آشنایی با فیزیک هسته‌ای

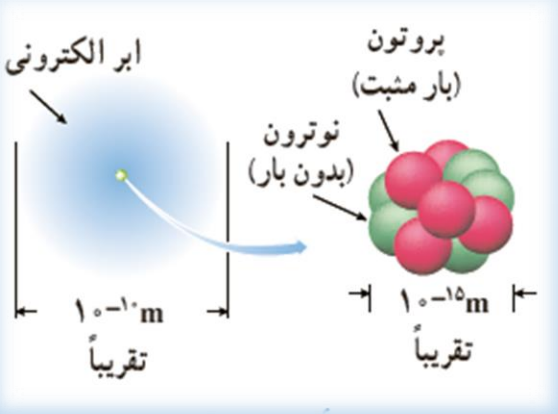
فصل ششم - رشتهٔ ریاضی

مهندس رضا صادق نژاد

ساختار هسته

می‌دانیم که هستهٔ اتم از پروتون و نوترون تشکیل شده است. همچنین بیشتر جرم اتم را هسته تشکیل داده است. (آزمایش رادفورد)

$$\text{جرم اتم} = \text{جرم هسته} + \text{جرم الکترون} \xrightarrow{\text{جرم الکترون در قبال هسته بسیار ناچیز است.}} \text{جرم هسته} \approx \text{جرم اتم}$$



قطر هسته تقریبا $\frac{1}{100000}$ برابر قطر اتم می‌باشد. چگالی هسته نیز حدود $10^{14}\ gr/cm^3$ است.

همانطور که گفتیم هسته از نوترون و پروتون تشکیل شده است. به نوترون و پروتون، **نوکلئون** نیز گفته می‌شود. نوترون‌ها ذراتی خنثی هستند و بار الکتریکی ندارند. اما پروتون‌ها دارای بار الکتریکی $+1.6 \times 10^{-19}\ C$ می‌باشند.

هسته
- نوترون ← خنثی
- پروتون ← $+1.6 \times 10^{-19}\ C$

مجموع پروتون‌ها × بار پروتون = بار کلی هسته

09118389989
مهندس صادق نژاد

نکته : یکی دیگر از یکاهای سنجش جرم پروتون و نوترون و هسته، **یکای جرم اتمی** می‌باشد. یکای جرم اتمی را با amu نشان می‌دهیم.

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

$$1amu = 1.66 \times 10^{-27}\ Kg$$

نکته: یکی دیگر از یکاهای سنجش بار الکتریکی علاوه بر کولن، **الکترون!** می‌باشد. هر یک الکترون معادل $+1.6 \times 10^{-19}\ C$ می‌باشد. برای مثال بار الکتریکی پروتون $+1e$ است.

توجه!

عدد اتمی (Z) : به تعداد پروتون‌های یک هسته، عدد اتمی می‌گوییم و آن را با Z نشان می‌دهیم.

عدد نوترونی (N) : تعداد نوترون‌های یک هسته را عدد نوترونی می‌گوییم و آن را با N نشان می‌دهیم.

عدد جرمی (A) : به مجموع تعداد نوترون‌ها و پروتون‌های یک اتم، عدد جرمی می‌گوییم.

$$A = Z + N$$

برای یک عنصر با نماد شیمیایی X ، نماد هسته به‌صورت روبرو بیان می‌شود:

$$\overset{\text{عدد جرمی}}{A}_{\text{عدد اتمی}}\ X^{\text{نماد عنصر}}_{\text{عدد نوترونی}} \quad (Z,\ N)$$

مهندس صادق نژاد

ایزوتوپ : ویژگی های هسته را تعداد پروتون ها و نوترون های آن تعیین می کند. خواص شیمیایی هر اتم را تعداد پروتون های هسته(عدد اتمی Z) تعیین می کند. به همین سبب هسته هایی که تعداد پروتون مساوی ولی تعداد نوترون متفاوت دارند خواص شیمیایی یکسانی دارند، در نتیجه این هسته ها در جدول تناوبی عناصر هم مکان هستند و بنابراین **ایزوتوپ (هم مکان)** نامیده می شوند.

به طور مثال، کربن به دو صورت پایدار و با درصدهای فراوانی بسیار متفاوتی در طبیعت یافت می شود که یکی از ۶ پروتون و ۶ نوترون ($^{12}_{6}C$)، و دیگری از آنها از ۶ پروتون و ۷ نوترون ($^{13}_{6}C$) تشکیل شده است. این دو هسته، ایزوتوپ های کربن هستند. جرم های اتمی درج شده در جدول تناوبی عناصر، میانگین جرم های اتمی ایزوتوپ های مختلف هر عنصر است که با توجه به درصد فراوانی آنها حساب شده اند. به جز هیدروژن، ایزوتوپ های مختلف یک هسته را با نام همان هسته مشخص می کنند.

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

نیروی‌های درون هسته

هسته دارای جرم زیاد وحجم کم است. یعنی نوکلئون‌های بشدت به‌یکدیگر چسبیده‌اند. اما نیرویی که این نوکلئون‌ها را کنار یکدیگر نگاه داشته چیست؟

طبق فیزیک اتمی این نیرو یا گرانشی است یا الکتریکی (کولنی). اما نیروی گرانشی طبق فرمول $(F = \frac{Gm_1m_2}{r^2})$ بدست می‌آید بدلیل اینکه جرم و ثابت گرانش خیلی کم است مقدار اندکی دارد. بنابراین نمی‌تواند نوکلئون‌ها را کنار یکدیگر نگاه دارد. از طرفی نیرویی الکتریکی طبق رابطه $(F = K\frac{q_1q_2}{r^2})$ بدست می‌آید، مقدار قابل توجهی دارد، اما توجه کنید که این نیرو فقط بین پروتون‌ها، آن هم از نوع رانشی برقرار است زیرا نوترون‌ها از نظر بار الکتریکی خنثی هستند و نیرویی وارد نمی‌کنند. در نتیجه باید نیروی دیگری باشد که نوکلئون‌ها را کنار یکدیگر نگاه دارد. از نظر فیزیک نوین، این نیرو، نیروی هسته‌ای است.

۱) این نیرو بین تمام نوکلئون‌ها (پروتون و نوترون)برقرار است.
۲) بر نیروی دافعهٔ ببین پروتون‌ها غلبه کرده و آن‌ها را کنار یکدیگر نگاه می‌دارد.
۳) و از همه مهم‌تر نیروی جاذبه است.

۲ نکته:

۱) نیروی هسته‌ای بین تمام نوترون‌ها و پروتون‌ها برقرار است.
۲) نیروی هسته‌ای کوتاه‌برد است.

تجربی ۸۷ : در اندرکنش نوکلئون‌ها، نیروی هسته‌ای در مقایسه با نیروی کولنی چگونه است

۱) ضعیف، بلندبرد ۲) قوی، بلندبرد ۳)ضعیف، کوتاه‌برد ۴) قوی، کوتاه‌برد

نیروی هسته‌ای در قبال کولنی بسیار قوی اما کوتاه‌برد می‌باشد.

