فیزیک هسته ای، شاخه ای از فیزیک است که در آن با ساختار هسته ، برهم کنش ها و واپاشی هسته های اتمی سروکار داریم. بخش عمده ای از پیشرفت فیزیک هسته ای، مدیون تحلیل نتایج آزمایش ها و اندازه گیری هایی است که طی قرن گذشته توسط دانشمندانی از حوزه های فیزیک و شیمی انجام شده است.

ساختار هسته

کشف پرتوزایی طبیعی در سال 1896 میلادی توسط فیزیک دان فرانسوی، هانری بکرل، آغازی برای پی بردن به وجود هسته اتم بود. با کاوش درون اتم، در مرکز آن، هسته را می یابیم که شعاع آن 0.00001 برابر شعاع اتم است.

هسته اتم از نوترون ها و پروتون ها تشکیل شده است که به طور کلی نوکلئون نامیده می شوند. نوترون اولین بار در سال 1932 میلادی توسط فیزیکدان انگلیسی جیمز چادویک، کشف شد. نوترون ها بار الکتریکی ندارند و جرمشان اندکی بیشتر از پروتون است. جرم اتم ها و همچنین اجزای تشکیل دهنده اتم را علاوه بر کیلوگرم، با جرم اتمی نیز بیان می کند.

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	$+1/6 \times 10^{-19}$	$1/672622 \times 10^{-27}$	۱/۰۰۷۲۷۶
نوترون	۰	$1/674929 \times 10^{-27}$	۱/۰۰۸۶۶۴

تعداد پروتونهای هسته را عدد اتمی (Z) می نامند که در عنصر های مختلف متفاوت است. در یک اتم خنثی تعداد پروتون های هسته با تعداد الکترون های دور هسته برابر است. تعداد نوترون های هسته عدد نوترونی (N) نامیده می شود مجموع تعداد کل پروتون ها و نوترون ها را عدد جرمی (A) می‌نامند.

$$A=Z+N$$

تعداد نوترون ها + تعداد پروتون ها = عدد جرمی

برای یک عنصر با نماد شیمیایی X ، نماد هسته به صورت زیر نشان داده می شود.

نماد عنصر ← A ←عدد جرمی

X

عدد نوترونی ← N ←عدد اتمی Z

مشخص کردن N در نماد نویسی بالا ضروری نیست، چون می توان آن را به دست آورد. همچنین چون نماد شیمیایی عنصر ، نشان دهنده مقدار Z است میتوان در بسیاری از موارد Z را ذکر نکرد. مثلا هسته اتم آلومینیوم را به جای $^{27}_{13}Al_{14}$ می توان به صورت $^{27}_{13}Al$ یا ^{27}Al نمایش داد.

ایزوتوپ ها

ویژگی های هسته را تعداد پروتون ها و نوترون های آن تعیین می کند. خواص شیمیایی هر اتم را تعداد پروتون های هسته تعیین می کند. به همین دلیل هسته هایی که تعداد پروتون مساوی ولی تعداد نوترون متفاوت دارند خواص شیمیایی یکسانی دارند. در نتیجه این هسته ها در جدول تناوبی عناصر در یک مکان هستند و ایزوتوپ نامیده می شوند.

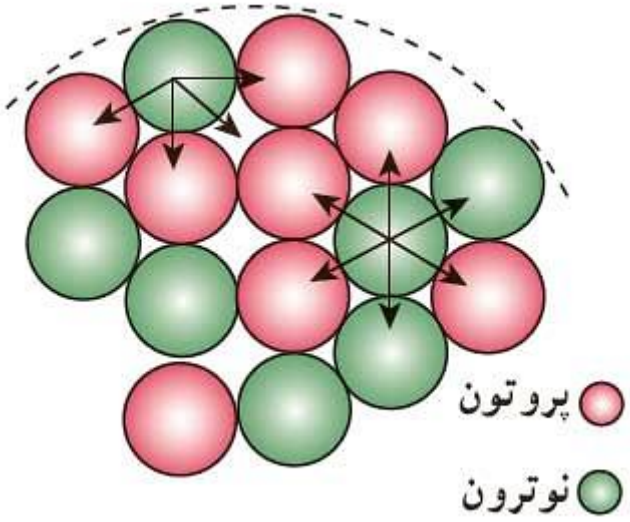
مثلاً کربن به دو صورت پایدار و با درصد های فراوانی بسیار متفاوتی در طبیعت یافت می شود که یکی از ۶ پروتون و 6 نوترون ($^{12}_{6}C$) و دیگری از شش پروتون و هفت نوترون ($^{13}_{6}C$) تشکیل شده است این دو هسته ایزوتوپ های کربن هستند.

