بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

طراحی حفاظ بهینه برای چشمه نوترون Am-Be در شناسایی مواد منفجره به روش PGNAA

پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای

سیده حمیده کنعانی

استاد راهنما

دکتر احمد شیرانی

۱۳۹۱

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک – هسته‌ای خانم حمیده کنعانی

تحت عنوان

طراحی حفاظ بهینه برای چشمه نوترون Am-Be در شناسایی مواد منفجره به روش PGNAA

در تاریخ ۹۱/۱۰/۲۷ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر احمد شیرانی
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	مهندس مجید جلالی
۳- استاد داور	دکتر محمد حسن علامت ساز
۴- استاد داور	دکتر مریم حسنوند
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مجتبی اعلایی

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به:

همه ی کسانی که می خواهند بدانند...

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هفت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱ تحلیل روش فعال سازی نوترونی مواد حاوی نیتروژن: ۳

فصل دوم: فیزیک نوترون

۲-۱ دسته بندی نوترون ها ۶

۲-۲ چشمه های نوترون ۷

۲-۲-۱ چشمه های شکافت خود به خودی ۸

۲-۲-۲ چشمه های رادیو ایزوتوپی (α, n) ۹

۲-۲-۳ چشمه های فوتونوترون ۱۰

۲-۲-۴ شتاب دهنده های ذرات باردار ۱۲

۲-۳ برهمکنش های نوترون ۱۲

۲-۳-۱ برهمکنش های نوترون های سریع ۱۲

۲-۳-۲ برهمکنش های نوترون های کند ۱۴

۲-۳-۳ کند شدن نوترون ها ۱۴

۲-۴ سطح مقطع ها ۱۸

۲-۴-۱ سطح مقطع ماکروسکوپی ۱۹

۲-۵ آشکارسازهای نوترون ۲۰

۲-۵-۱ آشکارسازی نوترون های کند ۲۰

۲-۵-۲ آشکارسازی نوترون های سریع ۲۲

فصل سوم: طیف نگاری گاما با آشکارسازهای سوسوزن

۳-۱ بر همکنش های گاما با ماده ۲۴

۳-۱-۱ فوتوالکتریک ۲۵

۳-۱-۲ پراکندگی کامپتون ۲۵

۳-۱-۳ تولید زوج ۲۶

۳-۲ آشکارسازهای گاما ۲۷

۳-۲-۱ آشکارسازهای نیمرسانا ۲۷

۳-۲-۲ آشکارسازهای سوسوزن ۲۸

۳-۳ شکل طیف ۳۰

۳-۳-۱ پیچیدگی های تابع پاسخ ۳۲

۳-۳-۲ تابش های ثانویه تولید شده در نزدیک چشمه ۳۳

۳-۳-۳ اثرات مواد احاطه کننده ۳۳

۳-۳-۴ اثرات جمعی ۳۵
۳-۴ اثر انباشت ۳۵
۳-۴-۱ اهمیت کاهش شار گاماهای زمینه در آشکارسازی به روش PGNAA ۳۶
فصل چهارم: آنالیز به روش فعال سازی
۴-۱ تجزیه و تحلیل به روش فعال سازی نوترونی ۳۹
۴-۲ مزایا و محدودیت های آنالیز گامای آنی به روش فعال سازی نوترونی ۴۱
۴-۳ چشمه های نوترون مورد استفاده در PGNAA ۴۲
۴-۴ آشکارسازهای مورد استفاده در PGNAA ۴۳
۴-۵ کاربردهای PGNAA ۴۴
۴-۶ آشکارسازی مواد منفجره ۴۵
فصل پنجم: شبیه سازی سیستم و نتایج محاسبات
۵-۱ آشنایی با کد محاسباتی MCNP ۵۲
۵-۲ آشنایی با فایل ورودی MCNP ۵۲
۵-۲-۱ پیکره کلی یک فایل ورودی کد MCNP ۵۲
۵-۳ شبیه سازی چشمه ۵۳
۵-۴ طراحی حفاظ مناسب برای گامای چشمه ۵۷
۵-۵ شبیه سازی نمونه ۶۰
۵-۵-۱ بررسی میزان کندکنندگی نمونه ۶۰
۵-۶ طراحی کندکننده بهینه ۶۱
۵-۷ بازتاب دهنده ۶۵
فصل ششم: نتایج تجربی
۶-۱ بررسی شرایط و امکانات آزمایش ۶۹
۶-۲ شبیه سازی شرایط آزمایش ۷۰
۶-۳ آزمایشات انجام شده ۷۱
۶-۴ نتیجه گیری ۷۳
مراجع ۷۵