پایداری هسته

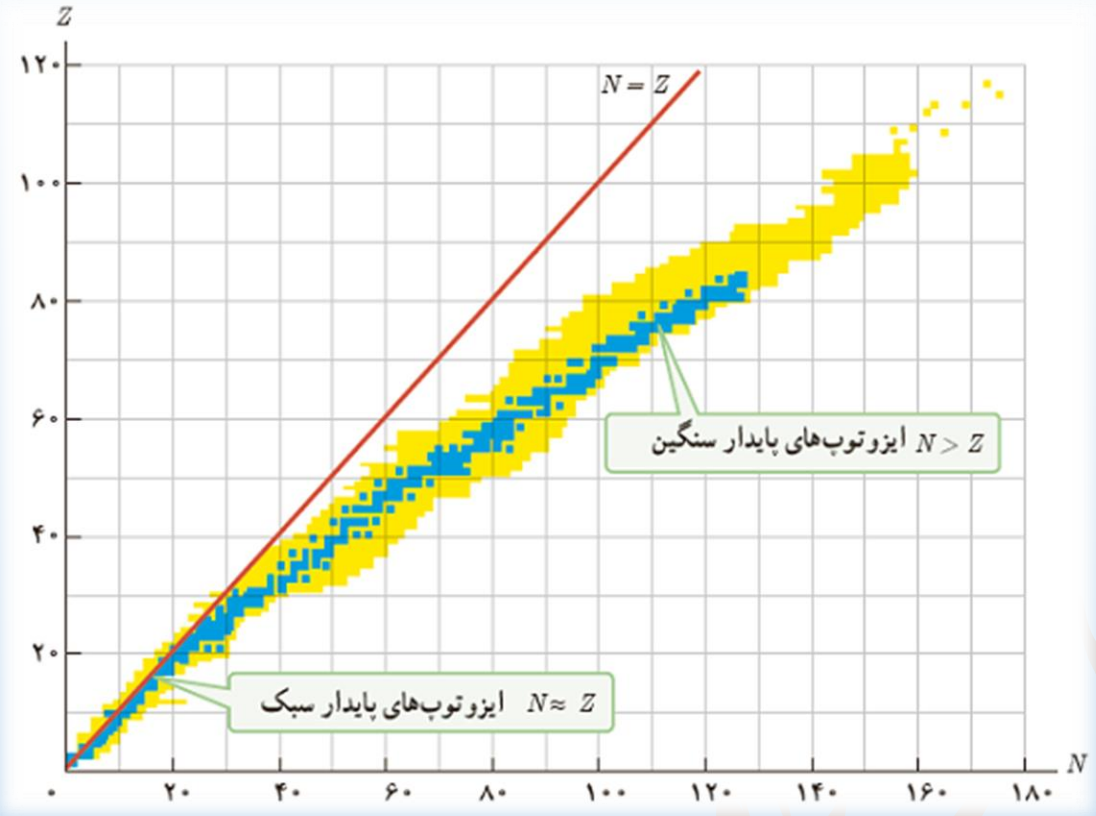
نیروی هسته‌ای کوتاه‌برد است. یعنی فقط به نوکلئون‌های اطراف خود وارد می‌شود. اما نیروی الکترواستاتیکی که بلندبرد است و بین پروتون‌ها دافعه ایجاد می‌کند، تمامی پروتون‌های درون هسته را درگیر می‌کند. بنابراین باید بین نیروی‌های الکترواستاتیکی و نیروی هسته‌ای توازن برقرار شود تا هسته پایدار بماند. اما مشکل از جایی شروع می‌شود که وقتی تعداد پروتون‌های یک هسته به اندازه‌ی مشخصی زیاد شود، برای پایدار ماندن باید تعداد نوترون‌های درون هسته نیز افزایش یابد تا با چسبیدن به پروتون‌ها آن‌ها را کنار یکدیگر نگاه دارد. اما افزایش تعداد نوترون‌ها هم حدی دارد و از جایی به بعد نیروی هسته‌ای دیگر توانایی کنار هم نگاه داشتن پروتون‌ها را ندارد و هسته نابود می‌شود.

هستهٔ پایدار با بیشترین پروتون $(Z = 83)$ مربوط به $^{209}_{83}Bi$ می‌باشد. هسته‌هایی با عدد اتمی بزرگتر از این به‌جز دو مورد استثنا (توریم و اورانیم)، در طبیعت یافت نمی‌شوند و به محض تشکیل نابود می‌شوند.

$^{238}_{92}U$ $^{232}_{90}Th$

نکته: در هسته‌های سنگین نسبت $\frac{N}{Z}$ تقریبا برابر ۱,۵، در هستهٔ‌های نیمه سنگین تقریبا ۱,۳، و در هستهٔ‌های سبک حدود ۱ می‌باشد.

نمودار تغییرات Z بر حسب N. برای هسته های پایدار و پرتوزا. هر نقطهٔ آبی رنگ نشان دهندهٔ یک هستهٔ پایدار است. نقاط زرد رنگ هسته های پرتوزای شناخته شده را نشان می دهند.



ریاضی ۸۸ : در هستهٔ اتم عناصر طبیعی، تعداد پروتون‌های هسته را با Z و تعداد نوترون‌ها را با N نشان می‌دهیم. اگر از سبک‌ترین اتم‌ها به سمت سنگین‌ترین آن‌ها برویم، نسبت $\frac{N}{Z}$ چگونه تغییر می‌کند؟

۱) کاهش می‌یابد. ۲) افزایش می‌یابد. ۳) ثابت می‌ماند. ۴) با نظم معینی کم یا زیاد می‌شود.

با توجه به شکل بالا می‌بینیم که با رفتن به سمت راست محور نسبت $\frac{N}{Z}$ افزایش می‌یابد.

انرژی بستگی هسته‌ای و ترازهای انرژی هسته

اگر جرم یک هسته را از ما بخواهند می‌گوییم جرم مجموع نوترون‌ها و پروتون‌ها.

اما در عمل اینگونه نیست. یعنی جرم واقعی هستهٔ اتم مقداری کم‌تر از جرم تئوری آن می‌باشد!!! اما دلیل این اتفاق چیست؟

به این اختلاف جرم هستهٔ اتم **کاستی جرم** می‌گویند. اما دلیل این اتفاق از آن‌جا ناشی می‌شود که هنگام تشکیل هسته مقداری انرژی آزاد می‌شود و سطح انرژی نوکلئون‌ها کم می‌شود. این انرژی آزاد شده باعث پایداری هسته می‌شود. از آنجایی که طبق گفتهٔ اینشتین جرم و انرژی با هم رابطهٔ مستقیم دارند در می‌یابیم که این کاستی جرم در واقع به‌دلیل آزاد شدن انرژی موقع تشکیل هسته است.

اگر در فرمول مقابل مقدار کاستی جرم هسته اتم (Δm) را قرار دهیم، **انرژی بستگی** هسته بدست می‌آید. این انرژی همان انرژی آزاد شده در هنگام تشکیل هستهٔ اتم می‌باشد.

$$E = mc^2$$

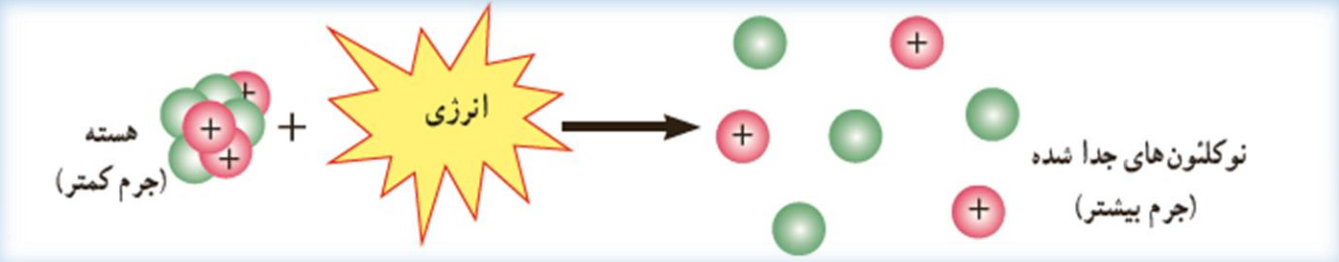
$$B = \Delta mc^2$$

نکته:

۱) هرچقدر جرم کاستی هسته بیشتر باشد و B بیشتری آزاد شود، هسته پایدارتر می‌شود.

