پایداری هسته‌ها

بهمن قمری، دبیر فیزیک دبیرستان‌های تهران

از دانش‌آموزی پرسیدم: چرا داخل هسته، پروتون‌ها با اینکه بار یکسان دارند همدیگر را دفع نمی‌کنند؟

پاسخ داد: به‌دلیل وجود نوترون‌ها.

ظاهراً این جواب غلط نیست؛ برای ادامهٔ بحث پرسیدم: پس چرا می‌گویند اگر تعداد نوترون‌ها از ۱/۵ برابر تعداد پروتون‌ها بیشتر باشد هسته واپاشیده می‌شود و به چنین عنصرهایی پرتوزا می‌گویند؛ آیا وجود نوترون‌ها عامل پایداری هسته است یا عامل واپاشی آن‌ها؟

گفت: من خودم هم به این تناقض پی برده‌ام، راستی مشکل کجاست؟

شما هم ممکن است پرسش‌هایی مانند پرسش‌های زیر را در نظر داشته باشید و بخواهید پاسخ‌های آن‌ها را بدانید. این پیوست به شما کمک خواهد کرد تا پاسخ‌های شما علمی‌تر باشد.

۱. رمز پایداری هسته‌ها در چیست؟

۲. چرا هسته‌های سبک پایدارترند ولی هسته‌های سنگین واپاشیده یا در حال واپاشی‌اند؟

۳. چرا تعداد اتم‌ها به مراتب کمتر از هسته‌های موجود در طبیعت است؟ (هر اتمی ایزوتوپ‌های متعدد دارد.)

۴. چرا هسته‌ای که فقط پروتون دارد (هیدروژن) داریم ولی هسته‌ای که فقط نوترون داشته باشد وجود ندارد؟

۶. با آنکه نوترون‌ها هم یکدیگر را دفع نمی‌کنند، به چه دلیل نوترون‌های به‌هم پیوسته نداریم؟

۷. چرا هستهٔ هلیم که ۲ پروتون و ۲ نوترون دارد می‌تواند به دو $^{2}_{1}H$ (پروتون- نوترون) تقسیم بشود. ولی به دو پروتون و دو نوترون مجزا تقسیم نمی‌شود؟

۸. چرا $^{16}_{8}O$ در طبیعت به وفور یافت می‌شود ولی $^{15}_{8}O$ یا $^{19}_{8}O$ پایدار یافت نمی‌شود؟

۹. آیا از ابتدای به‌وجود آمدن منظومهٔ شمسی همین تعداد هسته وجود داشته یا آن‌ها به‌تدریج کم شده‌اند؟

۱۰. چرا هسته‌های موجود از حدود $1 \leq Z \leq 92$ و $0 \leq N \leq 146$ بیشتر نیستند. به‌طور مثال هسته‌ای با $Z=120$ و $N = 200$ یافت نمی‌شود؟

برای پاسخ به پرسش‌های بالا و پرسش‌هایی که خود می‌توانید به آن‌ها اضافه کنید بدون ورود به جزئیات غیرضروری باید خاطرنشان کنیم که وضع موجود هسته‌ها حاصل دو عامل مهم است، یکی نیروهای هسته‌ای و دیگری اصل طرد پائولی.

نیروهای هسته‌ای امکانات و محدودیت‌های آن

غیر از نیروی الکترومغناطیسی و نیروی گرانشی که با آن‌ها آشنا هستید، از حدود ۱۰۰ سال پیش به این طرف دانشمندان دریافتند نیروی دیگری هم وجود دارد که بین نوکلئون‌ها (ذرات هسته) عمل می‌کند. این نیرو مستقل از بار الکتریکی است و بین p-n، p-p، n-n تقریباً یکسان است. رباشی است و در فاصله‌های کوچک (2×10^{-15} m) بسیار قوی‌تر از دافعهٔ کولنی است ولی با افزایش فاصله به‌شدت کاهش می‌یابد. (کوتاه برد است)

اصل طرد پائولی

اصل طرد پائولی تمام ذرات زیراتمی (الکترون‌ها، پروتون‌ها و نوترون‌ها) حاکم است. براساس این اصل هرگز دو ذرهٔ یکسان، مثلاً دو الکترون یا دو پروتون و یا دو نوترون، نمی‌توانند در یک حالت با اعداد کوانتومی کاملاً یکسان باشند.

برای تشکیل هسته‌ها نیروی هسته‌ای نوکلئون‌ها را به هم می‌چسباند. به‌دلیل جاذبهٔ شدیدِ آن، مقداری از جرم این ذرات کم می‌شود و به انرژی بستگی تبدیل می‌شود.

بنابراین نوکلئون‌ها نیز مثل الکترون‌ها دارای ترازهای انرژی هستند. این ترازهای انرژی نیز کوانتیده است. نوکلئون‌ها هم باید در ترازهای مختلف انرژی از پایین به بالا چیده شوند و از قانون طرد پائولی پیروی کنند.

