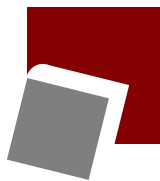


وزارت علوم، تحقیقات و فناوری  
دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه  
گاوزنگ - زنجان



# مطالعه اثر تابش اشعه نوترون بر تغییر خواص زینک دی آلکیل دی تیو فسفات

پایان نامه کارشناسی ارشد

فاطمه حسینی اصل

استاد راهنما: دکتر رسول خدا بخش

استاد مشاور: دکتر بابک کبودین

آذر ۱۳۹۱



تقدیم بہ  
ساحت مقدس چہارده معصوم علیہم السلام  
پدر و مادر عزیز  
و  
ہمسفر مہربانم...

الهی

عاجز و سرگردانم، نه آنچه دانم، دارم و نه آنچه دارم، دانم...

خالصانه‌ترین حمد و سپاس برای خدای بزرگ و مهربانم که هر چه دارم از اوست.

در آغاز وظیفه خود می‌دانم از زحمات استاد راهنمای بزرگوارم، جناب آقای دکتر رسول خدابخش، صمیمانه تشکر و قدردانی کنم که با وجود کمبود وقت همواره پاسخگوی من بوده‌اند. همچنین از زحمات استاد مشاور محترم جناب آقای دکتر بابک کیودین سپاسگزارم که قطعاً بدون راهنمایی‌های ارزنده این دو بزرگوار، این مجموعه به انجام نمی‌رسید. از خداوند منان برای ایشان سلامتی و سعادت آرزو مندم.

از مادر عزیزم، اسوه‌ی صبر و پدر مهربانم، کوه استقامت، سپاسگزارم که در همه مراحل زندگی و تحصیل همواره مشوق و پشتیبانم بوده‌اند و با گذشت و فداکاری از آرزوهایشان در برابر آرزوهایم گذشته‌اند. از خواهران عزیزم به پاس عاطفه‌ی سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که همیشه برای ادامه تحصیل حامی من بوده‌اند تشکر می‌کنم.

از همسر بزرگوارم جناب آقای سجاد احمدی که در همین مدت کوتاه همواره پشتیبان من بوده‌اند و با وجود مشغله‌ی زیاد درسی در روزهای سخت نزدیک به دفاعیه یاری‌ام کردند.

از زحمات استاد بزرگوار جناب آقای دکتر نجف‌پور بی‌نهایت سپاسگزارم.

از دوست عزیزم خانم سکینه عبدی‌زاده و تمام دوستانی که در این مدت مرا همراهی کردند تشکر و قدردانی می‌نمایم.

در پایان سپاس تمام کسانی را که افق‌های کرانه‌ی ناپیدای علم را نشانم دادند.

## چکیده

در این رساله اثر تابش نوترون بر روی سه استخلاف از ماده آلی «زینک دی‌آلکیل دی‌تیو فسفات» با دوزهای  $0.8 \text{ kGy}$  و  $1.5 \text{ kGy}$  مورد مطالعه قرار گرفته است. در این تحقیق از روش‌های طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی (UV-Vis)، طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) و طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای (NMR) در مطالعه‌ی تغییرات ماده‌ی ذکر شده، استفاده شده است.

نتایج حاصل از طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز نشان می‌دهد که ماده‌ی مورد نظر پس از تابش دچار تغییراتی در ساختار شیمیایی شده است. طیف‌های حاصل از طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای نشان می‌دهد که جزء حل‌پذیر ماده‌ی مورد نظر هیچ‌گونه تغییر ساختاری نداشته است و ساختار اولیه‌ی ماده بدون تغییر باقی مانده است. طیف حاصل از طیف‌سنجی فرابنفش-مرئی نیز نشان می‌دهد که با تابش نوترون بر ماده، ساختار الکترونی ماده دچار تغییر شده است. در حقیقت تابش بر استخلاف‌هایی که پایداری کمتری دارند اثر بیشتری گذاشته است.

**واژه‌های کلیدی:** زینک دی‌آلکیل دی‌تیو فسفات، تابش نوترون، طیف‌سنجی مادون قرمز، طیف‌سنجی

فرابنفش-مرئی، طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای

# فهرست

پنج	چکیده	.....
۱	پیش‌گفتار	.....
۲	مروری بر فیزیک هسته‌ای	۱
۵	۱.۱ کشف نوترون	.....
۷	۲.۱ پرتوزایی	.....
۸	۳.۱ چشمه‌های نوترون	.....
۹	۱.۳.۱ چشمه‌ی $(\alpha - Be)$	.....
۱۱	۲.۳.۱ چشمه‌ی فوتونوترون	.....
۱۲	۳.۳.۱ شکافت خودبه‌خود	.....
۱۲	۴.۳.۱ واکنش‌های هسته‌ای	.....
۱۳	۵.۳.۱ چشمه رآکتور	.....
۱۳	۴.۱ برهمکنش و جذب نوترون	.....
۱۳	۱.۴.۱ پراکندگی کشسان	.....
۱۴	۲.۴.۱ پراکندگی غیرکشسان	.....
۱۴	۵.۱ شکافت	.....