۲) به‌هم پیوستن نوکلئون‌ها و تشکیل هسته جدید را واکنش **هم‌جوشی** می‌گویند.

۳) برای جدا کردن نوکلئون‌های یک هسته باید به میزان انرژی بستگی هسته، انرژی صرف کرد. در واقع این عمل عکس فرآیند هم‌جوشی است و انرژی به جرم تبدیل می‌شود. در نتیجه جرم ن.کلئون‌های آزاد شده بیشتر از جرم هسته اولیه می‌باشد.



نوکلئون‌ها نیز مانند الکترون‌ها که در ترازهای مشخصی درون اتم قرار قرار داشتند و انرژیشان کوآنتیده بود دارای انرژی کوآنتیده هستند و در ترازهای مانا و کوانتومی قرار دارند. بنابراین یک نوکلئون نمی‌تواند هر انرژی دلخواهی را دریافت یا تابش کند. یک نوکلئون نیز مانند الکترون می‌تواند با گرفتن فوتون مناسب برانگیخته شود و به تراز بالاتر برود و همان نوکلئون برانگیخته می‌تواند با ازدست دادن فوتون به تراز پایین‌تر بازگردد.

$$ {}^{A}_{Z}X + \text{فوتون} = {}^{A}_{Z}X^{*} $$

ترازهای انرژی در هسته بسیار پرانرژی‌تر از ترازهای انرژی در اتم می‌باشند. در نتیجه اختلاف انرژی نوکلئون‌ها هم بسیار زیاد است و از مرتبه KeV و MeV هستند. در حالی که اختلاف انرژی الکترون‌ها از مرتبه eV می‌باشد.

نکته:

از آنجایی که در واکنش‌های شیمیایی الکترون‌ها نقش اصلی را ایفا می‌کنند و با توجه با آنچه که گفتیم انرژی الکترون‌ها در حد است، در نتیجه در واکنش‌های شیمیایی انرژی حاصله نمی‌تواند هسته را برانگیخته کند.

تجربی ۹۱ خارج : در یک هسته پایدار جرم نوکلئون‌های تشکیل دهنده هسته:

۱) مساوی جرم هسته است.

۲) مساوی جرم تبدیل‌شده به انرژی بستگی هسته است.

۳) بزرگتر از جرم هسته است.

۴) کوچکتر از جرم تبدیل‌شده به انرژی بستگی هسته‌ای است.

گزینه ۳

ریاضی ۸۸ : هرچه مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های هستهٔ اتم از جرم آن هسته بیشتر باشد، انرژی بستگی هسته.....است و آن هسته..... است.

۱) کم‌تر–پایدارتر

۲) بیشتر–پایدارتر

۳) کم‌تر–ناپایدارتر

۴) بیشتر–ناپایدارتر

گزینه ۲

ریاضی ۹۳ : در یک واکنش هسته‌ای، $2mg$ جرم تبدیل به انرژی شده است. انرژی حاصل، معادل با چند کیلووات ساعت است؟ $(c = 3 \times 10^8\ {}^{m}/_{s})$

۱) 2.5×10^4

۲) 2.5×10^9

۳) 5×10^4

۴) 5×10^9

$E = mc^2 \Rightarrow E = 2 \times 10^{-6} \times 9 \times 10^{16} = 18 \times 10^{10} J$

نکته $\frac{j}{s} = W$

$$18 \times 10^{10} J \times \frac{1}{3600} \times 10^{-3} = 5 \times 10^4\ KWh$$

ریاضی ۹۳ خارج: اگر در یک واکنش هسته‌ای یک گرم جرم تبدیل به انرژی شود، انرژی حاصل چه جرمی از ماده را می‌تواند صد متر از سطح زمین بالا ببرد؟

۱) ۹۰ میلیون تن ۲) ۹۰ تن ۳) ۴۵۰ میلیون گرم ۴) ۴۵۰ کیلوگرم

$E = mc^2 \Rightarrow E = 10^{-3} \times 9 \times 10^{16} = 9 \times 10^{13}\ j$

$E = mgh \Rightarrow 9 \times 10^{13} = m \times 10 \times 100 \Rightarrow m = 9 \times 10^{10}\ kg = 9 \times 10^{10}\ ton$

پرتوزایی طبیعی (رادیواکتیویته)

هسته های ناپایدار برای اینک پایدار شوند، بصورت خودبخودی و بدون دخالت خارجی با با تابش ذرات و پرتوهایی به پایداری می‌رسند. به این ویژگی برخی هسته‌ها که به اصطلاح واپاشی می‌شوند، **پرتوزایی طبیعی (رادیواکتیویته)**، و به این نوع هسته‌ها، هسته‌های **پرتوزا** می‌گویند.

نکته: در پرتوزایی سه نوع پرتو تابش می‌شود:

۱) پرتوی آلفا (α) : کم‌ترین نفوذ را دارند و با برخورد به ورقه نازک سرب با ضخامت $0.01mm$ متوقف می‌شوند.

۲) پرتوی بتا (β) : نسبت به ذرات آلفا نفوذپذیری بیشتری دارند و و تا حدود $0.1mm$ در سرب نفوذ می‌کنند.

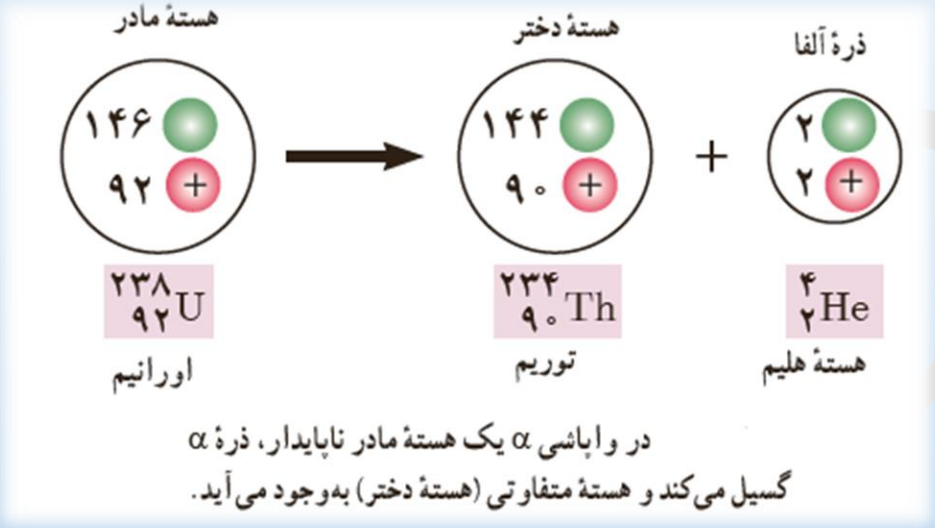
۳) پرتوی گاما (γ) : بیشترین نفوذ را دارد و می‌تواند از ورقه سربی با ضخامت $100mm$ عبور کند.

