



دانشگاه ساری
پایه

مقدمه‌ای بر شیمی هسته‌ای

دکتر نصرت مددی‌ماهانی دکتر اصغر امیری

امروز کتابخوانی و علم‌آموزی نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.^۱

مقام معظم رهبری

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتابخوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پر بار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه مطالعه هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان، تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاورد انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین سوره‌ای که بر آن فرستاده عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد

1. <https://farsi.khamenei.ir/message-content?id=2696>

شده است: «إِقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده اند.

دانشگاه پیام نور با گستره جغرافیایی ایران شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه جا و همه وقت، به عنوان دانشگاهی کتاب محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره گیری از تجربه های گرانقدر استادان و صاحب نظران برجسته کشورمان، کتاب ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه مهم و خطیر یاری رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه خطیر یاری می رسانند، سپاسگزاری می نمایم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام نور را منزلگاه اندیشه سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام نور

فهرست مطالب

پیشگفتار	نُه
فصل اول. مفاهیم مقدماتی	۱
مقدمه	۱
۱-۱ ساختار هسته‌ای	۱
۲-۱ اندازه‌ها و جرم‌های هسته‌ها	۲
۳-۱ انرژی بستگی	۲
۴-۱ فروپاشی هسته‌ای	۴
۵-۱ رادیواکتیویته (پرتوزایی)	۶
۱-۵-۱ تلاشی رادیواکتیو	۶
۲-۵-۱ قانون تلاشی	۷
۳-۵-۱ زنجیره‌های رادیواکتیو	۱۱
۴-۵-۱ اندازه‌گیری نیمه‌عمر	۱۳
فصل دوم. فرایندهای هسته‌ای	۱۵
مقدمه	۱۵
۱-۲ فرایندهای هسته‌ای	۱۵
۲-۲ تغییر و تبدیل عناصر	۱۶
۳-۲ بقای انرژی و اندازه حرکت	۱۷
۴-۲ نرخ واکنش‌ها	۱۹
۵-۲ تضعیف ذرات	۲۲
۶-۲ سطح مقطع نوترون‌ها	۲۴
۷-۲ کوچ نوترون	۲۵

۲۹	۸-۲ اشعه و مواد.....
۳۰	۸-۲-۱ برانگیختگی و یونش با الکترون‌ها.....
۳۱	۸-۲-۲ توقف ذرات باردار سنگین توسط ماده.....
۳۴	۸-۲-۳ برهم‌کنش اشعه گاما با ماده.....
۳۷	۸-۲-۴ واکنش‌های نوترون.....
۳۸	۹-۲ شکافت.....
۳۸	۹-۲-۱ فرایند شکافت.....
۳۹	۹-۲-۲ ملاحظات انرژی.....
۴۰	۹-۲-۳ محصولات جانبی شکافت.....
۴۴	۱۰-۲ گداخت یا جوش هسته‌ای.....
۴۴	۱۰-۲-۱ واکنش‌های جوش هسته‌ای.....
۴۶	۱۰-۲-۲ نیروهای الکتروستاتیک و هسته‌ای.....
۴۸	۱۰-۲-۳ واکنش‌های گرما هسته‌ای در پلاسما.....
۵۱	فصل سوم. واکنش‌های زنجیره‌ای نوترون.....
۵۱	مقدمه.....
۵۱	۳-۱ بحرانی شدن و تکثیر.....
۵۳	۳-۲ ضرایب تکثیر.....
۵۸	۳-۳ شار نوترونی و قدرت راکتور.....
۵۹	۳-۴ انواع راکتور.....
۶۴	۳-۵ بهره‌برداری از راکتور.....
۶۷	۳-۶ راکتور طبیعی.....
۶۹	فصل چهارم. انرژی گرمایی هسته‌ای.....
۶۹	مقدمه.....
۶۹	۴-۱ روش‌های انتقال گرما.....
۷۰	۴-۲ تولید و خارج کردن گرما.....
۷۴	۴-۳ ایجاد بخار و تولید نیروی برق.....
۷۶	۴-۴ حذف گرمای آزاد شده.....
۸۱	فصل پنجم. راکتورهای زاینده.....
۸۱	مقدمه.....
۸۱	۵-۱ مفهوم زاینده‌گی.....
۸۴	۵-۲ راکتور زاینده سریع.....
۸۷	۵-۳ زاینده‌گی و منابع اورانیوم.....