جرمهای اتمی که در جدول تناوبی عناصر نمایش داده می شود 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 می‌کنند.

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

پایداری هسته

ابعاد هسته در مقایسه با ابعاد اتم بسیار کوچکتر است با وجود این بیشتر جرم اتم یعنی بیشتر از 99.9 درصد آن در هسته متمرکز شده است. مرتبه بزرگی چگالی هسته 10^{14} است که بسیار بزرگ است.



به این شکل از هسته دقت کنید. به نظر می رسد که نوکلئون ها باید از هم دور شوند. چون پروتون ها همگی بار مثبت دارند و همدیگر را با نیروی الکتروستاتیکی دفع می کنند. در ابعاد هسته نیروی الکترومغناطیسی دافعه بین دو پروتون بسیار بالاست در این صورت چه چیزی مانع از هم پاشیدن هسته می شود؟

از آنجایی که بسیاری از هسته هایی که در طبیعت وجود دارند پایدار هستند می توان نتیجه گرفت که نیروی جاذبه ای اجزای هسته را کنار هم نگه می دارد. ازطرفی جاذبه نیروی گرانشی بین نوکلئون ها آنقدر ضعیف است که نمی تواند با نیروی دافعه الکترواستاتیکی مقابله کند. نیرویی که باعث نگهداری نوکلئون ها در کنار هم و پایداری هسته می شود نیروی هسته‌ای است.

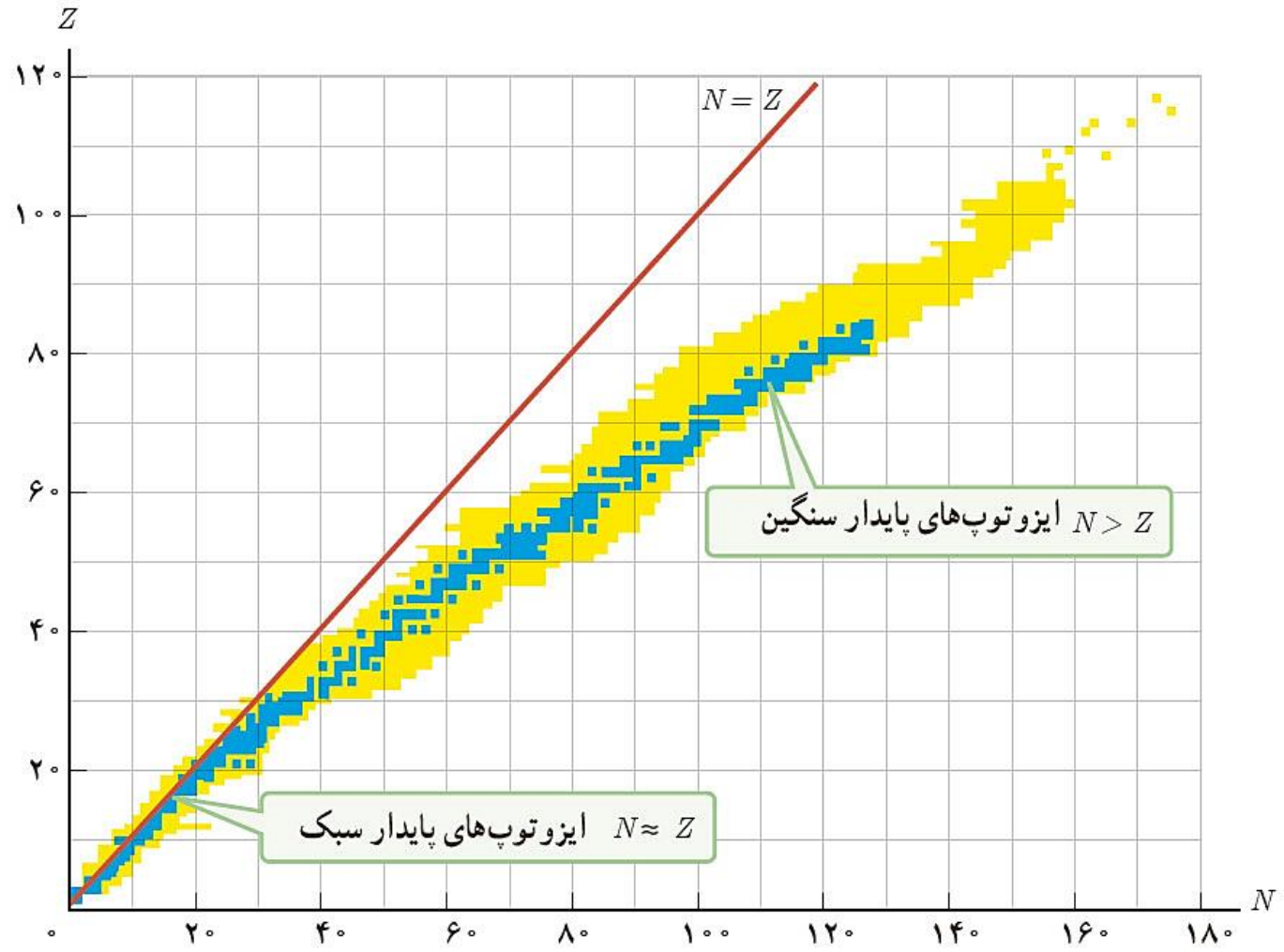
نیروی هسته ای کوتاه برد است و در فاصله ی کوچکتر از ابعاد هسته اثر می کند. نیروی هسته‌ای مستقل از بار الکتریکی است یعنی نیروی جاذبه هسته ای بین دو پروتون و دو نوترون یا یک پروتون و نوترون یکسان است. به همین دلیل از نظر نیروی هسته‌ای تفاوتی بین پروتون و نوترون وجود ندارد و به همین دلیل نام کلی نوکلئون را روی آنها گذاشته اند.