۱۵	۶.۱	اثرات تابش‌های هسته‌ای بر ساختار داخلی مواد
۲۲	۷.۱	برخی کاربردهای ایجاد نقص‌ها در بلور
۲۴	۲	مواد، دستگاه‌ها و روش کار
۲۷	۱.۲	زینک دی‌آلکیل دی‌تیو فسفات
۲۸	۲.۲	شیمی زینک دی‌آلکیل دی‌تیو فسفات
۳۰	۳.۲	تابش‌دهی و معرفی دستگاه‌ها
۳۱	۳	نتایج و بحث
۳۲	۱.۳	مطالعه‌ی طیف‌سنجی FTIR
۳۳	۱.۱.۳	بررسی طیف زینک دی (۲-پروپیل) دی‌تیو فسفات
۳۷	۲.۱.۳	بررسی طیف زینک دی (۲-بوتیل) دی‌تیو فسفات
۴۰	۳.۱.۳	بررسی طیف زینک دی اتیل دی‌تیو فسفات
۴۲	۴.۱.۳	نتیجه‌گیری
۴۳	۲.۳	مطالعه‌ی طیف‌سنجی NMR
۴۳	۱.۲.۳	بررسی طیف زینک دی (۲-پروپیل) دی‌تیو فسفات
۴۶	۲.۲.۳	بررسی طیف زینک دی (۲-بوتیل) دی‌تیو فسفات
۴۸	۳.۲.۳	بررسی طیف زینک دی اتیل دی‌تیو فسفات
۵۰	۴.۲.۳	نتیجه‌گیری
۵۱	۳.۳	مطالعه‌ی طیف‌سنجی UV-Vis
۵۱	۱.۳.۳	بررسی طیف زینک دی (۲-پروپیل) دی‌تیو فسفات
۵۲	۲.۳.۳	بررسی طیف زینک دی (۲-بوتیل) دی‌تیو فسفات
۵۳	۳.۳.۳	بررسی طیف زینک دی اتیل دی‌تیو فسفات
۵۴	۴.۳	نتیجه‌گیری

۵۵	آ طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز
۵۸	ب طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای [۳۳، ۳۱]
۵۹	ب.۱ طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای پروتون ( $^1\text{H-NMR}$ )
۶۲	ب.۱.۱ محیط شیمیایی و تغییر مکان شیمیایی
۶۳	ب.۱.۲ قاعده‌ی (n+1) شکافت اسپین-اسپین
۶۴	ج طیف‌سنجی فرابنفش [۳۱]
۶۵	ج.۱ برانگیختگی الکترونی
۶۶	ج.۱.۱ منشاء ساختمان نوار UV
۶۸	ج.۱.۲ اصول طیف‌سنجی جذبی
۶۹	ج.۱.۳ دستگاه طیف‌سنج فرابنفش-مرئی
۷۰	ج.۱.۴ حلال‌ها
۷۳	مراجع



## پیش‌گفتار

تابش‌های هسته‌ای باعث تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی در مواد می‌شوند. بمباران مواد توسط نوترون‌ها، پروتون‌ها، اشعه‌های آلفا، بتا و گاما باعث تغییر خواص مکانیکی (آسیب‌های تشعشعی) و تغییر خواص فیزیکی دیگر، مانند تغییر ساختار بلور، خواص حرارتی، خواص اپتیکی و خواص مغناطیسی می‌گردد. موادی که در تکنولوژی‌هایی از قبیل نیروگاه‌های هسته‌ای و فضاپیماها استفاده می‌شوند، به‌طور مرتب تحت تابش پرتوها قرار می‌گیرند و تغییر خواص آن‌ها عاملی برای محدود نمودن عمر وسایل ساخته شده از آن مواد است. از طرفی جایگزینی برخی از مواد توسط موادی که تهیه آن آسان‌تر، ارزان‌تر و با کارایی مشابه یا بهتر است، از اهداف محققین در توسعه تکنولوژی است. مواد آلی علاوه بر استفاده‌ی گسترده در تولیدات صنعتی، به دلیل دارا بودن کربن و توانایی جامد شدن، می‌توانند در برخی از نیروگاه‌های هسته‌ای با توان متوسط، به عنوان کندکننده نیز مورد استفاده قرار گیرند.