چکیده

تحلیل گامای آنی حاصل از فعال‌سازی نوترونی (PGNAA) یک روش غیر مخرب هسته‌ای در تشخیص عناصر موجود در مواد است. در این روش نمونه تحت تابش نوترون قرار می‌گیرد. نوترون‌ها با احتمال‌های مختلف جذب هسته‌های هدف شده و هسته مرکب را تشکیل می‌دهند. هسته مرکب تشکیل شده، انرژی بستگی نوترون جذب شده را در زمانی کمتر از 10^{-14} ثانیه به صورت یک گامای آنی آزاد می‌کند. انرژی این گاما از مشخصه‌های عنصری است که آن را آزاد کرده، بنابراین با آشکارسازی و تجزیه و تحلیل این گاما می‌توان به نوع عناصر موجود در نمونه پی برد. ابزار مورد نیاز برای آنالیز نوترونی چشمه نوترون، نمونه مورد بررسی، آشکارساز و حفاظ‌های مناسب گاما و نوترون است. هدف در این پایان‌نامه طراحی حفاظ و کندکننده با جنس و ضخامت مناسب برای چشمه نوترون Am-Be در آشکارسازی نیتروژن موجود در مواد منفجره به روش PGNAA است. چشمه Am-Be دارای یک گامای با انرژی۴/۴۳MeV حاصل از واپاشی کربن برانگیخته است و میانگین انرژی نوترون‌های این چشمه ۴/۴MeV می‌باشد. حفاظ بهینه برای این چشمه، حفاظی است که که با کاهش اثر انباشت ناشی از گاماهای چشمه و افزایش شار نوترون‌های حرارتی در نمونه، بازده PGNAA را افزایش دهد. به این منظور ابتدا با شبیه‌سازی استوانه‌های سربی با ضخامت‌های مختلف در اطراف چشمه، ضخامت مناسب برای تضعیف گامای چشمه تا ۹۰٪ را، ۵ سانتی‌متر تخمین زدیم ولی در مراحل بعدی به دلیل امکانات آزمایشگاهی استوانه مورد استفاده دارای ضخامت ۳/۵ سانتی‌متر است که شدت گامای چشمه را ۷۰٪ تضعیف می‌کند. مواد منفجره حاوی ترکیبات نیتروژن هستند. ^{14}N نوترون‌های حرارتی را با سطح مقطع حدود ۰/۷۵ بارن جذب کرده و گامای آنی با انرژی MeV ۱۰/۸۳ گسیل می‌کند. بنابراین برای افزایش شارنوترون‌های حرارتی در نمونه، سه کندکننده آب، پلی‌اتیلن و گرافیت با ضخامت‌های مختلف شبیه‌سازی شدند و با توجه به شدت گامای MeV ۱۰/۸۳ رسیده به آشکارساز ضخامت و هندسه‌ی بهینه برای کندکننده تعیین گردید. هندسه بهینه به شکل یک پوسته مکعب مستطیلی است که اطراف چشمه قرار می‌گیرد. ضخامت بهینه برای پلی‌اتیلن و آب ۳ سانتی‌متر و برای گرافیت ۱۵ سانتی‌متر به دست آمد. در آخرین مرحله برای افزایش هر چه بیشتر شار نوترون‌های رسیده به نمونه از یک بازتاب‌دهنده گرافیتی در اطراف چشمه نوترون استفاده کردیم. سپس برای بررسی صحت شبیه‌سازی‌ها با توجه به امکانات آزمایشگاهی، آزمایشی طراحی شد. کندکننده قابل ساخت یک ظرف پلی‌اتیلنی به شکل یک پوسته مکعب مستطیل است که داخل آن آب ریخته می‌شود و ضخامت دیواره‌های پلی‌اتیلنی ۵ میلی‌متر است. با توجه به شرایط آزمایش، شبیه‌سازی‌ها دوباره انجام شدند و ضخامت بهینه آب ۲سانتی‌متر تعیین شد. آزمایش برای ضخامت بهینه ۲ سانتی‌متر آب و ضخامت ۵ سانتی‌متر، به منظور بررسی ضخامت‌های بیشتر آب طراحی و انجام شد. نتایج به دست آمده با نتایج شبیه‌سازی‌ها سازگاری خوبی دارند و می‌توان نتیجه گرفت سیستم طراحی شده از لحاظ حفاظ و کندکننده‌ی اطراف چشمه جهت شناسایی نیتروژن موجود در مواد، شرایط بهینه را دارد.