در یک هسته یک نیرو به سمت بیرون سعی می کند تا ذرات هسته را از هم دور کند و آن نیروی دافعه الکتروستاتیکی است و یک نیروی جاذبه هسته ای سعی می کند تا ذرات هسته را به هم نزدیک کند. برای پایداری هسته باید بین این دو نیرو تعادل برقرار شود. ولی به دلیل بلند برد بودن نیروی الکترواستاتیکی یک پروتون تمام پروتون های دیگر درون هسته را دفع می کند در حالی که یک پروتون و نوترون فقط نزدیکترین نوکلئون های همسایه خود را با نیروی هسته‌ای جذب می کند.

به همین دلیل وقتی تعداد پروتون های درون هسته افزایش می یابد اگر هسته بخواهد پایدار باقی بماند باید تعداد نوترون های درون هسته نیز افزایش یابد. از حدی که اتم بزرگتر شود و تعداد پروتون ها بیشتر شود، نیروی دافعه

بین پروتون ها باعث می شود که بعضی از پروتون ها از هسته خارج شوند. به علت تغییر تعداد پروتون های هسته، اتم به اتم های دیگری تبدیل می شود. به این اتفاق اصطلاحا واپاشی اتم می گویند.

شکل زیر نموداری از Z بر حسب N را برای عناصر مختلف نشان می دهد. هسته پایدار با بیشترین تعداد پروتون (Z=83) مربوط به بیسموت $^{209}_{83}Bi$ است.



در میان عناصر ناپایدار با عدد اتمی بزرگتر از ۸۳ (Z>83) توریوم و اورانیوم تنها عناصری هستند 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 عنصر های سبک تر تبدیل شده‌اند.

در نمودار بالا هر نقطه آبی رنگ نشان دهنده هسته ای پایدار و هر نقطه زرد رنگ یک هسته ناپایدار است. تا حدود Z=20 نسبت N/Z برابر یک است ولی به تدریج و با افزایش Z ، تعداد نوترون های درون هسته افزایش بیشتری می یابد به طوری که پس از Z=50 به بعد، به ازای افزایش یک پروتون، چندین نوترون به هسته اضافه می شود.

به ازای Z معین، با شمارش تعداد دانه های آبی رنگ و زرد رنگ در امتداد محور N می توان تعداد ایزوتوپ های هر عضو را مشخص کرد.

مثال 1:

مرتبه بزرگی تعداد نوترون هایی را که می توان تنگ هم در یک توپ تنیس به شعاع 3.2cm جای داد، تخمین بزنید. در این صورت مرتبه بزرگی جرم این توپ چقدر است؟ (مرتبه بزرگی شعاع و جرم نوترون را به ترتیب $m10^{-15}$ و $kg10^{-27}$ درنظر بگیرید.)