فصل ششم. راکتورهای گداخت.....	۸۹
مقدمه.....	۸۹
۱-۶ محصورسازی پلاسما.....	۹۱
۲-۶ برهم‌کنش پلاسما با سطح.....	۹۱
۳-۶ پخش نوترون.....	۹۳
۴-۶ صدمات تابش نوترونی در مواد راکتور.....	۹۳
۱-۴-۶ دیواره اولیه.....	۹۴
۲-۴-۶ بارگذاری دیواره.....	۹۵
۳-۴-۶ تخریب دیواره توسط اتم‌ها.....	۹۵
۵-۶ آلودگی پلاسما و جلوگیری از آن.....	۹۶
۱-۵-۶ لایه حفاظتی پوشش.....	۹۷
پیوست‌ها.....	۹۹
منابع.....	۱۰۶

پیشگفتار

شیمی هسته‌ای یکی از شاخه‌های علم شیمی و فناوری هسته‌ای می‌باشد که در این حوزه مجموعه واکنش‌ها و برهم‌کنش‌های فرایندهای هسته‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. از حوزه‌های پرکاربرد شیمی هسته‌ای می‌توان به تولید رادیوایزوتوپ‌ها برای عکس‌برداری پزشکی، ساخت دارو، بهینه‌سازی محصولات کشاورزی و طراحی و ساخت سوخت هسته‌ای اشاره کرد. همچنین، دانش هسته‌ای در دنیای امروزی جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده است، کتاب حاضر کتابی است چندمنظوره و مشتمل بر شش فصل که مباحث مربوط به پایه‌های شیمی هسته‌ای، فرایندهای هسته‌ای، واکنش‌های زنجیره‌ای نوترون، راکتورهای زاینده و راکتورهای شکافت را دربرمی‌گیرد. می‌توان گفت با مطالعه این کتاب مقدمات لازم و ضروری برای آموختن آنچه که علم مواد هسته‌ای و تأثیر تابش بر مواد است، فراهم می‌شود. لازم است، مراتب تشکر را از سرکار خانم دکتر شیدا احمدی که در ویرایش کتاب همکاری صمیمانه داشته‌اند و از مرکز چاپ و نشر دانشگاه پیام نور اعلام نماییم.

مؤلفان

فصل اول

مفاهیم مقدماتی

مقدمه

دانش هسته‌ای، علم مطالعه خواص و تغییر در هسته اتم‌ها است. نقطه آغازین این دانش کشف بکرل است. پیر کوری و مادام کوری نیز توانستند رادیوم را جدا کنند. دانش هسته‌ای از دو جنبه نظری و کاربردی بررسی می‌گردد. از جمله کاربردهای مهم دانش هسته‌ای، می‌توان به تشخیص و درمان بیماری‌ها و تأثیر تشعشعات رادیواکتیویته بر روی انسان و موجودات زنده نام برد. هدف از مطالعه شیمی هسته‌ای فراگیری اصول ساختمان هسته اتم، انواع راکتورها، بررسی کاربرد رادیو ایزوتوپ‌ها، آثار سودمند اشعه و حفاظت در برابر آن می‌باشد.

۱-۱ ساختار هسته‌ای

اکثر عناصر از اتم‌هایی با وزن مختلف تشکیل شده‌اند که به آن‌ها ایزوتوپ می‌گویند. مثلاً هیدروژن دارای سه ایزوتوپ با وزن‌هایی با نسبت ۱، ۲ و ۳ است که عبارت‌اند از: هیدروژن معمولی، هیدروژن سنگین (دوتریم)^۱ و تریتم^۲. هر کدام از این ایزوتوپ‌ها دارای عدد اتمی ۱ هستند؛ و خواص شیمیایی یکسانی را دارند ولی در ترکیب هسته مرکزی‌شان که بیشتر جرم در آن متمرکز است تفاوت دارند. هسته هیدروژن معمولی، پروتون با بار مثبت است؛ دوترون^۳ متشکل از یک پروتون و یک نوترون می‌باشد و

1. Deuterium

2. Tritium

۳. دوترون هسته دوتریم است.

نوترون یک ذره خنثی است که وزن آن به وزن پروتون خیلی نزدیک است. تریتون^۱ شامل یک پروتون و دو نوترون است. برای تمیز دادن ایزوتوپ‌ها عدد جرمی A را که برابر با کل تعداد نوکلئون‌ها یعنی ذرات سنگین داخل هسته است، تعیین می‌گردد. طرز نوشتن مختصر و کامل یک عنصر با نوشتن علامت شیمیایی آن و قرار دادن عدد جرم اتمی A در بالا و سمت چپ و عدد اتمی Z در پایین و سمت چپ انجام می‌گیرد، مثل ${}^3_1\text{H}$ ، ${}^2_1\text{H}$ و ${}^3_1\text{H}$.

