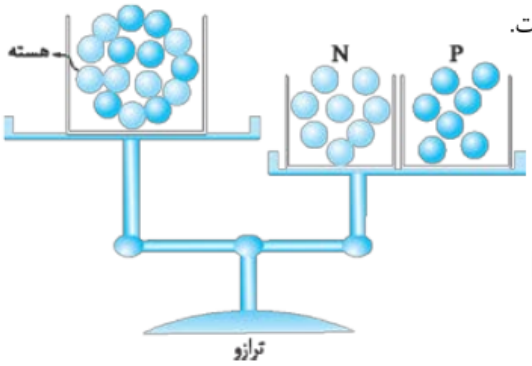
(جرم هر نوترون × تعداد نوترون) + (جرم هر پروتون × تعداد پروتون)

$$Zm_p + Nm_n$$

ولی اندازه‌گیری‌های دقیق نشان می‌دهد این‌طور نیست و جرم هسته از این مقدار کم‌تر است!!! یعنی:

(جرم هسته) < (جرم هر نوترون × تعداد نوترون) + (جرم هر پروتون × تعداد پروتون) $\Rightarrow m_x < Zm_p + Nm_n$

بله درست است! مقداری جرم گم شده است!!! در واقع اتفاقی مانند شکل روبه‌رو رخ داده است.




به این جرم‌گم‌شده که همان تفاوت مجموع جرم نوکلئون‌ها با جرم هسته است، «**کاستی جرم هسته**» می‌گوییم و آن را با نماد $\Delta m$ نمایش می‌دهیم؛ یعنی:

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - m_x$$

**یعنی این مقدار جرم طبق رابطهٔ $E = mc^2$ به انرژی تبدیل شده است و هنگام تشکیل هسته آزاد شده است.** این انرژی آزادشده معادل با انرژی بستگی است؛ بنابراین، انرژی بستگی هسته $(B)$ برابر است با:

$$B = (\Delta m)c^2 = [(Zm_p + Nm_n) - m_x]c^2$$

که در رابطهٔ بالا $c$ (سرعت نور در خلأ) و برابر با $c = 2/99792458 \times 10^8\ m/s \simeq 3 \times 10^8\ m/s$ است.

**مثال** **اگر اختلاف جرم نوکلئون‌ها و جرم یک هسته $2 \times 10^{-28}\ kg$ باشد، انرژی بستگی این هسته چند ژول است؟**

**نکته** برای بیان انرژی بستگی هسته اغلب از یکای «الکترون‌ولت ($eV$)» و مضرب‌های دیگر آن مانند کیلوالکترون‌ولت ($keV$) و مگاالکترون‌ولت ($MeV$) استفاده می‌کنیم. همان‌طور که قبلاً دیدید رابطهٔ الکترون‌ولت با ژول به صورت زیر است:

$$1\,eV \simeq 1/602176 \times 10^{-19}\,J \simeq 1/6 \times 10^{-19}\,J$$

برای نمونه در مثال قبل، انرژی بستگی هسته را برحسب مگاالکترون‌ولت به روش تبدیل زنجیره‌ای به دست می‌آوریم:

$$B = 1/8 \times 10^{-11}\,J = 1/8 \times 10^{-11}\,J \times \frac{1\,eV}{1/6 \times 10^{-19}\,J} \times \frac{MeV}{10^{6}\,eV} = 112/5\,MeV$$

## ترازهای انرژی در هسته

مانند انرژی الکترون‌ها در اتم، انرژی نوکلئون‌های موجود در هسته کوانتیده است و نوکلئون‌ها در ترازهای انرژی معینی در هسته قرار دارند. به همین خاطر نوکلئون‌های داخل هسته نمی‌توانند هر انرژی را داشته باشند.

اگر نوکلئون‌ها انرژی لازم را دریافت کنند، از حالت پایه به ترازهای انرژی بالاتر می‌روند و هسته برانگیخته می‌شود. هستهٔ برانگیخته را با نماد $X^{*}$ نشان می‌دهیم. هستهٔ برانگیخته می‌تواند با گسیل یک فوتون به حالت پایه برگردد که انرژی این فوتون از مرتبهٔ کیلوالکترون‌ولت ($keV$) تا مگاالکترون‌ولت ($MeV$) است. از این موضوع می‌فهمیم که اختلاف ترازهای انرژی در هسته از مرتبهٔ کیلوالکترون‌ولت تا مگاالکترون‌ولت خواهد بود.