پاسخ:

$$V_{\text{نوترون}} = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3} \times 3.14 \times (10^{-15})^3 \approx 10^{-45} m^3$$

$$V_{\text{توپ تنیس}} = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3} \times 3.14 \times (3.2 \times 10^{-2})^3 \approx 10^{-4} m^3$$

$$\text{تعداد نوترون } n = \frac{V_{\text{توپ تنیس}}}{V_{\text{نوترون}}} = \frac{10^{-4}}{10^{-45}} = 10^{41}$$

$$\text{مرتبه بزرگی جرم} = M_{\text{نوترون}} \times n = 10^{-27} kg \times 10^{41} = 10^{14} kg$$

مثال 2 :

آیا می توان ایزوتوپ $^{61}_{25}X$ را با روش شیمیایی از ایزوتوپ $^{59}_{25}X$ جدا کرد؟ از ایزوتوپ $^{61}_{26}Y$ چطور؟ پاسخ خود را توضیح دهید.

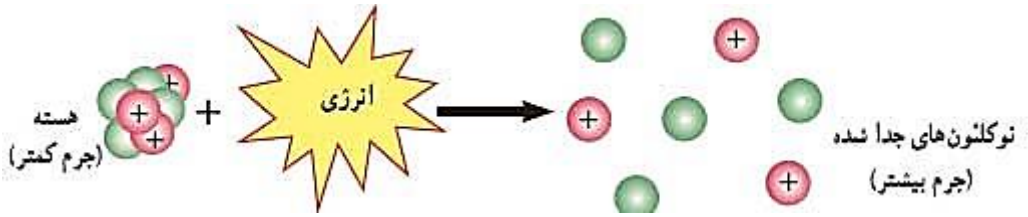
پاسخ:

ایزوتوپ های $^{61}_{25}X$ و $^{59}_{25}X$ مربوط به یک عنصر هستند چون عدد اتمی آنها یکسان است. و خواص شیمیایی یکسانی دارند. بنابر این نمی توان با روش های شیمیایی از هم جدا کرد. اما $^{61}_{25}X$ و $^{61}_{26}Y$ دو عدد اتمی متفاوت دارند یعنی دو عنصر مختلف با خواص شیمیایی متفاوت هستند. بنابر این می توان با روش های شیمیایی این دو را از هم جدا کرد.

انرژی بستگی هسته ای

برای جدا کردن نوکلئون های یک هسته، انرژی لازم است تا بتوان بر نیروی جاذبه هسته ای غلبه کرد. انرژی لازم برای اینکار را انرژی بستگی هسته ای می نامند.

اگر جرم هسته را با ابزاری دقیق اندازه بگیریم و سپس جرم هسته را با استفاده از جمع جرم های پروتون و نوترون ها حساب کنیم، می بینیم با یکدیگر متفاوت هستند. جرم هسته کمتر از جرم پروتون ها و نوترون هاست. این کاستی جرم هسته، همان مقدار جرمی است که تبدیل به انرژی شده است. می دانیم طبق رابطه $E=mc^2$ اینشتین، جرم و انرژی به یکدیگر تبدیل می شوند. برای محاسبه انرژی بستگی هسته ای کافیست این کاستی جرم هسته را در (c^2) ضرب کنیم. که معمولا عدد بزرگی است.



توجه کنید محاسبه انرژی بستگی هسته ای در کتاب درسی فیزیک 3 نباید مورد ارزشیابی قرار گیرد.

ترازهای انرژی هسته

انرژی نوکلئون های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون های وابسته به اتم، کوانتیده هستند و نمی توانند هر انرژی دلخواهی را اختیار کنند. همچنین نوکلئون ها می توانند با جذب انرژی به ترازهای بالاتر بروند و هسته برانگیخته را ایجاد کنند. و در بازگشت به ترازهای پایین تر فوتون تابش کنند. انرژی فوتون تابش شده برابر اختلاف انرژی بین تراز برانگیخته و تراز پایه است. هسته برانگیخته را با گذاشتن یک ستاره در سمت راست بالا نشان می دهند. به طور مثال $^{A}_{Z}X^{*}$.

اختلاف انرژی تراز های نوکلئون های هسته در حدود KeV تا MeV است در صورتی که اختلاف ترازهای الکترون در اتم از مرتبه eV است. بنابراین هسته ها در واکنش های شیمیایی برانگیخته نمی شوند.