۱-۲ اندازه‌ها و جرم‌های هسته‌ها

ابعاد هسته‌ها بسیار کوچک‌تر از ابعاد اتم‌ها می‌باشد. درحالی‌که اتم هیدروژن دارای شعاعی برابر با $5 \times 10^{-9} \text{ cm}$ است، شعاع هسته آن فقط 10^{-13} cm است. از آنجا که وزن پروتون خیلی بیشتر از الکترون است، هسته اتم بسیار فشرده و سنگین است. هسته‌های سایر ایزوتوپ‌ها را می‌توان ذرات فشرده‌ای از ماده یعنی نوترون و پروتون در نظر گرفت که کره‌ای به حجم $\frac{4}{3}\pi R^3$ را تشکیل می‌دهند، که به A (تعداد نوکلئون‌ها) بستگی دارد. یک قانون ساده و مفید برای محاسبه شعاع هسته‌ها از این قرار است:

$$R(\text{cm}) = \frac{1}{4} \times 10^{-13} A^{1/3} \quad (1-1)$$

چون تعداد نوکلئون‌ها از ۱ تا ۲۵۰ متغیر است لذا تمامی هسته‌ها از 10^{-12} cm کوچک‌تر هستند.

$$(x+a)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k a^{n-k} \quad (2-1)$$

۱-۳ انرژی بستگی

ممکن است تصور شود که نیروی دافعه الکتروستاتیک بین بارهای همنام که با عکس مجذور فاصله تغییر می‌کند آن‌قدر بزرگ شود که مانع تشکیل هسته‌ها شود. این حقیقت که هسته‌ها وجود دارند دلیل بر وجود نیروی جاذبه بزرگ‌تری است. همان‌طور که می‌توان از قانون تجربی ساده بالا نتیجه گرفت نیروی هسته‌ای برد^۲ بسیار کوتاهی

۱. تریتون هسته تریتم است.

دارد. شعاع یک نوکلئون تقریباً 1.4×10^{-12} cm است؛ فاصله مراکز دو نوکلئون حدود دو برابر آن است. نیروی هسته‌ای فقط وقتی که دو نوکلئون خیلی به هم نزدیک شوند وارد عمل می‌شود و آن دو را به شکل یک ساخته فشرده به هم متصل می‌کند. به نیروی خالص «انرژی پتانسیل بستگی» وابسته است. برای از هم پاشاندن یک هسته و تجزیه آن به نوکلئون‌های تشکیل دهنده‌اش باید از خارج به هسته انرژی داده شود. با یادآوری رابطه^۱ بین جرم و انرژی (رابطه اینشتین)، می‌توان گفت که یک هسته از مجموع نوکلئون‌هایش به‌طور مجزا سبک‌تر است و این اختلاف برابر جرم-انرژی بستگی است. فرض کنید جرم یک اتم شامل هسته و الکترون‌های اطراف برابر M باشد و m_n و m_H جرم نوترون و پروتون به‌علاوه الکترون خارجی مربوط باشد. آن وقت انرژی بستگی برابر است با:

$$B = \text{جرم اتم} - \text{جرم کل ذرات جدا شده} \quad (3-1)$$

یا

$$B = Nm_n + Zm_H - M$$

(در این رابطه، از انرژی مربوط به بستگی اتمی یا شیمیایی صرف‌نظر شده است). اگر B را برای تریتم سنگین‌ترین اتم هیدروژن محاسبه گردد. با توجه به اینکه: $N=2$, $Z=1$, $m_n = 1.008665$, $m_H = 1.007825$ و $M = 3.016049$ است.

$$B = 2(1.008665) + 1(1.007825) - 3.016049$$

$$B = 0.009106 \text{ amu}$$

با استفاده از رابطه $1 \text{ amu} = 931 \text{ Mev}$ انرژی بستگی برحسب Mev محاسبه می‌شود $B = 8.48 \text{ Mev}$.

برای مقایسه پایداری یک هسته با هسته دیگر، برای یافتن انرژی آزاد شده در یک واکنش هسته‌ای، و برای پیشگویی امکان شکافت^۲ یک هسته، به چنین محاسباتی نیاز است.