# فصل اول

## مروری بر فیزیک هسته‌ای

تاریخ آغاز فیزیک هسته‌ای را می‌توانیم از کشف پرتوزایی توسط بکرل<sup>۱</sup> در سال ۱۸۹۶ میلادی یا ظهور فرضیه رادرفورد مبنی بر وجود هسته در اتم‌ها در سال ۱۹۱۱ میلادی بگیریم. به روشنی معلوم است که مطالعات تجربی و نظری فیزیک هسته‌ای نقش برجسته‌ای در توسعه فیزیک قرن ۲۰ ایفا کرده است [۱].

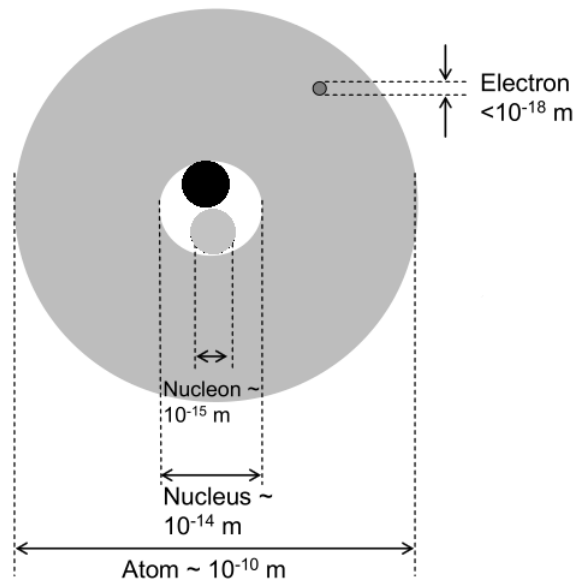
برطبق مدل رادرفورد-بوهر<sup>۲</sup> از اتم، اتم شامل یک هسته مرکزی است. الکترون‌ها در اطراف هسته اتم در سطوح انرژی مشخصی قرار دارند و در این سطوح دور هسته اتم در حال چرخش هستند.

هسته از دو نوع ذره پروتون و نوترون تشکیل شده است. پروتون‌ها بار مثبت و نوترون‌ها بدون بار هستند. پروتون و نوترون را هستک یا نوکلئون می‌گویند. هر نوع هسته‌ای را با تعداد کل واحدهای جرمی موجود در هسته مشخص می‌کنیم. بار کل هسته برابر  $+Ze$  است که در آن  $Z$  عدد اتمی و  $e$  بزرگی بار الکترون است.

---

<sup>۱</sup> Antoine Henri Becquerel

<sup>۲</sup> Rutherford-Bohr



شکل ۱.۱: طرح شماتیک از یک اتم، نشان دهنده‌ی اندازه‌ی اتم، الکترون، هسته و هستک‌ها [۲].

بنابراین هسته‌ای که عدد اتمی آن  $Z$  است شامل  $Z$  پروتون است و بدین سان در ساختار هر اتم خنثی باید  $Z$  الکترون منفی هم وجود داشته باشد. چون جرم الکترون در مقایسه با جرم پروتون ناچیز است ( $m_p \simeq 2000 m_e$ ) اغلب در بحث جرم اتمی می‌توان از جرم الکترون صرف‌نظر کرد.

تعداد نهایی هستک‌ها در هسته عدد جرمی نامیده شده و با  $A$  نشان داده می‌شود که  $A=Z+N$  است. تعداد نوترون‌ها در هسته ثابت نیست و لزومی ندارد که برای همه‌ی اتم‌های یک عنصر شیمیایی تعداد نوترون‌ها یکسان باشد. چون تعداد نوترون‌ها خواص شیمیایی را (به طور جدی) تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. اتم‌هایی که تعداد  $Z$  یکسان و تعداد  $N$  متفاوت است (بنابراین  $A$  متفاوت است)، ایزوتوپ<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. پس ویژگی‌های هر اتم توسط عدد اتمی  $Z$  و عدد جرمی  $A$  تعیین می‌شود. می‌توان از نمادگذاری زیر استفاده کرد:

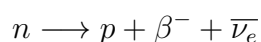


$X$  نماد شیمیایی عنصر است. مثل  $H$  برای هیدروژن،  $He$  برای هلیوم. عدد جرمی در گوشه‌ی بالای