نکته: در تمام فرایندهای واپاشی پرتوزا مشاهده شده است که تعداد نوکلئون ها در طی فرایند واپاشی هسته ای پایسته است؛ یعنی تعداد نوکلئون ها، پیش از فرایند با تعداد نوکلئون ها پس از فرایند مساوی است.

واپاشی (α) : هستهٔ‌های سنگین و ناپایدار با تابش ذرات آلفا خود را سبک می‌کنند. با تابش هر ذرهٔ آلفا دو نوترون و دو پروتون از نوکلئون‌های هسته کاسته می‌شود.

توجه: ذرات آلفا در واقع همان هسته هلیم یا $_2^4He^{+2}$ میباشند.

$$_Z^A X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4} Y + {}_2^4 He \qquad (\text{واپاشی } \alpha)$$



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

نکته: به هستهٔ پرتوزای اولیه، هستهٔ مادر و به هستهٔ جدیدف هستهٔ دختر می‌گوییم.
برای مثال در شکل مقابل تابش پرتوی آلفا توسط هستهٔ مادر اورانیم و بوجود آمدن هستهٔ دختر نشان داده شده است.

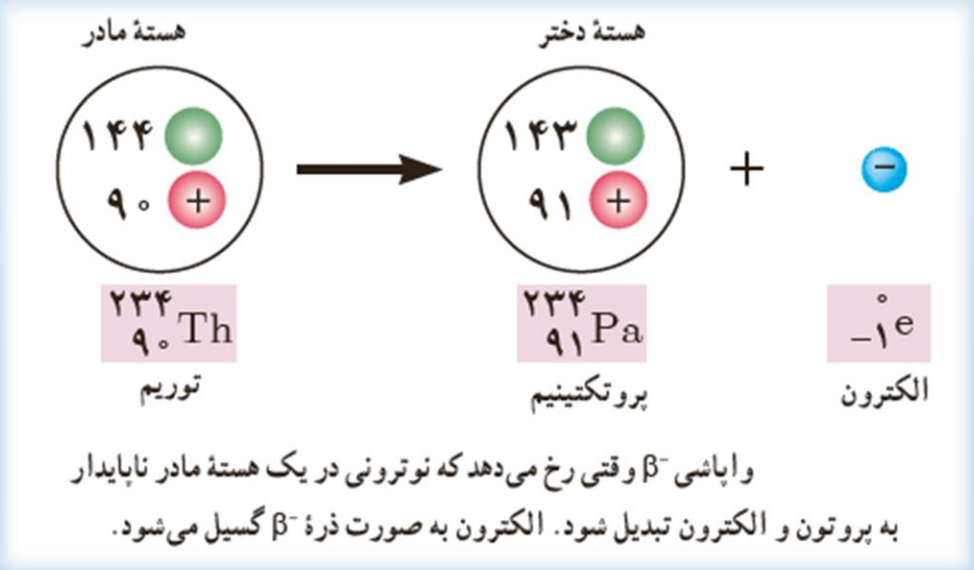
ذره های آلفا، سنگین اند و بار مثبت دارند. بُرد این ذره ها کوتاه است. این ذرات پس از طی مسافت کوتاهی در هوا (۱ تا ۲ سانتی متر) و یا با عبور از لایه ای نازک از مواد جذب می شوند.
اگر این ذره ها از راه تنفس یا دستگاه گوارش وارد بدن شوند، باعث آسیب شدید به بافت های بدن می شوند. بنابراین، باید مراقب بود که مواد آلفازا هرگز وارد بدن نشوند.

واپاشی (β) : این واپاشی، متداول ترین نوع واپاشی در هسته هاست و ذرات گسیل شد در این واپاشی را ذرات بتا می نامند. بررسی ها نشان می‌دهد که این ذرات الکترون اند و به همین دلیل این واپاشی را واپاشی β^- نامیدند. الکترون گسیل شده در این واپاشی، در هسته مادر وجود ندارد و همچنین یکی از الکترون های مداری اتم نیست؛ این الکترون وقتی به وجود می آید که **نوترونی درون هسته، به پروتون و الکترون تبدیل شود.**

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

توجه: توجه کنید که برای تابش ذرات β^- ، باید یک نوترون به پروتون و الکترون تبدیل شود. بنابراین نتیجه می‌گیریم که در این فرآیند عدد جرمی ثابت می‌ماند (درست است یک نوترون از بین رفته اما در عوض باعث بوجود آمدن یک پروتون شده است) و عدد اتمی یکی زیاد می‌شود. از متن بالا می‌شود اینطور برداشت کرد که عدد اتمی هستهٔ دختر یکی بیشتر از هستهٔ مادر است و در نتیجه یک خانه جلوتر قرار می‌گیرد.

شکل سمت راست مثالی از واپاشی پرتوی بتا در اتم توریم را نشان می‌دهد.



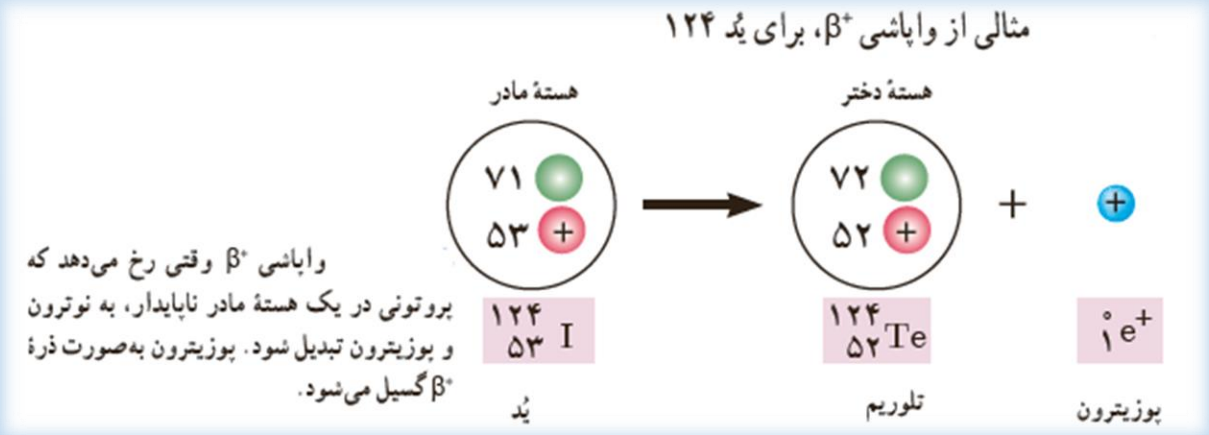
واپاشی β^- وقتی رخ می‌دهد که نوترونی در یک هستهٔ مادر ناپایدار به پروتون و الکترون تبدیل شود. الکترون به صورت ذرهٔ β^- گسیل می‌شود.

در نوعی دیگر از فرایند واپاشی بتا، ذره گسیل شده توسط هسته، جرم یکسان با الکترون دارد، ولی به جای بار $-e$ حامل بار $+e$ است. به این الکترون مثبت، **پوزیترون** می گویند و با β^+ یا e^+ نمایش داده می شود. در واقع آنچه در این واپاشی رخ می دهد این است که یکی از **پروتون های درون هسته به یک نوترون و یک پوزیترون** تبدیل می شود و سپس این پوزیترون از هسته گسیل می شود.