می‌توان از انرژی بستگی مربوط به یک ذره مانند نوترون سخن گفت. فرض کنید M_1 جرم یک اتم و M_2 جرم آن پس از جذب یک نوترون باشد. انرژی بستگی نوترون افزوده شده به جرم m_n برابر است با:

$$B_n = M_1 + m_n - M_2 \quad (4-1)$$

توضیحات اثرات انرژی بستگی با استفاده از استدلال فیزیکی و جرم‌های اتمی که از اندازه‌گیری به‌دست آمده‌اند، منتهی به نتایجی شده‌اند که «فرمول‌های نیمه تجربی» برای انرژی بستگی نام دارند. مقدار B به‌طور تقریبی برای هر نوکلید^۱ به کمک رابطه‌ای که با احتساب الف) جاذبه بین نوکلئون‌ها، ب) دافعه الکتروستاتیکی، ج) اثرات کشش سطحی، د) نابرابری تعداد نوترون‌ها و پروتون‌ها در هسته، محاسبه می‌شود. می‌توان از برنامه کامپیوتری به نام BINDING استفاده کرده و انرژی بستگی B ، انرژی داخلی بر نوکلئون $E = -B/A$ ، و جرم اتمی M را برای عدد جرمی A و عدد اتمی Z مفروض محاسبه کرد.

۴-۱ فروپاشی هسته‌ای

هسته‌ها قادر به گسیل تابش به‌صورت خودبه‌خودی هستند. فروپاشی رادیواکتیو معمولاً از سه نوع فروپاشی اصلی شامل:

فروپاشی α ، فروپاشی β و فروپاشی γ تشکیل شده است، که در آن‌ها یک نوکلید ناپایدار به‌صورت خودبه‌خود به یک

شکل پایدارتر تغییر یافته و مقداری تابش گسیل می‌کند. در جدول ۱-۱، خلاصه‌ای از شکل انواع فروپاشی ملاحظه می‌شود.

سه فرایند اصلی فروپاشی به‌وسیله رادرفورد کشف گردید. وی نشان داد کلیه سه فرایند در فروپاشی نمونه‌ای از اورانیوم طبیعی (و دخترهای آن) رخ می‌دهند. تابش‌های گسیل با α ، β و γ جهت نشان دادن قدرت نفوذ انواع مختلف تابش نام‌گذاری شدند. تحقیقات بیشتر نشان داده است در فروپاشی α یک هسته سنگین به‌طور خودبه‌خود یک هسته ${}^4\text{He}$ (یک ذره α) گسیل می‌کند. ذرات گسیل شده α تک انرژی هستند و

۵ مفاهیم مقدماتی

در نتیجه فروپاشی، هسته مادر دو پروتون و دو نوترون از دست داده به نوکلید جدیدی تبدیل می‌گردد. کلیه هسته‌ها با $Z > ۸۳$ نسبت به این روش فروپاشی ناپایدار هستند. در فروپاشی هسته‌ای β یک نوترون هسته (یا پروتون) به یک پروتون (یا نوترون) تبدیل و یک نوترینو (یا آنتی‌نوترینو) و یک الکترون (یا پوزیترون) دفع می‌گردد.

جدول ۱-۱. خواص فروپاشی رادیواکتیو

نوع فروپاشی	نوع ذره گسیل شده	ΔZ	ΔN	ΔA	انرژی نمونه ذره گسیل شده	مثال	رخداد
α	${}^4\text{He}^{2++}$	-۲	-۲	-۴	${}^4\text{He}^{2++}$	${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{234}\text{Th} + \alpha$	$Z > ۸۳$
β^-	دارای انرژی و e^-	+۱	-۱	۰	${}^0\text{e}^-$	${}^{14}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N} + \beta^- + \bar{\nu}_e$	$(N/Z) > (N/Z)_{\text{stable}}$
β^+	دارای انرژی و e^+	-۱	+۱	۰	${}^0\text{e}^+$	${}^{22}\text{Na} \rightarrow {}^{22}\text{Ne} + \beta^+ + \nu_e$	هسته سبک $(N/Z) < (N/Z)_{\text{stable}}$
EC	ν_e	-۱	+۱	۰	${}^0\text{e}^-$	$e^- + {}^{209}\text{Bi} \rightarrow {}^{209}\text{Pb} + \nu_e$	هسته سنگین $(N/Z) < (N/Z)_{\text{stable}}$
γ	فوتون	۰	۰	۰	${}^0\gamma$	${}^60\text{Ni}^* \rightarrow {}^60\text{Ni} + \gamma$	هر هسته برانگیخته
IC	الکترون	۰	۰	۰	${}^0\text{e}^-$	${}^{125}\text{Sb}^m \rightarrow {}^{125}\text{Sb} + e^-$	حالت‌هایی که گسیل پرتو γ ممنوع است.