<sup>۱</sup> Isotope

سمت چپ نماد شیمیایی و عدد اتمی در گوشه‌ی پایین سمت چپ نماد قرار می‌گیرند. چون خواص شیمیایی عنصر کاملاً به عدد اتمی آن عنصر بستگی دارد، هر عنصر شیمیایی یک مقدار منحصر به فرد برای  $Z$  دارد و غالباً این عدد در پایین عنصر نوشته نمی‌شود. یعنی ممکن است به جای  ${}^{12}C$  فقط  ${}^{12}C$  را بنویسیم. علاوه بر این یک هسته می‌تواند مقداری انرژی اضافه داشته باشد که در این صورت با نماد  ${}^{12}C^*$  نمایش داده شده و به آن ایزومر<sup>۱</sup> می‌گویند. انرژی اضافی را می‌توان نوعی رادیواکتیویته دانست که در این حالت ایزومر به یک هسته در حالت پایه تبدیل می‌شود.

پایداری هسته تعادل بین دو نیروی الکتریکی و نیروی قوی<sup>۲</sup> در داخل هسته را نشان می‌دهد. دو پروتون با بار مثبت یکدیگر را با نیروی الکتریکی دفع می‌کنند. به علاوه این دو توسط نیروی قوی به هم جذب می‌شوند، که این نیرو فقط زمانی که دو پروتون در فاصله‌ی کوتاهی در کنار هم قرار گرفته‌اند عمل می‌کند. در حقیقت نیروی بین هستک‌ها جاذبه‌ی قوی کوتاه برد و اشباع است و هر هستک با هستک‌های همجوار خود پیوند تشکیل می‌دهد و نیرو با هستک همسایه بعدی صفر است. پس نیروی بین هستک‌ها در فواصل کوتاه قوی‌تر از نیروی کولنی است چون نیروی هسته‌ای می‌تواند بر دافعه‌ی کولنی پروتون‌ها غلبه کند. نیروی هسته‌ای در فواصل بلند در حدود ابعاد اتمی قابل صرف‌نظر کردن است و برهمکنش هسته‌های موجود در یک مولکول با هم فقط بر اساس نیروی کولنی قابل درک است. نوترون‌ها در خارج از هسته ناپایدارند و نیمه عمر آن ۱۲ دقیقه و تابش کننده‌ی  $\beta^-$  هستند. به عبارت دیگر هر نوترون با تابش یک  $\beta^-$  و یک پادنوترینو به پروتون تبدیل می‌شود:



در هسته‌های سبک تعداد نوترون و پروتون برابر و هسته پایدار است ( $\frac{N}{Z} = 1$ ) ولی در هسته‌های سنگین مثل  ${}^{238}U$  این کسر بیشتر از یک است. حال اگر مقدار نوترون‌های موجود از این مقدار هم بیشتر شود در این صورت واپاشی صورت می‌گیرد.

<sup>۱</sup> Isomer

<sup>۲</sup> Strong Force

## ۱.۱ کشف نوترون

در سال ۱۹۲۰ میلادی، رادرفورد اظهار داشت که پروتون درون هسته ممکن است دارای یک الکترون باشد. در چنین حالتی این الکترون چنان محکم به آن بسته شده است که یک ذره خنثی ایجاد کرده است. رادرفورد حتی برای این ذره فرضی نام نوترون به معنای خنثی را پیشنهاد کرد. تحقیق در یافتن نوترون تا سال ۱۹۳۲ میلادی به دو دلیل ناموفق ماند. اول آن که دانشمندان نمی‌توانستند ماده‌ی طبیعی پیدا کنند که گسیل‌کننده‌ی نوترون باشد و دیگر آن که روش‌هایی که برای آشکارسازی ذرات اتمی به کار برده می‌شد، همگی به آثار بار الکتریکی ذرات بستگی داشت.

اولین مشاهده‌ی تجربی نوترون در سال ۱۹۳۰ میلادی روی داد. بوته<sup>۱</sup> و بکر<sup>۲</sup> دریافتند که وقتی هدف‌هایی از بور و بریلیم توسط ذرات آلفا بمباران شوند، تابش‌هایی از آن‌ها گسیل می‌شود که نافذ هستند. در آن موقع به نظر می‌رسید که از نوع پرتوهای گاما هستند، زیرا این پرتوها فاقد بار الکتریکی بودند. به زودی فردریک ژولیو<sup>۳</sup> و ایرن کوری<sup>۴</sup> به بررسی جذب تابش مذکور در پارافین پرداختند. پارافین ماده‌ی غنی از هیدروژن است. آن‌ها دریافتند که وقتی این تابش با پارافین برخورد کند، پروتون پرنرژی گسیل می‌شود.