کلمات کلیدی: ۱- آنالیز گامای آنی به روش فعال‌سازی ۲- PGNAA ۳- آشکارسازی مواد منفجره ۴- چشمه نوترون Am-Be

فصل اول
مقدمه

چهار سال پس از کشف نوترون توسط چادویک، یعنی سال ۱۹۳۶ هوسی[1] و لوی[2] برای اولین بار به توانایی استفاده از نوترون به عنوان فعال‌ساز در تشخیص عناصر مختلف تشکیل دهنده یک نمونه پی بردند[۱]. این روش از سال ۱۹۵۰ به بعد در بسیاری از زمینه‌ها، تحقیقات فراوانی را به خود اختصاص داده است[۲].

تحلیل فعال‌سازی نوترون از روی گامای آنی(PGNAA[3]) یک روش غیر مخرب در زمینه آنالیز مواد مختلف است. تعیین غلظت عناصر بدن، کنترل کیفی مواد در کارخانه‌ها، آشکارسازی مواد قاچاق، کشف معادن مختلف، آشکارسازی مین‌های دفن شده در مناطق جنگی و کشف مواد منفجره پنهان شده تنها بخشی از کاربردهای PGNAA است[۳]. به عنوان مثال اولین بار در سال ۱۹۸۹ میلادی در فرودگاه JFK[4] نیویورک از روش PGNAA برای بازرسی چمدان‌ها استفاده شد و اولین کاربرد پزشکی این روش اندازه‌گیری نیتروژن کل بدن بود که

[1] Hussi
[2] Lui
[3] Prompt Gamma Neutron Activation Analysis
[4] John F. Kennedy International Airport

در سال ۱۹۷۹ میلادی با نوترون‌های یک سیکلوترون، در دانشگاه بیرمنگام انجام شد. اولین اندازه‌گیری نیتروژن کل بدن که با چشمه‌های رادیوایزوتوپی انجام شد توسط آزمایشگاه ملی بروکهاون[1] بود که با یک چشمه ۸۵ کوری Pu-Be انجام شد[۴].

در روش

PGNAA نمونه تحت تابش نوترون قرار می‌گیرد. نوترون‌های تابیده با احتمال‌های مختلف جذب هسته-های هدف شده و هسته مرکب را تشکیل می‌دهند. تقریبا همه عناصر انرژی بستگی نوترون جذب شده را به صورت یک گامای آنی آزاد می‌کنند. این گاما از مشخصه‌های هسته‌ای است که آن را ساطع کرده بنابراین با تحلیل آشکارسازی این گاما می‌توان به نوع عناصر موجود در نمونه پی برد[۵]. اندازه‌گیری گامای آنی باید در حین پرتودهی نمونه صورت گیرد، زیرا این گاما در زمان کوتاه فعال شدن هسته به وجود می‌آید و به سرعت در محیط جذب و نابود می‌شود[۴].