**نکته** همان‌طور که قبلاً دیدید، اختلاف ترازهای انرژی الکترون‌ها در حد الکترون‌ولت است؛ اما اختلاف ترازهای انرژی نوکلئون‌های هسته در حد مگاالکترون‌ولت است. به همین دلیل است که هستهٔ اتم‌ها در واکنش‌های شیمیایی برانگیخته نمی‌شوند و برای برانگیختگی آن‌ها به چیزی بیشتر از واکنش شیمیایی احتیاج داریم که همان واکنش هسته‌ای هستند.

## پرتوزایی طبیعی

تبدیل هسته‌های سنگین ناپایدار به هسته‌های سبک‌تر و پایدارتر را واپاشی می‌گوییم. واپاشی یک هسته از طریق پرتوزایی یعنی گسیل برخی ذرات یا فوتون‌ها از هسته صورت می‌گیرد. اگر پرتوزایی به طور طبیعی و خودبه‌خود صورت گیرد، آن را **پرتوزایی طبیعی** می‌نامیم. در اثر پرتوزایی طبیعی، سه نوع پرتوی آلفا ($\alpha$)، بتا ($\beta$) و گاما ($\gamma$) ایجاد می‌شود.

در پرتوزایی، هستهٔ اولیه را «هستهٔ مادر» و هستهٔ ایجادشده پس از پرتوزایی را «هستهٔ دختر» می‌نامیم. البته خودِ هستهٔ دختر نیز ممکن است پرتوزا باشد.

### الف) واپاشی با گسیل پرتو آلفا ($\alpha$)

پرتوی آلفا شامل ذراتی از جنس هستهٔ هلیم با بار $+2e$ هستند؛ یعنی ذرات آلفا مانند هستهٔ هلیم شامل ۲ پروتون و ۲ نوترون هستند ($^{4}_{2}He$). در نتیجه وقتی هسته‌ای سنگین، یک ذرهٔ آلفا گسیل می‌کند، دو پروتون و دو نوترون از دست می‌دهد.

واکنش کلی پرتوزایی $\alpha$ به صورت روبه‌رو است: پرتوزایی $\alpha$: $^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2}$

یعنی اگر هسته‌ای سنگین یک ذرهٔ آلفا گسیل کند، دو واحد از عدد اتمی و دو واحد از عدد نوترونی و در نتیجه چهار واحد از عدد جرمی آن کاسته می‌شود؛ یعنی:

$$\begin{cases} A' = A - 4 \\ Z' = Z - 2 \\ N' = N - 2 \end{cases}$$

به عنوان مثال اگر اورانیم ۲۳۸ ($^{238}_{92}U$) به عنوان هستهٔ مادر، ذرهٔ آلفا گسیل کند، به توریم $^{234}_{90}T$ (هستهٔ دختر) تبدیل می‌شود:

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$$

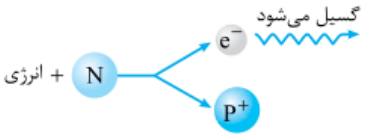
**نکته** ذره‌های آلفا، نسبت به ذرات $\beta$ سنگین‌تر هستند و برد کوتاهی دارند، به طوری که پس از طی مسافت کوتاهی در هوا (۱ تا ۲ سانتی‌متر) به سرعت جذب می‌شوند و اگر این ذره‌ها از راه تنفس یا دستگاه گوارش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت‌های بدن می‌شوند.

### ب) واپاشی با گسیل پرتو بتا (β)

واپاشی β متداول‌ترین نوع واپاشی در هسته‌ها است. این واپاشی که نخستین نوع پرتوزایی بود که توسط بکرل مشاهده شد، به دو صورت انجام می‌شود:

**۱- واپاشی $\beta^-$ (بتای منفی):** واپاشی β معمولاً با گسیل ذرات باردار $\beta^-$ که از جنس الکترون هستند $({}_{-1}^{0}e^-)$ رخ می‌دهد. برای آن‌که یک هسته علی‌رغم آن‌که الکترون ندارد، بتواند آن را گسیل کند، ابتدا یک نوترون به یک پروتون و یک الکترون تبدیل می‌شود و سپس الکترون ایجادشده گسیل می‌شود.