در گیراندازی الکترون (EC) یک الکترون مداری به وسیله هسته جذب شده، پروتونی را به یک نوترون به همراه گسیل یک نوترینو تبدیل می‌کند. تعداد کل نوکلئون‌ها، A ، در این هسته‌ها در طی فروپاشی‌ها تغییری پیدا نکرده و تنها تعداد نسبی نوترون‌ها و پروتون‌ها تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر، این فرایند می‌تواند یک عدم موازنه بین تعداد نوترون‌ها و پروتون‌ها را در هسته تنظیم نماید. در فروپاشی‌های β^+ و β^- انرژی فروپاشی بین الکترون گسیل شده، نوترینو و هسته دختر ایجاد شده، به

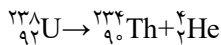
اشتراک گذاشته می‌شود؛ بنابراین، طیف انرژی الکترون‌های گسیل شده و نوترینوها در محدوده بین صفر و یک، انرژی فروپاشی پیوسته خواهد بود. در فروپاشی EC، اساساً، کلیه انرژی فروپاشی به وسیله نوترینوی گسیل شده حمل می‌گردد، هسته‌های غنی از نوترون از طریق فروپاشی β^- فروپاشی نموده، درحالی‌که هسته‌های غنی از پروتون به وسیله فروپاشی β^+ یا EC فروپاشی می‌کنند. فروپاشی β^+ در هسته‌های سبک مناسب بوده و نیاز به انرژی فروپاشی بالاتر از 1.02 MeV دارد. درحالی‌که فروپاشی EC اکثراً در منطقه هسته‌های سنگین‌تر رخ می‌دهند. فروپاشی الکترومغناطیسی هسته‌ای به دو روش رخ می‌دهد: فروپاشی EC و تبدیل داخلی (IC). در فروپاشی پرتو- γ ، هسته‌ای در یک حالت برانگیخته با گسیل یک فوتون فروپاشی می‌کند. در تبدیل داخلی همان هسته برانگیخته انرژی خود را بدون تابش به یک الکترون مداری انتقال می‌دهد که از اتم دفع می‌گردد. در هر دو حالت فروپاشی، تنها انرژی برانگیختگی هسته بدون تغییر در تعداد هرگونه نوکلئون کاهش پیدا می‌کند.

۱-۵ رادیواکتیویته (پرتوزایی)

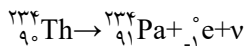
بسیاری از ایزوتوپ‌های موجود در طبیعت یا ساخته دست بشر دارای خاصیت رادیواکتیویته می‌باشند، که عبارت از تلاش ناگهانی هسته به همراه انتشار یک هسته است. این پدیده در مواد معدنی داخل زمین، در الیاف گیاهان، در بافت‌های حیوانات، در هوا و در آب رخ می‌دهد.

۱-۵-۱ تلاشی رادیواکتیو

بسیاری از عناصر سنگین رادیواکتیو هستند. مثلاً تلاشی ایزوتوپ اصلی اورانیوم در واکنش



ذره رها شده ذره α (آلفا) است که چیزی جز هسته اتم هلیوم نیست. ایزوتوپ جدید توریم هم رادیواکتیو است طبق این واکنش:



اولین محصول پروتکتینیم استو دومین محصول الکترون است که هنگامی که در یک واکنش هسته‌ای ظاهر می‌شود به آن ذره β (بتا) می‌گوییم. سومین محصول ذره

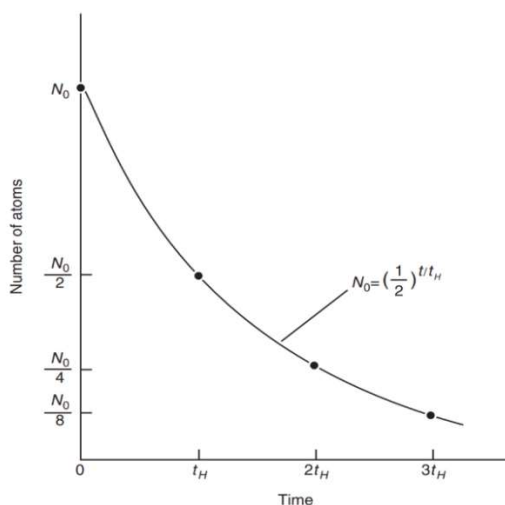
نوترینو^۱ است که با علامت ν (نو)^۲ نشان داده می‌شوند. این یک ذره خنثی با جرم در حال سکون صفر می‌باشد که انرژی آزاد شده در واکنش را با ذره بتا تقسیم می‌کند. به‌طور متوسط ذره نوترینو $2/3$ انرژی و الکترون $1/3$ انرژی را با خود می‌برد. هنگام انتشار ذره آلفا مشاهده می‌شود که A به‌اندازه ۴ واحد و Z به‌اندازه ۲ واحد کم می‌شود. درحالی‌که هنگام انتشار ذره α, β تغییر نمی‌کند ولی Z یک واحد زیاد می‌شود. این دو واکنش شروع یک سری یا «زنجیره» تلاشی می‌باشند که ایزوتوپ‌های عناصر رادیم، پولونیم و بیسموت را در بردارد و احتمالاً به ایزوتوپ پایدار سرب $^{206}_{82}\text{Pb}$ ختم می‌شود.