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

توجه: توجه کنید که برای تابش ذرات β^+ ، باید یک پروتون به نوترون و پوزیترون تبدیل شود. بنابراین نتیجه می‌گیریم که در این فرآیند عدد جرمی ثابت می‌ماند (درست است یک پروتون از بین رفته اما در عوض باعث بوجود آمدن یک نوترون شده است) و عدد اتمی یکی کم می‌شود. از متن بالا می‌شود اینطور برداشت کرد که عدد اتمی هستهٔ دختر یکی کم‌تر از هستهٔ مادر است و در نتیجه یک خانه عقب‌تر قرار می‌گیرد.

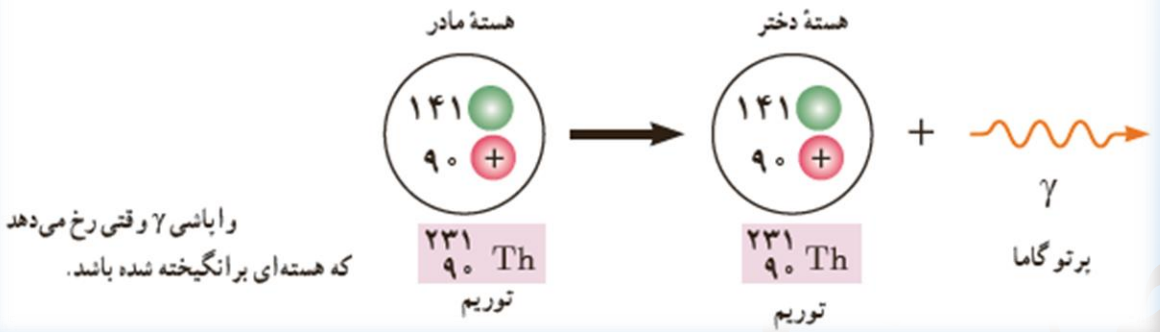
شکل سمت راست مثالی از واپاشی پرتوی بتا در اتم توریم را نشان می‌دهد.



واپاشی γ : اغلب هسته ها پس از واپاشی آلفا یا بتا، در حالت برانگیخته قرار می گیرند و با گسیل فوتون های پر انرژی (پرتو گاما) به حالت پایه می‌رسند. توجه کنید که در این فرآیند A و Z تغییر نمی‌کنند.

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

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



پرتوهای گاما از جنس امواج الکترومغناطیسی هستند. اگر یک نوکلئون برانگیخته شود، با تابش یک فوتون گاما به حالت پایه باز می‌گردد.
توجه داشته باشید که اغلب هستهٔ‌های دختر پس از تولد در وضعیت برانگیخته هستند و با تابش فوتون‌های گاما به حالت پایه می‌رسند.
یک هسته با تابش پرتوی گاما، چون عدد اتمی‌اش تغییر نمی‌کند، در جدول تناوبی جابجا نمی‌شود.

تجربی ۹۴ خارج : در واپاشی گامازا:

۱) تعداد نوکلئون‌ها ثابت می‌ماند.
۲) عدد اتمی یک واحد کاهش می‌یابد.
۳) عدد جرمی یک واحد کاهش می‌یابد.
۴) هسته از حالت پایه به حالت برانگیخته می‌رود.

گزینهٔ ۱

ریاضی ۹۴ : کدام‌یک از موارد زیر در مورد هستهٔ اتم‌های عناصر درست است؟

۱) اغلب ایزوتوپ‌های عناصر ناپایدارند و با گذشت زمان واپاشیده می‌شوند.
۲) برد نیروی‌های کولنی در مقایسه با نیروهای هسته‌ای بسیار کوتاه است.
۳) جرم یک هسته برابر مجموع جرم نوکلئون‌های تشکیل‌دهندهٔ آن هسته است.
۴) نسبت تعداد نوترون‌ها به پروتون‌ها برای هسته‌های پایدار مختلف یکسان است.

گزینهٔ ۱

ریاضی ۹۲ خارج: اورانیم $^{238}_{92}U$ با تابش یک پرتوی آلفا به کدام‌یک از عناصر زیر تبدیل می‌شود؟

۱) $^{234}_{91}Th$ ۲) $^{238}_{90}Th$ ۳) $^{234}_{90}Th$ ۴) $^{234}_{92}Th$

$$\begin{cases} 238 = A + 4 \rightarrow A = 234 \\ 92 = Z + 2 \rightarrow Z = 90 \end{cases} \Rightarrow {}^{234}_{90}X = {}^{234}_{90}Th$$

تجربی ۹۶: در فعل و انفعال هسته‌ای $^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{Z}_{A}X + 3({}^{1}_{0}n)$، برای عنصر X، تعداد نوترون‌ها و پروتون‌ها کدام است؟

۱) ۳۶،۵۸ ۲) ۳۶،۵۶ ۳) ۵۴،۹۴ ۴) ۵۴،۹۲

$$\begin{cases} 1 + 235 = 141 + A + 3 \times 1 \rightarrow A = 92 \\ 0 + 92 = 56 + Z + 3 \times 0 \rightarrow Z = 36 \end{cases} \Rightarrow N = A - Z = 237 - 93 = 56$$

ریاضی ۹۱: یک هسته آمرسیم (۲۴۱)، با تابش یک ذره آلفا، واپاشیده شده و یک ایزوتوپ نپتونیم طبق رابطهٔ $^{241}_{95}Am \rightarrow {}^{237}_{Z}Np + \alpha$ تبدیل می‌شود. تعداد نوترون‌های این ایزوتوپ نپتونیم چقدر است؟

۱) ۹۱ ۲) ۹۳ ۳) ۹۶ ۴) ۱۴۴

$$^{4}_{2}\alpha \Rightarrow Z + 2 = 95 \Rightarrow Z = 93$$

نیمه‌عمر

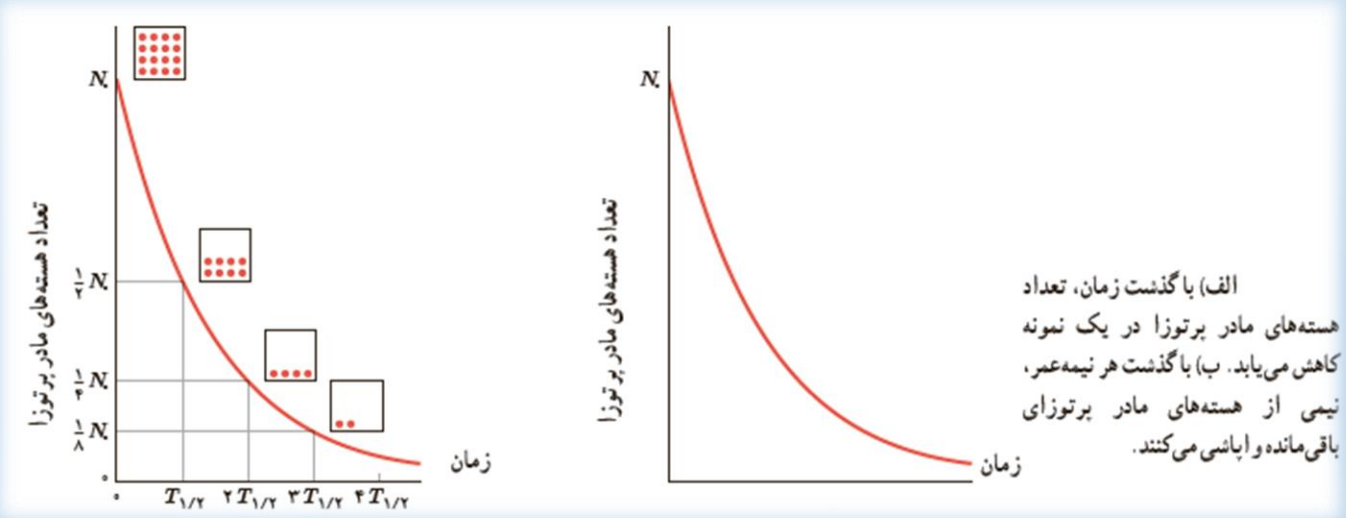
همانطور که گفتیم هستهٔ‌های ناپایدار به‌طور خودبخودی پرتوزایی می‌کند تا پایدار شود. طی این پرتوزایی هسته‌ها تغییر می‌کنند. حال به تعریف نیمه‌عمر می‌پردازیم.