آن‌ها با توجه به برد این پروتون‌ها، انرژی‌شان را مساوی  $\frac{5}{3}$  مگاالکترون‌ولت تعیین کردند. همچنین بر اساس قوانین پایستگی انرژی و اندازه حرکت در فیزیک کلاسیک، این فرض را بنا نهادند که ماهیت تابش حاصل از بمباران بریلیم Be نوترونی است که بار صفر و جرمی برابر  $1u$ <sup>۵</sup> دارد. به عبارت دیگر وقتی بریلیم با ذره آلفا بمباران شود، واکنش هسته‌ای صورت گرفته و نوترون تولید می‌شود. وقتی که

---

<sup>۱</sup> W. Bothe

<sup>۲</sup> H. Becker

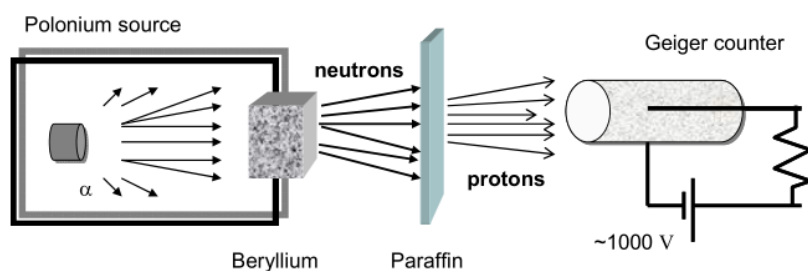
<sup>۳</sup> Frederic Joliot

<sup>۴</sup> Irene Curie

<sup>۵</sup>  $u$  یکای اندازه‌گیری برای جرم در مقیاس‌های اتمی یا مولکولی است و معادل  $1.66053886 \times 10^{-27} \text{kg}$  است. [۳].

نوترون‌ها در درون پارافین راه می‌یابند، به صورت تصادفی با هسته‌های هیدروژن برخورد‌های رودرو انجام داده و پروتون‌های پس زده شده به دلیل یونشی که ایجاد می‌کنند، مشاهده می‌شوند. چنین نوترون‌هایی بنا به فرض چادویک، به علت آن که بار الکتریکی ندارند، بدون آن که انرژی خود را از دست بدهند، در اجزای ماده متراکمی همچون سرب نفوذ می‌کنند.

هرگاه تابش تحت مطالعه پرتو گاما می‌بود، پروتون‌ها می‌بایست در اثر برخورد کامپتون‌گونه از پارافین کنده می‌شدند. با استفاده از فرمول پراکندگی کامپتون نشان داده شد که انرژی تابش گاما باید حداقل برابر ۵۵ مگاالکترون‌ولت باشد تا بتواند چنین پروتون‌هایی را آزاد سازد. به نظر می‌رسید که پرتو گامای گسیل شده با این انرژی، غیرمحمتمل است. در سال ۱۹۳۲ میلادی، جیمز چادویک<sup>۱</sup>، با فراهم ساختن تفسیر صحیح موفق شد هویت تابش نامعلوم را به این صورت مشخص سازد، که شامل ذرات خنثی ( بنابراین نافذ) با جرمی تقریباً مساوی جرم پروتون است. بنابراین در یک برخورد رودرو، نوترون  $5/3$  مگاالکترون‌ولت می‌توانست انرژی خود را کاملاً به پروتون برخورد شونده منتقل سازد. چادویک با آزمایش‌های اضافی پس‌زنی با نوترون‌ها، فرضیه خود را تأیید کرد. از این‌رو او را به عنوان کاشف نوترون می‌شناسند.



شکل ۲.۱: چیدمان آزمایشگاهی برای کشف نوترون در سال ۱۹۳۲ میلادی [۲].

همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، نوترون آزاد در مقابل واپاشی بتازا، ناپایدار است و نیمه عمری در حدود ۱۲ دقیقه دارد. نوترون مقید ممکن است از طول عمر بسیار زیاد (حتی پایدار) یا عمر بسیار کوتاه برخوردار باشد. علی‌رغم ناپایداری نوترون‌های آزاد، خواص و ویژگی‌های آن‌ها، به‌خصوص گشتاور

<sup>۱</sup> James Chadwick

دوقطبی مغناطیسی آن یعنی  $\mu = -1/91304184 \pm 0/00000088 \mu_N$  و اختلاف جرم پروتون-نوترون یعنی  $m_n - m_p = 1/29340 \pm 0/000003 \text{ Mev}$  با دقت زیاد اندازه گیری شده است. تحقیقات پایه با نوترون‌ها تقریباً به روزهای اولیه‌ی فیزیک هسته‌ای برمی‌گردد. امروزه نیز فیزیک نوترون همچنان میدان تحقیقی فعال و مهیجی به‌شمار می‌رود [۱].