$${}_{0}^{1}N \rightarrow {}_{1}^{1}P + {}_{-1}^{0}e^-$$




همان‌طور که می‌بینید، در این واپاشی به تعداد پروتون هسته (عدد اتمی) یک واحد اضافه و از تعداد نوترون‌های آن (عدد نوترونی) یکی کم می‌شود؛ در نتیجه عدد جرمی که مجموع عدد اتمی و عدد نوترونی است، تغییری نمی‌کند؛ یعنی:

$$\left.\begin{matrix} Z' = Z+1 \\ N' = N-1 \end{matrix}\right\} \Rightarrow A' = A$$

واکنش کلی پرتوزایی $\beta^-$ به این صورت است:

**پرتوزایی $\beta^-$:** $${}_{Z}^{A}X_N \rightarrow {}_{-1}^{0}e^- + {}_{Z+1}^{A}Y_{N-1}$$

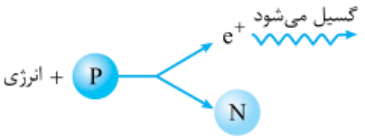
برای نمونه لوتتیوم ${}_{71}^{176}Lu$ (هستهٔ مادر) با گسیل بتای منفی به هافنیوم ${}_{72}^{176}Hf$ (هستهٔ دختر) تبدیل می‌شود:

$${}_{71}^{176}Lu \rightarrow {}_{72}^{176}Hf + {}_{-1}^{0}e^-$$

**۲- واپاشی $\beta^+$ (بتای مثبت):** نوع دیگر واپاشی β، گسیل بتای مثبت $(\beta^+)$ یا «پوزیترون» است. **پوزیترون ذره‌ای است که جرم آن با جرم الکترون برابر است اما بار آن e+ است $({}_{1}^{0}e^+)$.**

برای واپاشی با گسیل پوزیترون، ابتدا یک پروتون به یک نوترون و یک پوزیترون تبدیل می‌شود و سپس پوزیترون ایجادشده گسیل می‌شود:

$${}_{1}^{1}P \rightarrow {}_{1}^{0}e^+ + {}_{0}^{1}N$$




در طی این پرتوزایی، از تعداد پروتون‌های هسته (عدد اتمی)، یک واحد کاسته می‌شود و به تعداد نوترون‌های آن (عدد نوترونی)، یک واحد اضافه می‌شود اما باز در مجموع عدد جرمی تغییری نمی‌کند؛ یعنی:

$$\left.\begin{matrix} Z' = Z-1 \\ N' = N+1 \end{matrix}\right\} \Rightarrow A' = A$$

واکنش کلی پرتوزایی $\beta^+$ به این صورت است:

**پرتوزایی $\beta^+$:** $${}_{Z}^{A}X_N \rightarrow {}_{1}^{0}e^+ + {}_{Z-1}^{A}Y_{N+1}$$

به عنوان نمونه، یکی از ایزوتوپ‌های اکسیژن با نماد ${}_{8}^{15}O$ (هستهٔ مادر) با گسیل یک پوزیترون، به یکی از ایزوتوپ‌های نیتروژن ${}_{7}^{15}N$ (هستهٔ دختر) تبدیل می‌شود:

$${}_{8}^{15}O \rightarrow {}_{1}^{0}e^+ + {}_{7}^{15}N$$

### پ) واپاشی با گسیل پرتو $\gamma$

در واپاشی گاما، هسته‌های برانگیخته با گسیل فوتون‌های پرانرژی که در محدودهٔ گاما قرار می‌گیرند به حالت پایه برمی‌گردند. بدیهی است که چون در این واپاشی فقط انرژی گسیل می‌شود، عدد اتمی و عدد جرمی تغییری نمی‌کند. شکل کلی واپاشی گاما به صورت زیر است:

پرتوزایی $\gamma$: $\quad {}^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma$