نیمه‌عمر مدت زمانی است که تعداد هسته‌های مادر یک ماده پرتوزا نصف می‌شوند.

جمله بالا به معنی این است که در پایان زمانِ معیّنی، چه کسری از ماده پرتوزا وامی‌پاشد. برای مثال در مورد هسته های توریم ۹۰ پس از **زمان معیّنی** می توان گفت که چه کسری از آنها به رادیم ۸۸ تبدیل شده است.

نمودار زیر را در نظر بگیرید. در این نمودار ستون عمودی تعداد هستهٔ‌های فعال و ستون افقی زمان را نشان می‌دهد. با دقت در نمودار متوجه می‌شویم که در بازه‌های زمانی مشخصی($T_{\frac{1}{2}}$)، تعداد هستهٔ‌های فعال به نصف مقدار قبلی خود رسیده است. به این بازه‌های زمانی مساوی($T_{\frac{1}{2}}$) **نیمه‌عمر** می‌گوییم.

همانطور که از شکل نیز پیداست برای مثال تعداد دایره‌های درون جعبه پس از گذشت زمان $T_{\frac{1}{2}}$، به نصف می‌رسد. دقت کنید که چون این یک تصاعد هندسی است، بنابراین تعداد دایره‌ها هیچ‌وقت به صفر نمی‌رسد. بلکه فقط به صفر نزدیک می‌شود.



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.

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

$$N = N_0(\frac{1}{2})^n$$

$$n = \frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$$

n برابر تعداد نیمه‌عمرهای سپری‌شده است.

ریاضی ۹۵ : نیمه‌عمر یک ماده پرتوزا هشت روز است. پس از ۳۲روز، چند درصد از هسته‌های آن ماده دچار واپاشی می‌شوند؟

۱) ۶۴ ۲) ۷۵ ۳) ۸۲,۲۵ ۴) ۹۳,۷۵

$$n = \frac{t}{T_{\frac{1}{2}}} \Rightarrow n = \frac{32}{8} = 4$$

$$N = N_0(\frac{1}{2})^n \Rightarrow N = N_0(\frac{1}{2})^4 \Rightarrow N = \frac{N_0}{16} \Rightarrow$$

دقت کنید که در سوال درصد هسته‌های واپاشیده شده را خواسته است نه درصد هسته‌های باقی مانده.

درصد هسته‌های واپاشیده شده : $\frac{15}{16} = 0.9375 \times 100\% = 93.75\ \%$

ریاضی ۹۶ خارج: اگر ۸۷٫۵ درصد از تعداد هسته‌های یک مادهٔ رادیواکتیو در مدت ۲۴ ساعت واپاشیده شود، نیمه‌عمرآن چند ساعت است؟

۱) ۳ ۲) ۴ ۳) ۶ ۴) ۸

درصد هسته‌های باقی‌مانده : $100\% - 87.5\% = 12.5\% = \frac{12.5}{100} = \frac{1}{8}$

$N = N_0(\frac{1}{2})^n \Rightarrow N = N_0(\frac{1}{8}) \Rightarrow (\frac{1}{2})^n = \frac{1}{8} \Rightarrow n = 3$

$n = \frac{t}{T_{\frac{1}{2}}} \Rightarrow 3 = \frac{24}{T_{\frac{1}{2}}} \Rightarrow T_{\frac{1}{2}} = 8$

مهندس صادق نژاد

می‌دانیم که دلیل پایداری هسته، توازن میان نیروی هسته‌ای و نیروی دافعه کولنی بین پروتون‌ها است. یکی از هسته‌های که در این زمینه مورد توجه باشد $^{235}_{92}U$ ، است. اگر یک نوترون کند، با انرژی جنبشی‌ای در حدود $0.04\ eV$ ، به هسته $^{235}_{92}U$ برخورد کند، این توازن نیروها برهم می‌ریزد.

نوترون بدلیل خنثی بودن به‌راحتی جذب هسته شده و عدد جرمی $^{235}_{92}U$ یک عدد افزایش می‌یابد و تبدیل به **هستهٔ مرکب** $^{236}_{92}U$ می‌کند. وقتی این اتفاق می‌افتد هسته شروع به ارتعاش کرده و کش می‌آید. هرچقدر هسته بیشتر کش می‌آید تاثیر نیروهای کولنی بیشتر شده و پس از گذشتن از کشیدگی بحرانی، نیروهای هسته‌ای در مقابل نیروهای کولنی تسلیم می‌شوند و هسته اورانیم به دو هسته سبک‌تر شکافته می‌شود.

در طی این اتفاق سه نتیجه حاصل می‌شود:

۱) دو هسته سبک‌تر
۲) بین ۲ تا ۵ نوترون پرانرژی
۳) حدود $۲۰۰MeV$ انرژی (عمدهٔ این انرژی به‌صورت انرژی جنبشی نوترون‌ها و دو هستهٔ سبک‌تر است.)

یکی از معروف‌ترین واکنش‌های شکافت، واکنش زیر است:

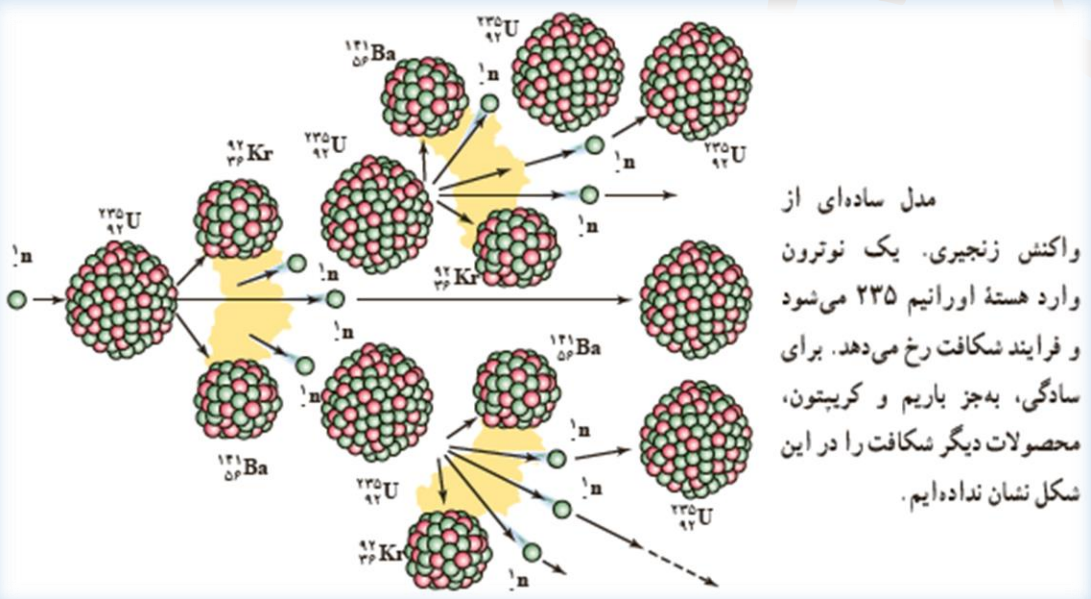
$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{236}_{92}U^{*} \rightarrow ^{141}_{56}Ba + ^{92}_{36}Kr + 3^{1}_{0}n$$