## ۲.۱ پرتوزایی

ماده‌ی پرتوزا ماده‌ای است که طی یک سری فعل و انفعالات خاص در هسته‌ی اتم‌های خود، پرتوها یا تابش‌های خاصی را گسیل می‌کند. همه‌ی مواد طبیعی یا مصنوعی قابلیت پرتوزایی ندارند و این قابلیت فقط در موادی مشاهده می‌شود که هسته‌ای ناپایدار دارند و برای تبدیل شدن به یک ترکیب پایدار از خود پرتوهایی را گسیل می‌کنند.

تابش‌های هسته‌ای به‌طور کلی به سه دسته پرتوهای آلفا، بتا و گاما تقسیم می‌گردند. هر ماده‌ی رادیواکتیو پرتو مشخصی را گسیل می‌کند. برای مثال هسته‌ی اتم‌های رادیوکربن پرتو بتا گسیل می‌کنند و هسته‌ی رادیوم و اورانیوم پرتو آلفا و پرتو گاما گسیل می‌کنند. مواد رادیواکتیو شامل دو دسته مواد پرتوزای طبیعی و مواد پرتوزای مصنوعی هستند. این‌که این فرآیند به‌طور خودبه‌خودی صورت گیرد یا به‌طور مصنوعی بستگی به انرژی دارد. اگر انرژی کل سیستم نهایی کمتر از سیستم اولیه باشد، گذار می‌تواند خوبه‌خود صورت بگیرد<sup>۱</sup>.

ظرف چند سال پس از کشف پرتوزایی معلوم شد که ویژه هسته‌های پرتوزای طبیعی یکی یا بیشتر از سه نوع تابشی را که از روی قابلیت نفوذشان تمیز داده می‌شوند، گسیل می‌دارند:

**پرتوهای آلفا-** که توسط ورقه‌ای از کاغذ متوقف می‌شوند.

<sup>۱</sup> از نظر انرژی، واپاشی خودبه‌خود فقط برای ذره‌ی آلفا امکان‌پذیر است [۱].

پرتوهای بتا- که توسط ورقه‌ی سربی به ضخامت  $\frac{1}{16}$  اینچ متوقف می‌شوند.  
پرتوهای گاما- که می‌توانند در چندین اینچ از سرب نفوذ کنند.

آزمایش‌های ماهرانه و دقیقی که از سوی بسیاری از محققین به عمل آمد نشان داد که در حقیقت پرتوهای آلفا هسته‌ی  ${}^4\text{He}$ ، پرتوهای بتا از جنس الکترون و پرتوهای گاما تشعشعات الکترومغناطیسی هستند [۴].

در فرآیند واپاشی  $\alpha$  و  $\beta$  یک هسته‌ی ناپایدار برای رسیدن به هسته‌ی پایدارتر یک ذره‌ی  $\alpha$  یا  $\beta$  گسیل می‌کند. در فرآیند واپاشی  $\gamma$  یک حالت برانگیخته بدون هیچ‌گونه تغییر هسته‌ای به حالت پایه واپاشیده می‌شود. اغلب ویژه‌هسته‌های با  $A > 150$  نسبت به واپاشی آلفا ناپایدارند. برای ویژه‌هسته‌های سبک‌تر احتمال واپاشی آلفا بسیار کم است. بسیاری از هسته‌های سنگین به‌خصوص هسته‌های مربوط به سری‌های رادیواکتیو طبیعی با گسیل آلفا واپاشیده می‌شوند. گسیل هر نوع نوکلئون دیگر در فرآیند واپاشی رادیواکتیو خودبه‌خود، بسیار به ندرت اتفاق می‌افتد.

گسیل آلفا به علت دافعه‌ی کولنی است. اهمیت این موضوع در مورد ذرات سنگین بیشتر است چون آهنگ افزایش نیروی دافعه‌ی کولنی به‌صورت تابعی از  $Z^2$  است و نیروی بستگی هسته متناسب با  $A$  است. پس نیروی دافعه‌ی کولنی به مراتب بیشتر از بستگی هسته خواهد بود و در نتیجه  $\alpha$  گسیل می‌شود [۱].