**نکته** همان‌طور که در هر سه نوع واپاشی ملاحظه می‌کنیم، تعداد نوکلئون‌ها قبل و بعد از پرتوزایی تغییری نمی‌کند.

**مثال** **واکنش‌های واپاشی زیر را کامل کنید. (به جای هسته دختر از نماد X استفاده کنید)**

الف) ${}^{231}_{91}Pa \rightarrow {}^{4}_{2}He + \cdots$

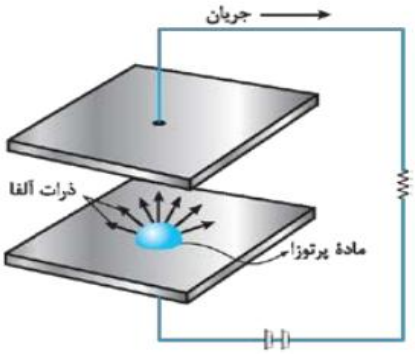
ب) ${}^{32}_{15}P \rightarrow e^{-} + \cdots$

پ) ${}^{99}_{43}T^{*} \rightarrow {}^{99}_{43}T + \cdots$

ت) ${}^{27}_{14}Si \rightarrow {}^{27}_{13}Al + \cdots$

## آشکارساز دود، کاربردی آشنا از پرتوزایی

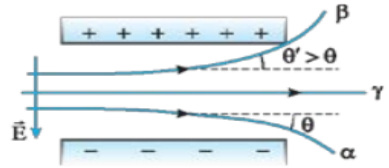
حتماً در بسیاری از ساختمان‌های مسکونی و تجاری، وسیله‌هایی شبیه شکل روبه‌رو را دیده‌اید که روی سقف نصب شده‌اند. این وسیله آشکارساز دود است و برای هشدار آتش‌سوزی به کار می‌رود.



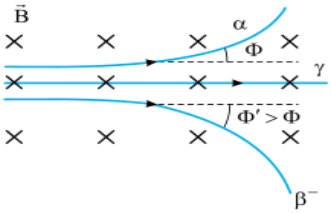

آشکارساز دود، مانند آن‌چه که در شکل روبه‌رو می‌بینید، از دو صفحهٔ رسانای فلزی تشکیل شده است که حدوداً یک سانتی‌متر از هم فاصله دارند و به دو پایانه وصل شده است. در نتیجه یکی از صفحات مثبت و صفحهٔ دیگر منفی است. بر روی یکی از صفحات مقداری از ماده پرتوزایی که ذرات $\alpha$ گسیل می‌کند، قرار دارد. گسیل ذرات آلفا باعث یونیده‌شدن مولکول‌های هوا می‌شود. در این صورت، یون‌های مثبت به سمت صفحهٔ منفی و یون‌های منفی به سمت صفحه مثبت حرکت کرده و جریان الکتریکی در مدار برقرار می‌شود. اگر دود به فضای بین دو صفحه نفوذ کند، یون‌های ایجادشده ضمن برخورد با ذرات دود خنثی شده و جریان گذرنده از بین صفحات کاهش می‌یابد و در نهایت این اُفت جریان باعث فعال‌شدن هشداردهنده می‌شود.

## پرتوهای $\alpha$، $\beta$ و $\gamma$ در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی

پرتوهای گاما دارای بار الکتریکی نیستند؛ بنابراین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر پرتو گاما تأثیری ندارند و آن را منحرف نمی‌کند.
اما این میدان‌ها به ذرات $\alpha$ و $\beta$ (که باردار هستند) نیرو وارد کرده و آن‌ها را منحرف می‌کنند. البته ذرات $\alpha$ با آن‌که نسبت به ذرات $\beta$ بار بیشتری دارند اما به علت جرم زیادشان کم‌تر منحرف می‌شوند.




در میدان الکتریکی، ذرات $\alpha$ که بار مثبت دارند در جهت میدان و ذرات $\beta^{-}$ که بار منفی دارند در خلاف جهت میدان منحرف می‌شوند.




در میدان‌های مغناطیسی نیز با استفاده از قاعدهٔ دست راست، می‌توانیم جهت انحراف پرتوهای $\alpha$ و $\beta$ را به دست آوریم.

**نکته** از نحوهٔ انحراف پرتوها در میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی، می‌توانیم برای شناسایی این پرتوها استفاده کنیم.

## مقایسهٔ قدرت نفوذ پرتوهای $\alpha$، $\beta$ و $\gamma$

حالا می‌خواهیم بدانیم که کدام‌یک از پرتوهای $\alpha$، $\beta$ و $\gamma$، بیشتر در مواد نفوذ می‌کنند.