سایر زنجیره‌ها که در طبیعت یافت می‌شوند با $^{235}_{92}\text{U}$ و $^{232}_{90}\text{Th}$ شروع می‌شوند. صدها رادیو ایزوتوپ «مصنوعی» توسط بمباران هسته‌ها با ذرات باردار یا نوترون‌ها و یا جدا کردن محصولات ناشی از شکافت هسته اتم به‌دست آمده‌اند.

۱-۵-۲ قانون تلاشی

سرعت تلاشی یک ماده اکتیو به نوع ایزوتوپ بستگی دارد. ولی قانون تلاشی معینی بر پدیده حاکم است. در مدت‌زمان معین مثلاً یک ثانیه، هر هسته از نوع ایزوتوپی مفروض دارای شانس مساوی تلاشی است. اگر بتوان یک هسته را بررسی کرد، تلاشی آن هسته ممکن است لحظه بعد، چند روز بعد یا حتی چند صد سال بعد صورت گیرد. این رفتار آماری توسط خاصیت ثابتی از اتم به نام نیمه‌عمر توصیف می‌شود. این بازه زمانی با نماد t_H زمانی است که پس از آن نصف هسته‌ها تلاشی کرده و نصف دیگرشان دست‌نخورده باقی‌مانده‌اند. اگر در زمان صفر با N_0 هسته شروع گردد، پس از گذشت زمان t_H تعداد هسته‌ها $N/2$ و پس از گذشت زمان $2t_H$ تعداد هسته‌ها $N/4$ خواهد بود و همین‌طور الی آخر. منحنی تابع تعداد هسته‌ها برحسب زمان در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. برای هر زمان t روی منحنی، نسبت تعداد هسته‌های باقیمانده به تعداد اولیه توسط رابطه زیر داده شده است:

$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_H} \quad (۵-۱)$$



شکل ۱-۱. تلاشی رادیواکتیو

نیمه‌عمر بین کسر کوچکی از ثانیه تا میلیاردها سال تغییر می‌کند. هر ایزوتوپ رادیواکتیو نیمه‌عمر مشخصی دارد. جدول ۱-۲ چندین مثال از این مواد رادیواکتیو را با نوع اشعه ساطع شده و ایزوتوپ‌های حاصل و نیمه‌عمر آن‌ها نشان می‌دهد. انرژی ذرات β مقادیر ماکزیمم هستند ولی به‌طور متوسط اشعه بتای نشر شده فقط یک‌سوم این انرژی را داراست. این جدول هم شامل ایزوتوپ‌های طبیعی و هم رادیوایزوتوپ‌ها است.

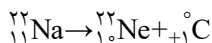
جدول ۱-۲. ایزوتوپ‌های رادیواکتیو منتخب*

ایزوتوپ	نیمه‌عمر	تابش‌های اصلی (MeV، نوع)
نوترون	۱۰٫۳ min	β ، ۰٫۷۸۲
تریتیوم (H-۳)	۱۲٫۳۲ y	β ، ۰٫۰۱۸۶۰
کربن-۱۴	۵۷۱۵ y	β ، ۰٫۱۵۶۵
نیتروژن-۱۶	۷٫۱۳ s	β ، ۴٫۲۷ ، ۰٫۴۴ : γ ، ۶٫۱۲۹
سدیم-۲۴	۱۴٫۹۶ h	β ، ۱٫۳۸۹ : γ ، ۱٫۳۶۹ ، ۲٫۷۵۴
فسفر-۳۲	۱۴٫۲۸ d	β ، ۱٫۷۱۰
پتاسیم-۴۰	$۱٫۲۶ \times ۱۰^9$ y	β ، ۱٫۳۱۲
آرگون-۴۱	۱٫۸۲ h	β ، ۱٫۱۹۸ : γ ، ۱٫۲۹۴
کبالت-۶۰	۵٫۲۷۱ y	β ، ۰٫۳۱۵ : γ ، ۱٫۱۷۳ ، ۱٫۳۳۲