۱-۱ تحلیل روش فعال سازی نوترونی مواد حاوی نیتروژن:

یکی از کاربردهای PGNAA، آنالیز فوری مواد منفجره شیمیایی است و به این ترتیب، می‌توان از آن در بازرسی چمدان‌ها و محموله‌های باری در فرودگاه‌ها، کشتی‌ها و ... استفاده کرد. مواد منفجره عموما حاوی ترکیبات ازت هستند در نتیجه با تشخیص وجود ازت در داخل یک بسته یا کیف می‌توان به احتمال وجود مواد منفجره در آن پی برد. ازت با استفاده از پرتوهای گامای MeV ۱۰/۸۳ حاصل از جذب نوترون‌های حرارتی یا پرتوهای گامای MeV ۲/۳۱ ناشی از پراکندگی ناکشسان نوترون‌های سریع شناسایی می‌شود. نیتروژن(^{14}N) با سطح مقطع حدود ۰/۷۵ بارن نوترون‌های حرارتی را جذب می‌کند و گامای آنی با انرژی MeV۱۰/۸۳ گسیل می‌کند که در طیف گامای حاصل از PGNAA، اثر این اشعه گاما در گستره MeV ۱۱/۵-۹ قرار دارد. این گستره انرژی، ناحیه مورد نظر (ROI[2]) نامیده می‌شود و در کشف مواد منفجره به روش PGNAA شمارش‌های این ناحیه تعیین کننده حضور مواد منفجره است[۵]. از آنجا که ^{15}N هسته پایداری است، هیچ گامای تاخیری ایجاد نمی‌کند. مهمترین ویژگی گامای آنی حاصل از جذب نوترون در ازت، انرژی بالای آن است که مانع از تداخل آن با پرتوهای گامای حاصل از برهم‌کنش نوترون با عناصر دیگر و همچنین پرتوهای گامای زمینه می‌گردد و راحت‌تر قابل تشخیص است[۵].

[1] Brookhaven National Laboratory
[2] Region of Interested

وسایل مورد نیاز برای PGNAA شامل چشمه نوترون، نمونه، آشکارساز و حفاظ مناسب برای نوترون و گاماست. آشکارسازهایی که معمولا در PGNAA استفاده می شوند، آشکارسازهای سوسوزن و آشکارسازهای نیمه هادی هستند.

چشمه نوترون مورد استفاده در این تحقیق یک چشمه Am-Be پنج کوری با استانداردهای کپسول X14 Amersham است. Am که یک گسیل کننده آلفاست در Be جایگذاری شده و واکنشی به صورت $^{9}\mathrm{Be}(\alpha,\mathrm{n})^{12}\mathrm{C}$ رخ می‌دهد. این چشمه دارای گامای MeV ۴/۴۳ ناشی از ^{12}C است که در حالت برانگیخته تشکیل شده و به حالت پایه می‌رود. میانگین انرژی نوترون‌های این چشمه MeV ۴/۴ و فراوان‌ترین انرژی نوترون‌ها برای این چشمه حدود MeV ۳ است [۴].

تا امروز تحقیقات زیادی در این روش برای کشف مواد منفجره، مواد مخدر و مین‌های دفن شده در مناطق جنگی انجام شده است. هر گونه تغییر در چیدمان، ساختمان، مواد و ابزار PGNAA می‌تواند باعث افزایش و یا کاهش بازده این روش شود.

در این تحقیق حفاظ بهینه برای چشمه نوترون Am-Be در تحلیل گامای آنی حاصل از فعال‌سازی نوترونی برای آشکارسازی نیتروژن ، با کد MCNPX طراحی و سپس ساخته شده است. جهت افزایش بازده آشکارسازی گامای MeV ۱۰/۸۳ نیتروژن، این حفاظ به گونه‌ای طراحی شده که شار نوترون‌های حرارتی در محل نمونه افزایش یابد و شار گامای MeV ۴/۴۳ چشمه Am-Be که به آشکارساز می‌رسد تضعیف شود. این حفاظ شامل یک استوانه سربی است که چشمه داخل آن قرار می‌گیرد. ضخامت‌های مختلف سرب شبیه‌سازی شده و در نهایت ضخامت مناسب برای تضعیف گامای چشمه انتخاب شده است. سپس با بررسی هندسه‌های مختلف، هندسه مناسب برای کندکننده را طراحی کرده‌ایم. با شبیه سازی، اثر سه کندکننده آب، پلی اتیلن و گرافیت در ضخامت‌های مختلف بررسی و ضخامت بهینه هر کندکننده تعیین شده است و در آخر از گرافیت به عنوان بازتاب دهنده نوترون برای هدایت نوترون‌های چشمه به سمت نمونه استفاده شده است.