در هر تراز به‌جای اینکه دو پروتون (p-p) یا دو نوترون (n-n) وجود داشته باشد راحت‌تر است یک پروتون و یک نوترون (p-n) باشد. البته گاهی هم دو نوترون با اسپین‌های مخالف ($n\downarrow - n\uparrow$) می‌توانند در یک تراز باشند. اما احتمال در یک تراز بودن پروتون‌های با اسپین مخالف با توجه به دافعه آن‌ها بسیار کم است. اگر پروتون‌ها بار نداشتند ولی از نوترون‌ها قابل تشخیص بودند به‌علت اصل طرد پائولی باید در همه هسته‌ها تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها تقریباً یکسان می‌بودند؛ تعدادی (p-n) بدون توجه به اسپین و تعدادی نیز از یک نوع با اسپین مخالف ($P\downarrow - P\uparrow$) و ($N\downarrow - N\uparrow$) جفت می‌شدند.

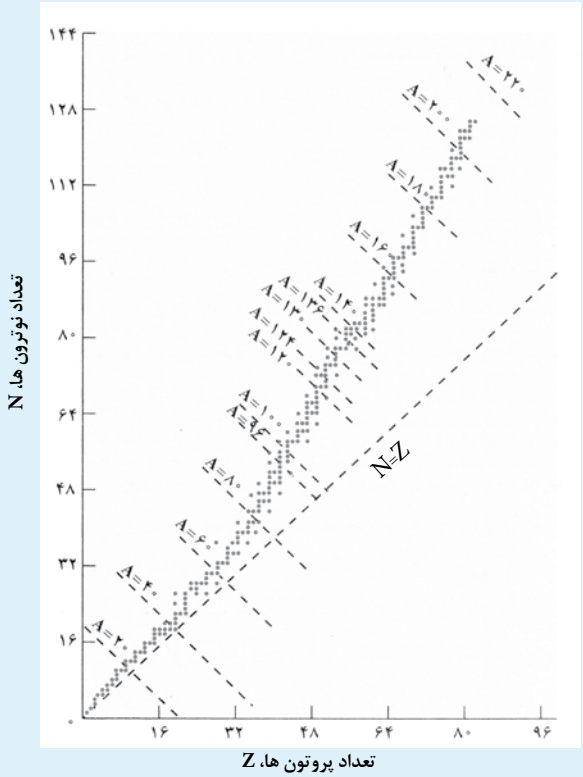
اما در وضعیتِ موجودِ طبیعت، به‌دلیل بار یکسان پروتون‌ها، شانس ($P\downarrow - P\uparrow$) کمتر است. در نتیجه تعداد نوترون‌ها در عمل بیشتر از پروتون‌ها است ولی از ۱/۵ برابر تجاوز نمی‌کنند.

از طرفی، اگر هسته سنگین و حجیم باشد با توجه به بردِ کمِ نیروی هسته‌ای، این نیرو نمی‌تواند بر دافعهٔ کولنی غلبه کند، لذا قطعاتی شامل پروتون و نوترون‌های جفت شده از هسته جدا می‌شوند [تابش پرتو α] تا اینکه حجم هسته کوچک‌تر شده و به‌هسته پایدار تبدیل شود.

حدود ۴ میلیارد سال قبل، زمانِ تشکیل منظومهٔ شمسی انواع بسیاری از هسته‌ها در طبیعت وجود داشته‌اند. اما آن‌هایی که پروتون بیشتری داشتند و آن‌هایی که سنگین‌تر بودند از بین رفتند. در انقراض آن‌ها، هم اصل طرد پائولی و هم دافعهٔ کولنی مؤثر بودند. عده‌ای هم هنوز جان می‌کنند (هسته‌های پرتوزا).

N و Z هسته‌های طبیعی در شکل نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد ذرات از $Z=۸۳$ به بالا در حال فروپاشی هستند.

آن‌هایی که مانده‌اند تعداد پروتون‌های به‌مراتب کمتری از نوترون دارند. ($n_p = \frac{۲}{۳} n_N$) و همچنین حجم آن‌ها کوچک است.



پی‌نوشت

منظور از اینکه نوکلئون‌ها از پایین به بالا چیده شده‌اند محل آن‌ها نیست. فقط به این معنی است که در لحظهٔ واپاشی، کل هسته از بین نمی‌رود بلکه به‌تدریج واپاشیده می‌شود. ابتدا آن‌هایی که انرژی بستگی کمتری دارند یعنی در ترازهای بالاتری هستند جدا می‌شوند و عده‌ای هم که در ترازهای پایین هستند یعنی بستگی بیشتری دارند اصلاً پاشیده نمی‌شوند. اگر دقت کنید یونیده شدن اتم‌ها، یعنی جدا شدن الکترون‌ها از یک اتم هم یکی بعد از دیگری انجام می‌شود و نشان می‌دهد آن‌ها شرایط یکسان (انرژی همسان) ندارند.

منابع

۱. مبانی فیزیک نوین (ریچارد وایدنر؛ ترجمه علی‌اکبر بابایی)
۲. جهان کوانتومی نوین (تونی هی؛ ترجمه محمدرضا محجوب)