انرژی جنبشی این ذرات حدود ۲۰۰MeV است.

$^{236}_{92}U$ یک هسته مرکب است که در کمتر از 10^{-12}s وامی‌پاشد.

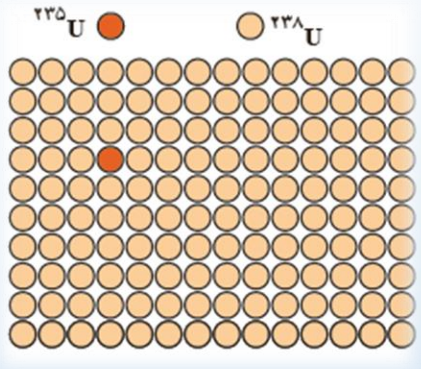
واکنش زنجیری شکافت

همان طور که دیدیم فرایند شکافت $^{235}_{92}U$ ، با جذب یک نوترون کُند آغازمی شود. اگر محصولات شکافت، باریم $^{141}_{56}Ba$ و کریپتون $^{92}_{36}Kr$ باشند، در این فرایند ۳ نوترون به وجود می آید. چون نوترون ها بار الکتریکی ندارند، هسته های دیگر آنها را دفع نمی کنند. نوترون ها پس از کُند شدن، توسط هسته های دیگر جذب می شوند و باعث شکافت در ۳ هسته اورانیم دیگر می شوند و ۹ نوترون آزاد می کنند. اگر هر یک از این نوترون ها نیز موفق به شکافت یک هسته اورانیم شود، ۲۷ نوترون آزاد می شود و به همین ترتیب تا آخر. این رشته واکنش را، **واکنش زنجیری** می نامند.



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.

اگر واکنش زنجیری به‌طور کامل رخ دهد، در مدت بسیار کوتاهی مقدار بسیار زیادی انرژی آزاد می‌شود. این آزاد شدن انرژی همان چیزی است که به آن **انفجار هسته‌ای** می‌گویند.



نکته: چرا در معادن اورانیم انفجار هسته‌ای رخ نمی‌دهد؟

در حدود ۹۲,۲۸ درصد سنگ اورانیم موجود در معادن $^{238}_{92}U$، و تنها ۰,۷۲ درصد $^{235}_{92}U$ می‌باشد. یعنی تقریبا از هر ۱۴۰ اتم اورانیم، ۱۳۹ اتم $^{238}_{92}U$ و تنها ۱ اتم $^{235}_{92}U$ است.

نکته‌ای که وجود دارد این است که $^{238}_{92}U$ با به دام انداختن یک نوترون کند تبدیل به $^{239}_{92}U$ می‌شود. اما هستهٔ $^{239}_{92}U$ مانند هستهٔ $^{236}_{92}U$ ناپایدار نیست و در کمتر از $10^{-12}s$ واپاشی نمی‌شود. به همین دلیل است که در سنگ معدن اورانیم و معادن اورانیم واکنش زنجیری و انفجار هسته‌ای رخ نمی‌دهد.

غنی‌سازی اورانیم

همان طور که اشاره کردیم، واکنش زنجیری در سنگ معدن اورانیم رخ نمی دهد. برای استفاده از اورانیم به عنوان سوخت در نیروگاه های هسته ای یا استفاده در انفجارهای هسته ای، باید فراوانی ایزوتوپ ۲۳۵ را در یک نمونه اورانیم، افزایش دهیم. **به فرایند افزایش درصد یا غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در یک نمونه، غنی سازی گفته می شود.** بیشتر راکتور های تجاری تولیدبرق، مانند راکتور نیروگاه هسته ای بوشهر، از اورانیمی استفاده می کنند که در آنها ایزوتوپ $^{235}_{92}U$ تا ۳ درصد غنی سازی شده است. همچنین در بیشتر راکتور های پژوهشی، مانند راکتور پژوهشی دانشگاه تهران، از سوختی استفاده می شود که ایزوتوپ $^{235}_{92}U$ تا ۲۰ درصد غنی سازی شده است.

نوترون های آزاد شده در فرایند شکافت ایزوتوپ $^{235}_{92}U$ ، انرژی جنبشی زیادی دارند (به طور متوسط حدود $2MeV$) و به نوترون های تُند معروف اند. این نوترون ها، با احتمال بسیار بیشتری جذب ایزوتوپ $^{238}_{92}U$ می شوند. تجربه نشان می دهد اگر بتوان نوترون های تند رابه نحوی کُند ساخت که انرژی جنبشی آنها به حدود $0.04eV$ یا کمتر از آن برسد، احتمال جذب آنها توسط ایزوتوپ های $^{235}_{92}U$ افزایش می یابد. این افزایش احتمال می تواند برای ایجاد واکنش زنجیری شکافت،کافی باشد.

موادی که می‌توانند به عنوان کندساز عمل کنند عبارتند از:

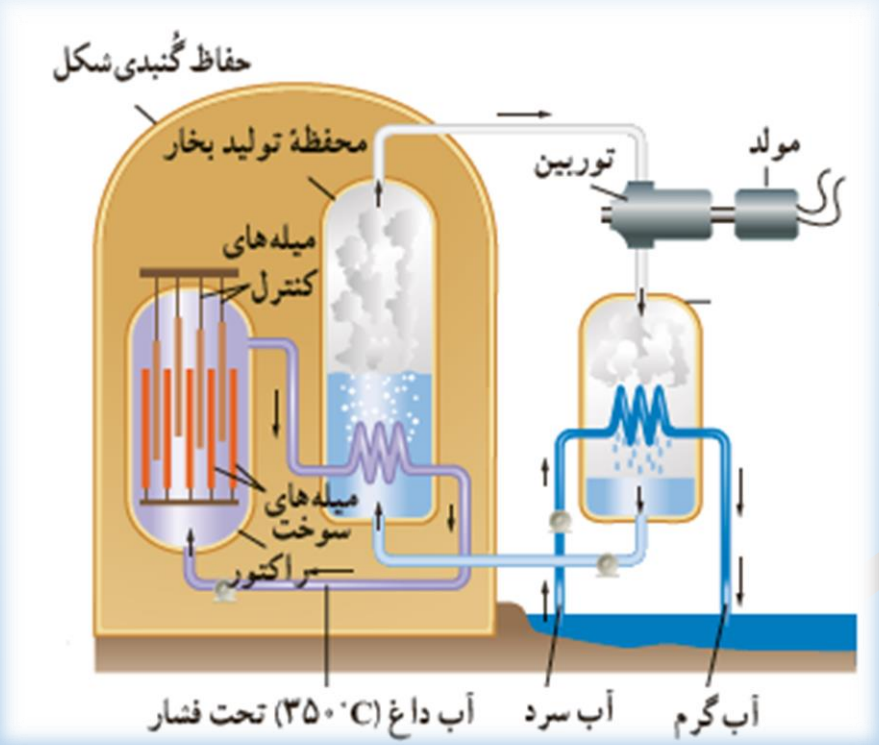
۱) آب معمولی (H_2O)
۲) آب سنگین (D_2O)
۳) گرافیت (اتم‌های کربن)