در فصل بعد به بررسی فیزیک نوترون می‌پردازیم. فصل۳ را با توجه به اهمیت طیف نگاری گاما در PGNAA به بررسی طیف نگاری گاما اختصاص داده و انواع آشکارسازها را بررسی می‌کنیم. در فصل ۴ روش آنالیز نوترونی را به طور مفصل بررسی کرده و به کاربردهای آن به خصوص در کشف مواد منفجره می‌پردازیم. در فصل ۵ کد MCNP را به طور مختصر معرفی کرده و شبیه سازی‌های انجام شده را بیان کرده و آنها را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهیم و در فصل آخر به بررسی آزمایشات انجام شده پرداخته و آنها را تجزیه و تحلیل می‌کنیم.

فصل دوم
فیزیک نوترون

در سال ۱۹۳۰ میلادی دو دانشمند به نام‌های بت[1] و بکر[2] با بمباران هسته اتم‌های لیتیوم، برلیوم، بور و سایر عناصر سبک با ذرات آلفای حاصل از فلز رادیواکتیو پلوتونیوم، توانستند تشعشع گامای هسته رادیواکتیومصنوعی را کشف کنند. در سال ۱۹۳۲ چادویک[3] با بررسی و مشاهده بمباران برلیوم با ذرات آلفا که بت انجام داده بود، به این نتیجه رسید که یک ذره خنثی ناشناخته با جرمی تقریبا برابر جرم پروتون تولید شده است. او این ذره را نوترون نامید و تولید نوترون را در اثر بمباران برلیوم با ذرات آلفا به وسیله فعل و انفعال زیر بیان کرد:

$$^{9}Be + \alpha \rightarrow {}^{12}C + n \qquad ۱-۲$$

این کشف منجر به حل بسیاری از فرضیه‌های مربوط به ساختمان هسته گردید. به ویژه هایزنبرگ[4] در سال ۱۹۳۲ به این نتیجه رسید که ساختمان هسته فقط از پروتون و نوترون تشکیل شده است.

جرم نوترون به اندازه $۰/۸۴ \times ۱۰^{-۳}$ u سنگین‌تر از جرم پروتون است، اسپین آن $1/2$ است و برای

[1] Bothe
[2] Becker
[3] Chadwick
[4] Heisenberg

اولین بار در سال ۱۹۴۰ وجود گشتاور مغناطیسی نوترون توسط دو محقق به نام‌های آلوارز[۱] و بلوچ[۲] اثبات شد. برای تعیین بار الکتریکی نوترون، آزمایش‌های مختلفی انجام شده است. در این زمینه شاپیر[۳] و واشترلین[۴] کوشش کردند که نوترون‌ها را در میدان‌های الکتریکی قوی منحرف سازند ولی هیچ انحرافی را در وسط دستگاه-های دقیق که دقت آنها تا 10^{-12} e بود مشاهده نکردند[۶].

۲-۱ دسته‌بندی نوترون‌ها

نوترونها معمولاً بر اساس انرژی جنبشی‌شان دسته بندی می شوند، گرچه یک تقسیم‌بندی یکسان و معینی وجود ندارد. اما یکی از تقسیم‌بندی‌های مشهور به شرح زیر است:

- نوترون‌های حرارتی، که انرژی آنها $E_n < 0.4eV$ است.
- نوترون‌های فوق حرارتی که انرژی آنها $0.4eV < E_n < 100eV$ است.
- نوترون‌های میانی که انرژی آنها $100eV < E_n < 200keV$ است.
- نوترون‌های تند، که انرژی آنها $200keV < E_n < 10MeV$ است
- نوترون‌های نسبیتی، که انرژی آنها $E_n > 10MeV$ است.

نوترون‌های حرارتی:

نوترون‌های حرارتی، نوترون‌هایی هستند که توزیع انرژی آنها همانند توزیع انرژی اتم‌ها و مولکول‌های ماده‌ای است که این نوترون‌ها در ساختار آنها حضور دارند. این نوترون‌ها در تعادل حرارتی با محیط اطرافشان هستند و به همین دلیل "حرارتی" نامیده می شوند.