## ۳.۱ چشمه‌های نوترون

باریکه‌های نوترونی را می‌توان در انواع مختلف واکنش‌های هسته‌ای ایجاد کرد. رده بندی واکنش‌های هسته‌ای برای تولید نوترون به صورت زیر است:







در واکنش‌های بالا  $Q$  گرمای واکنش است که بسته به نوع واکنش ممکن است مثبت یا منفی باشد. نوترون‌ها را نمی‌توان همانند ذرات باردار شتاب داد ولی می‌توان از نوترون‌های با انرژی بالا شروع کرده و انرژی آن‌ها را از طریق برخوردهای با هسته‌های مواد مختلف کاهش داد. این فرآیند کاهش انرژی را «کند سازی» نوترون می‌نامند. نوترون‌های حاصل می‌توانند انرژی‌های خیلی پایینی داشته و به‌طور قراردادی با اسامی زیر نامیده می‌شوند [۱]:

$$E \leq 0.001 \text{ eV} \quad \text{فوق‌سرد}$$

$$E \simeq 0.025 \text{ eV} \quad \text{حرارتی}$$

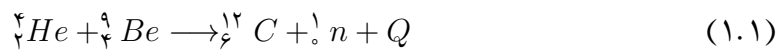
$$E \sim 1 \text{ eV} \quad \text{گرمایی}$$

$$E \sim 1 \text{ keV} \quad \text{شبه‌حرارتی}$$

$$E = 100 \text{ keV} - 10 \text{ MeV} \quad \text{تند}$$

### ۱.۳.۱ چشمه‌ی $(\alpha - Be)$

برای ایجاد چشمه‌ی نوترون در آزمایشگاه، از واکنش به‌کاررفته در کشف نوترون می‌توان استفاده کرد. همان‌طور که در پیش‌تر ذکر شد، در این واکنش بریلیم توسط ذره آلفا بمباران می‌شود. ایزوتوپ پایدار بریلیم،  ${}^9_4 Be$  دارای یک نوترون مقید نسبتاً سست با انرژی بستگی  $1.7$  مگاالکترون‌ولت است. ذره‌ی آلفا از واپاشی پرتوزا به‌دست آمده که انرژی حدود  $(6 - 5) \text{ MeV}$  دارد. وقتی این ذره به هسته  ${}^9_4 Be$  برخورد کند، یک نوترون می‌تواند آزاد شود.



مقدار  $Q$  برای این واکنش مساوی  $5.7\text{MeV}$  است.

اگر یک ماده گسیل کننده  $\alpha$  با طول عمر طولانی، مانند  ${}^{226}\text{Ra}$  را با  ${}^9\text{Be}$  مخلوط کنیم، نوترون با آهنگ ثابتی تولید خواهد شد. از  ${}^{226}\text{Ra}$  و دخترانش ذرات آلفایی گسیل می‌شوند که انرژی‌شان در حدود  $(5 - 8\text{MeV})$  است و از این رو نوترون‌هایی در اختیار خواهیم داشت که طیف انرژی آن‌ها تا حدود  $13\text{MeV}$  می‌رسد.

نوترون‌های تولید شده از این روش، به دلایل زیر تک انرژی نیستند:

۱- استفاده از چند گروه  $\alpha$

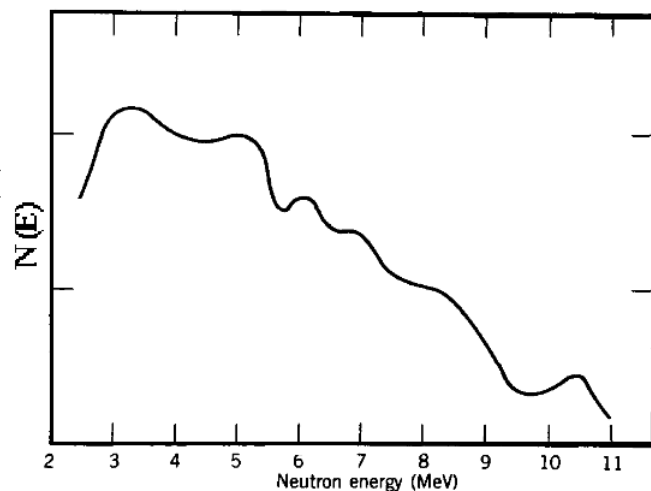
۲- کند شدن ذرات  $\alpha$  در اثر برخورد با ماده‌ی جامد

۳- راستاهای مختلف گسیل نوترون‌ها نسبت به ذرات آلفا که راستاهایشان را نمی‌شناسیم

۴- امکان تولید  ${}^{12}\text{C}$  در حالت برانگیخته

محتمل‌ترین انرژی نوترون حدود  $5\text{MeV}$  و آهنگ تولید در حدود  $10^7$  نوترون در ثانیه به ازای هر کوری از  ${}^{226}\text{Ra}$  است. در شکل زیر طیف نوعی نوترون نشان داده شده‌است.