نکته: یکی از راه‌های کنترل افزایش بیش از حد نوترون‌های کند به منظور جلوگیری از رخ دادن انفجار هسته‌ای استفاده از میله‌های کنترل است. کادمیم و بور جذب‌کننده نوترون‌ها هستند. به همین منظور ترکیب آن‌ها را به‌صورت میله درآورده و در داخل راکتور کار می‌گذاریم. به این میله‌ها، **میله‌های کنترل** می‌گویند.

نکته: سوخته هسته‌ای یا همان اورانیم ۳ درصد غنی‌شده را به‌صورت میله‌هایی با قطر حدود $1\ cm$ درآورده، هزاران عدد از آن‌ها را در قلب راکتور قرار می‌دهیم.

PWR (راکتور آب تحت فشار)

نوعی از سامانه‌ها هستند که سوخت هسته‌ای توسط آبی با فشار بالا (حدود $150\ atm$) احاطه شده است. فشار بالای آب باعث می‌شود که نقطه‌جوش آن بالا رفته و دیرتر به‌جوش بیاید. در نتیجه گرمای بیشتری را از داخل راکتور دریافت کند. این آب پس از گرم شدن به اندازه‌ی کافی درون سیستم راکتور به گردش در می‌اید و گرمایش را به آبی دیگر با فشار پایین‌تر می‌دهد. آب کم‌فشار بدلیل نقطه‌جوش پایین‌تر تبدیل به بخار می‌شود و این بخار باعث به گردش درآمدن مولد توربین برق درون توربین می‌شود.



نکته: بعد از واکنش زنجیری از میله‌های سوخت ایزوتوپ‌های پرتوزای خطرناکی با نیمه‌عمر زیاد به‌وجود می‌آید که به زباله‌های هسته‌ای معروف‌اند.

مهندس صادق نژاد

گداخت (هم‌جوشی هسته‌ای)

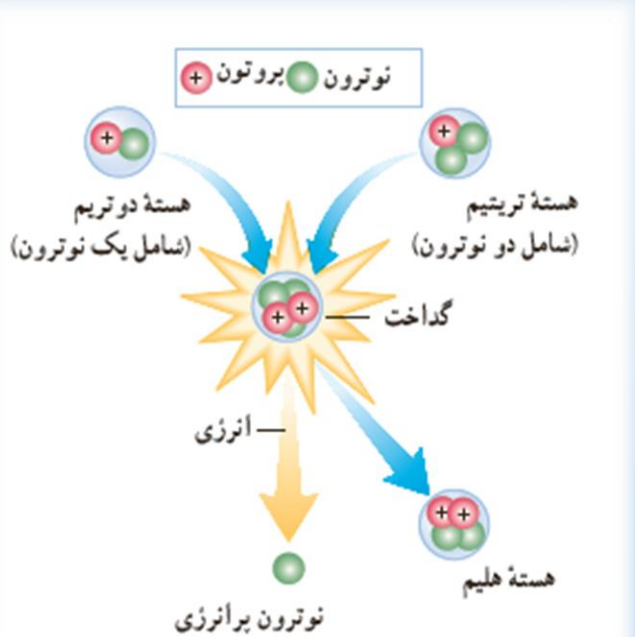
نوع دیگری از واکنش‌های هسته‌ای وجود دارند که به واکنش گداخت معروف‌اند. این نوع واکنش که منبع اصلی انرژی در ستاره‌ها و خورشید می‌باشد از به‌هم پیوستن دو هسته سبک‌تر و تشکیل یک هسته بزرگ‌تر به‌وجود می‌آید.

یکی از معروف‌ترین این واکنش‌ها ترکیب دو ایزوتوپ هیدروژن یعنی دوتریم و تریتیم با هم و تولید یک هسته هلیم (ذره α) و یک نوترون است.

$$^{2}_{1}D + ^{3}_{1}T \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n$$

در واکنش گداخت، مجموع جرم محصولات فرایند، کمتر از مجموع جرم هسته های اولیه است. در اینجا نیز این اختلاف جرم با توجه به رابطه $E = mc^2$ ، سبب آزاد شدن مقدار زیادی انرژی می شود.

نکته: یکی از مشکلات ایجاد فیرآیند و نیروگاه گداخت این است که دو هسته کم جرم باید به قدر کافی به هم نزدیک شوند تا نیروی کوتاه بُرد هسته ای بتواند آنها را کنار هم نگه دارد و واکنش گداخت انجام شود. ولی، هر هسته، بار مثبت دارد و هسته دیگر را دفع می کند، برای آنکه هسته ها با وجود این نیروی رانشی بسیار قوی، بتوانند به هم گداخته شوند، باید دما بسیار بالا باشد تا هسته ها با انرژی جنبشی زیادی به یکدیگر برخورد کنند. به همین دلیل، برای انجام این واکنش باید مقدار زیادی انرژی صرف کرد. به طور مثال، برای شروع واکنش دوتریم و تریتیم، به دمایی حدود ده ها میلیون درجه سلسیوس نیاز است. دمایی از این مرتبه در ستارگان و خورشید وجود دارد. مثلاً خورشید، که در آن از گداخت هسته های هیدروژن انرژی آزاد می شود، دمای درونی آن فراتر از ۲۰ میلیون درجه سلسیوس برآورد شده است. در نتیجه واکنش گداخت هسته ای، در مرکز خورشید و ستارگان که دما و فشار بسیار بالاست صورت می گیرد.



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

09118389989

مهندس صادق نژاد

تجربی ۹۴ : در داخل راکتور، با استفاده از کندکننده‌ای مانند گرافیت، تندی نوترون‌ها را کاهش می‌دهند تا:

۱) احتمال جذب آن‌ها توسط $^{238}_{92}U$ بیشتر شود.

۲) احتمال جذب آن‌ها توسط $^{235}_{92}U$ بیشتر شود.

۳) سرعت واکنش هسته‌ای کاهش یافته و کنترل شود.

۴) درصد بیشتری از انرژی هسته‌ای آزاد شده و به کنترل در آید و استفاده شود.

گزینه ۲

ریاضی ۹۷ : کدام گزینه در مورد $^{238}_{92}U$ و $^{235}_{92}U$ درست نیست؟

۱) تعداد نوترون $^{238}_{92}U$ بیشتر است.

۲) هردو تعداد پرتون یکسانی دارند.

۳) هردو خواص شیمیایی یکسانی دارند.

۴) $^{238}_{92}U$، 0.72 درصد اورانیم طبیعی را تشکیل می‌دهد.

گزینه ۴

مهندس صادق نژاد