۱ **پرتوهای گاما ($\gamma$)**: قابلیت گذر از ورقهٔ سربی به ضخامت حدود ۱۰۰ میلی‌متر را دارند.

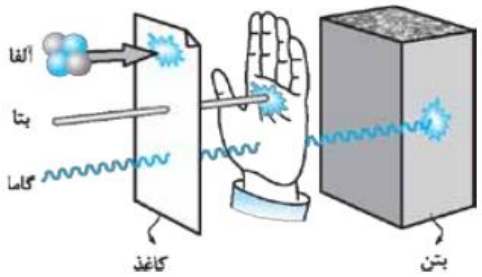
۲ **پرتوهای بتا ($\beta$)**: قابلیت گذر از ورقهٔ سربی به ضخامت ۰/۱ میلی‌متر را دارند.

۳ **پرتوهای آلفا ($\alpha$)**: با یک ورقه سربی به ضخامت ۰/۰۱ میلی‌متر می‌توان آن‌ها را متوقف کرد.

پس از نظر قدرت نفوذ در اجسام دیگر، برای این سه پرتو داریم:

قدرت نفوذ $\alpha$ < قدرت نفوذ $\beta$ < قدرت نفوذ $\gamma$

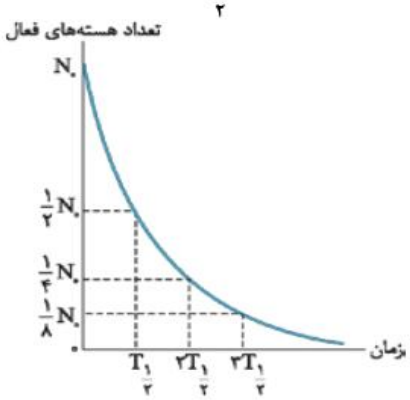
شکل روبه‌رو قدرت نفوذ این پرتوها را به خوبی نشان می‌دهد:



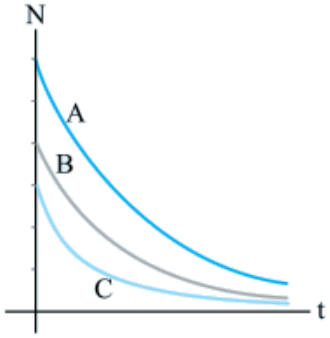

## نیمه‌عمر مادهٔ پرتوزا

**به مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا تعداد هسته‌های مادر پرتوزا در یک نمونه به نصف برسد، نیمه‌عمر آن مادهٔ پرتوزا می‌گوییم و آن را با $T_{\frac{1}{2}}$ نشان می‌دهیم.** برای مثال، اگر در ابتدا ۱ kg از ماده‌ای پرتوزا داشته باشیم، بعد از گذشت یک نیمه‌عمر، ۰/۵ kg از آن باقی‌مانده است و بقیه واپاشیده شده است؛ پس هر چه ماده‌ای سریع‌تر واپاشیده شود، نیمه‌عمر کوتاه‌تری دارد.

نمودار تعداد (یا جرم) هسته‌های فعال برحسب زمان به صورت روبه‌رو است:




**مثال** **نمودار تعداد هسته‌های فعال برحسب زمان برای سه هستهٔ پرتوزا مطابق شکل است. نیمه‌عمر این سه ماده را با هم مقایسه کنید.**




فرض کنید نمونه‌ای از یک ماده پرتوزای مادر که شامل $N_0$ هسته است را در اختیار داریم. اگر بخواهیم پس از مدت‌زمان t، تعداد هسته‌های پرتوزای فعال باقی‌مانده را به دست آوریم، از رابطهٔ زیر استفاده می‌کنیم:

$$N = \frac{N_0}{2^n}$$

که در آن $n = \frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$ است.

**مثال** نیمه‌عمر یک عنصر پرتوزا ۵ روز است. در مدت ۲۰ روز چه کسری از هسته‌های اولیهٔ آن باقی می‌ماند؟

**مثال** نمودار روبه‌رو تعداد هسته‌های فعال باقی‌مانده برحسب زمان را برای بیسموت ($^{۲۱۲}_{۸۳}Bi$) نشان می‌دهد. نیمه‌عمر بیسموت چند ساعت است؟ *(نهایی ریاضی ـ خرداد ۹۲)*