ایزوتوپ	نیمه عمر	تابش های اصلی (MeV، نوع)
کریپتون-۸۵	۱۰/۷۳ y	β ، ۰/۶۸۷ : Y، ۰/۵۱۴
استرونسیم-۹۰	۲۹/۱ y	β ، ۰/۵۴۶
تکنسیم-۹۹m	۶/۰۱ h	β ، ۰/۱۴۲
ید-۱۲۹	$۱/۷ \times 10^7$ y	β ، ۰/۱۵
ید-۱۳۱	۸/۰۴۰ d	β ، ۰/۶۰۶
زنون-۱۳۵	h ۹/۱۰	β ، ۰/۹۱ : Y، ۰/۲۵۰
سزیم-۱۳۷	۳۰/۳ y	β ، ۰/۵۱۴ : Y، ۰/۶۶۲
رادون-۲۲۲	۳/۸۲۳۵ d	α ، ۵/۴۹۰
رادیوم-۲۲۶	۱۵۹۹ y	α ، ۴/۷۸۴
اورانیوم-۲۳۵	$۷/۰۴ \times 10^8$ y	α ، ۴/۳۹۵
اورانیوم-۲۳۸	$۴/۴۶ \times 10^9$ y	α ، ۴/۱۹۶
پلوتونیوم-۲۳۹	$۲/۴۱۱ \times 10^4$ y	α ، ۵/۱۵۶

*David R. Lide, Editor, CRC Handbook of Chemistry and Physics, 8th Edition, 1999-2000, CRC Press, Boca Raton, 1999.

تبدیل یک نوترون به یک پروتون و یک الکترون را می توان اساس انتشار پرتو β در هسته های رادیواکتیو دانست. اکثر رادیوایزوتوپ ها در طبیعت عناصر سنگین می باشند. یکی از موارد استثنا پتاسیم-۴۰ با نیمه عمر $10^9 \times 1/26$ سال و با فراوانی ۰/۱۱۷ درصد، در پتاسیم طبیعی است. دیگر استثناها کربن-۱۴ و هیدروژن-۳ (تریتیم) هستند که به طور مداوم و به مقدار کم توسط واکنش های هسته ای طبیعی تولید می شوند. هر سه رادیوایزوتوپ در گیاهان و حیوانات یافت می شوند. علاوه بر رادیوایزوتوپ هایی که اشعه بتا یا آلفا می دهند، گروه بزرگی از ایزوتوپ های مصنوعی هستند که با نشر یک پوزیترون^۱ تلاشی می کنند پوزیترون همان جرم و بار الکترون را دارد اما بار آن مثبت است، مثال چنین ایزوتوپی سدیم-۲۲ است که با نیمه عمر ۲/۶ سال تبدیل به ایزوتوپ نئون می شود به این قرار:



در حالی که الکترون که به آن نگاترون^۲ هم می گویند، بخش طبیعی هر اتم است؛ اما پوزیترون چنین نیست و به آن ضد ذره^۳ می گویند. چون خواص مخالف ذره

1. Positron
2. Negatron
3. Antiparticle

طبیعی را دارا می‌باشد. همان‌طور که ذرات ماده را تشکیل می‌دهند ضد ذره‌ها ضد ماده^۱ را می‌سازند.

واکنش سدیم-۲۲ فوق را می‌توان تبدیل یک پروتون به نوترون از طریق رها کردن یک پوزیترون با استفاده از انرژی اضافی در هسته «مادر» به حساب آورد. این مثالی از تبدیل انرژی به جرم است. معمولاً جرم به صورت جفت ذراتی با بار مخالف ظاهر می‌شود. جفت الکترون-پوزیترون مثالی از آن‌ها است. یک الکترون و یک پوزیترون با هم ترکیب شده و هر دو نابود می‌گردند و دو اشعه گاما می‌دهند. یک هسته می‌تواند از انرژی داخلی اضافی‌اش با نشر اشعه گاما رهایی یابد، اما در یک فرایند جایگزین به نام «تبدیل داخلی»^۲ انرژی مستقیماً به یکی از الکترون‌های اتمی منتقل می‌شود و آن را از اتم به خارج پرتاب می‌کند. در فرایند معکوس به نام گیرش K، هسته به‌طور ناگهانی یکی از الکترون‌های مدار خودش را جذب می‌کند و هر یک از این فرایندها تولید اشعه را در پی دارد، که از پر شدن لایه داخلی ناشی می‌شود. فرمول N/N_0 خیلی برای محاسبات راحت نیست مگر وقتی که t مضرب صحیحی از t_H باشد. با تعریف ثابت تلاشی λ به صورت شانس تلاشی یک هسته مفروض در هر ثانیه، یک فرمول توانی^۳ (نمایی)^۴ معادل برای تلاشی عبارت از:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad (6-1)$$