به دلیل این که در واکنش رادیوم-بریلیم گسیل بالای گاما از  ${}^{226}\text{Ra}$  و دخترانش ناشی می‌شود، می‌توان چشمه‌ی نوترون رادیوم-بریلیم را با چشمه‌های دیگری جایگزین کرد. در این چشمه‌ها از  ${}^{210}\text{Po}$  ( $138d$ ) و  ${}^{238}\text{Pu}$  ( $86y$ ) و  ${}^{241}\text{Am}$  ( $433y$ ) استفاده می‌شود. قدرت این چشمه‌ها در حدود  $10^6 \times 2 - 3$  نوترون در ثانیه به ازای هر کوری از فعالیت آلفا است [۱].



شکل ۳.۱: طیف انرژی نوترون حاصل از یک چشمه‌ی  $Ra - Be$  که با شمارش پس‌زنی پروتون اندازه‌گیری شده‌است. چندین گروه نوترون حضور دارند که از برهمکنش‌های ذرات آلفای با انرژی‌های مختلف حاصل می‌شوند و در آن‌ها  $^{12}C$  در حالت پایه یا در حالات برانگیخته  $3.43 MeV$  یا  $7.6 MeV$  تولید می‌شود [۱].

### ۲.۳.۱ چشمه‌ی فوتونوترون

می‌توان از واکنش  $(\gamma, n)$  به‌عنوان چشمه‌های نوترون برای تولید نوترون استفاده کرد. مزیت ایجاد فوتونوترون آن است که می‌توان نوترون‌ها را خیلی بیشتر تک انرژی ساخت، به‌خصوص اگر چشمه‌ی فوتون تقریباً تک انرژی باشد. مثلاً  $^{24}Na$  پرتو گامای با انرژی  $2.76 MeV$  گسیل می‌کند. جذب این فوتون برای غلبه بر انرژی بستگی نوترون در  $^9Be$  کافی خواهد بود.



بهره‌ی این فرآیند قابل قبول است ( $2 \times 10^6$  نوترون در ثانیه به ازای هر کوری از فعالیت  $^{24}Na$ )، اما نیمه عمر  $^{24}Na$  کوتاه است ( $15h$ ). انرژی نوترون در حدود  $0.8 MeV$  است. ایزوتوپ با طول عمر بیشتر  $^{124}Sb$  ( $60d$ ) است که یک پرتو قوی گاما با انرژی اندکی بالاتر از انرژی بستگی نوترون در  $^9Be$  تولید می‌کند. انرژی نوترون گسیل شده در این فرآیند خیلی پایین‌تر و در حدود  $24 keV$  است [۱].

### ۳.۳.۱ شکافت خودبه‌خود

چشمه‌ی متداول نوترون‌های حاصل از شکافت خودبه‌خود، ایزوتوپ‌هایی نظیر  $^{252}\text{Cf}(2/65y)$  است. نوترون‌ها مستقیماً در فرآیند شکافت با آهنگی حدود ۴ نوترون در هر شکافت ایجاد می‌شوند. در مقابل هر ۳۱۳ واپاشی آلفا، ۱۰ واپاشی از نوع شکافت هسته‌ای خودبه‌خود است. این نوع شکافت فقط در حدود ۳ درصد واپاشی‌ها را تشکیل می‌دهد (و بقیه از نوع واپاشی آلفا است). آهنگ ایجاد نوترون  $2/3 \times 10^{12}$  نوترون در ثانیه به ازای هر گرم از  $^{252}\text{Cf}$  یا  $4/3 \times 10^9$  نوترون در ثانیه به ازای هر کوری از  $^{252}\text{Cf}$  است. انرژی نوترون از مشخصه‌ی شکافت است و یک توزیع پیوسته با انرژی‌های متوسط  $1 - 3 \text{ MeV}$  را نشان می‌دهد [۱].

### ۴.۳.۱ واکنش‌های هسته‌ای

از واکنش‌هایی مانند  $(\alpha, n)$ ،  $(d, n)$  و  $(p, n)$  می‌توان برای تولید نوترون استفاده کرد. این امر نیاز به یک شتاب‌دهنده برای ایجاد باریکه‌ای از ذرات دارد، تا واکنش را آغاز کنند. با این حال، با انتخاب دقیق انرژی تابشی و زاویه‌ای که در آن نوترون گسیل شده را مشاهده می‌کنیم، غالباً می‌توان باریکه‌ای تک انرژی قابل قبول را برای هر انرژی به‌دست آورد.