$\lambda = 0.693/t_H$ به دست می‌آید. برای روشن شدن مطلب، نسبت N/N_0 را پس از گذشت ۲ سال برای کبالت-۶۰ با نیمه عمر ۵/۲۷ سال محاسبه می‌گردد. این رادیوایزوتوپ مصنوعی دارای کاربردهای فراوان پزشکی و صنعتی است. واکنش عبارت است از:



که در آن انرژی اشعه گاما، ۱/۱۷ و ۱/۳۳ MeV و ماکزیمم انرژی بتا ۰/۳۱۵ MeV است.

1. Antimatter

2. Internal Conversion

۳. اگر شانس تلاشی یک هسته در یک ثانیه باشد، آنگاه شانس اینکه در فاصله زمانی dt تلاشی کند λdt است. برای N تغییر در تعداد هسته‌ها $dN = -\lambda N dt$ است. با انتگرال‌گیری و فرض اینکه تعداد هسته‌ها در زمان صفر،

N_0 باشد به فرمول بالا می‌رسیم. توجه کنید که اگر ${}^1_0\text{H}$ باشد $e^{-\lambda t} = (1/2)^{t/t_H}$ و $\lambda = (\log 2)/t_H$.

4. Exponential Formula

$\lambda = 0.693 / (1.67 \times 10^8)$ یعنی $\lambda = 4.15 \times 10^{-9} s^{-1}$ و از آنجا که $t = 6.32 \times 10^7 s$ است λt برابر 0.262 و $N/N_0 = e^{-0.262} = 0.77$ می شود.

تعداد تلاشی ها در ثانیه (dis/sec) یک رادیوایزوتوپ را اکتیویته A می نامند. از آنجا که ثابت تلاشی λ شانس تلاشی هسته در هر ثانیه است برای N هسته اکتیویته حاصل ضرب $A = \lambda N$ است.

برای یک نمونه کبالت-۶۰ به وزن $1 \mu g$ ، که 10^{16} اتم دارد، داریم:

$$A = (4.15 \times 10^{-9})(10^{16}) = 4.15 \times 10^7 \text{ dis/sec}$$

واحد dis/sec را بکرل^۱ (Bq) می نامند که به افتخار دانشمندی که رادیواکتیویته را کشف کرد نام گذاری شده است. واحد قدیمی تر اکتیویته که معمول است کوری^۲ (Ci) می باشد که از روی اسم دانشمندان فرانسوی ماری کوری^۳ که روی رادیم کار کردند نام گذاری شده است. کوری $10^{10} \times 3.7$ تلاشی در ثانیه (dis/sec) است، که اکتیویته یک گرم رادیم است که در آن اوایل اندازه گیری شده. نمونه کبالت ما «قدرتی^۴» برابر $1/1 \text{ Mci}$ یا 0.011 Ci $= (3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}) / (4.15 \times 10^7 \text{ Bq})$ دارد.

نیمه عمر، نشان دهنده این است که چقدر طول خواهد کشید تا نصف هسته ها تلاشی کنند، درحالی که کمیت دیگری که به آن مرتبط است «عمر متوسط»^۵ نام دارد که با τ (tau) نمایش می دهند و برابر با زمان متوسطی است که برابر تلاشی یک هسته لازم است. τ برابر $1/\lambda$ یعنی $t_{1/2} = 0.693$ به دست می آید. برای $Co-60$ مقدار τ برابر $6/7y$ (سال) است. با استفاده از برنامه کامپیوتری Lotus 1-2-3 می توان اکتیویته را محاسبه کرد و جزئیات محاسبات تلاشی رادیواکتیو در برنامه DECAY به زبان BASIC ارائه شده است. در این برنامه، فرمول ها، محاسبات و منحنی تلاشی نشان داده می شود.

۱-۳ زنجیره های رادیواکتیو

هسته های رادیواکتیو در فرایندهای بسیاری دیده می شوند. آن ها ممکن است از بمباران

1. Becquerel
2. Curie
3. Pierre And Marie Curie
4. Strength
5. Mean Life