در حالت تعادل رابطه میان توزیع انرژی نوترون‌ها و دمای محیط، از رابطه ماکسول- بولتزمن به دست می-آید:

$$f(E) = 2\pi(nKT)^{3/2}\, e^{-\frac{E}{KT}}\; E^{\frac{1}{12}} \qquad ۲-۲$$

که در آن:

$f(E)$: کسر نوترون‌های با انرژی E

[1] Alvarez
[2] Blocd
[3] Shapir
[4] Straelen

K: ثابت بولترمن برابر 1.38×10^{-23} $\left(J/K\right)$ است.

T: دمای مطلق بر حسب کلوین می باشد.

محتمل‌ترین انرژی نوترون‌های حرارتی از رابطه زیر به دست می آید:

$$E_{mp} = KT \qquad ۳-۲$$

که مقدار آن در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، برابر ۰/۰۲۵۳ eV می باشد.

مهم‌ترین بر هم‌کنش نوترون‌های حرارتی با ماده، جذب گامازا (n,γ) می‌باشد. بر هم‌کنش‌های دیگری نیز ممکن است رخ دهد، مانند (n,α) ، (n,p) و شکافت.

نوترون‌های فوق حرارتی و میانی:

این نوترون‌ها، غالبا دراثر برخورد کشسان نوترون‌های تند، با موادی با عدد اتمی پایین، نظیر کندکننده‌ها به وجود می‌آیند. نوترون های میانی و فوق حرارتی که به این شکل به وجود آمده اند، عموما در گستره‌ی انرژی بین ۰/۴ eV تا ۲۰۰ keV، دارای طیف انرژی متناسب با $1/E$ می‌باشند.

نوترون‌های تند:

نوترون‌هایی که انرژی آنها بیش از ۲۰۰ keV باشد، نوترون‌های تند نامیده می‌شوند. برخورد غالب بین نوترون‌های تند با مواد دارای عدد اتمی پایین برخورد کشسان می‌باشد و هر چه انرژی نوترون‌ها و یا عدد اتمی ماده افزایش یابد، احتمال برخورد کشسان نیز افزایش می‌یابد.

نوترون‌های نسبیتی:

برای این نوترون ها، احتمال برخورد ناکشسان بیشتر است و برای مواد با عدد اتمی بالا، احتمال برخورد کشسان، بسیار پایین و قابل صرف نظر کردن است[۷].

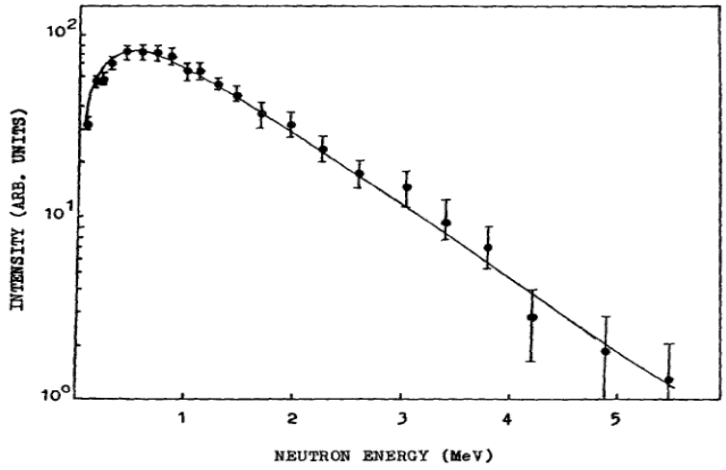
۲-۲ چشمه‌های نوترون

چشمه‌های نوترون عبارتند از راکتورها، شتابدهنده‌ها و چشمه‌های رادیوایزوتوپی. راکتورهای هسته‌ای بیشترین کاربرد را از نظر پرتودهی دارند و شار بالایی از نوترون‌ها که حداکثر 10^{18} n/cm^2 s است را تولید می‌کنند. شتاب‌دهنده‌ها از طریق واکنش‌های ذرات باردار، نوترون‌های سریع تولید می‌کنند و چشمه‌های رادیوایزوتوپی نوترون از واکنش‌های (α,n) و (γ,n) و شکافت خود به خودی ^{252}Cf شکل می‌گیرند[۱]. در این قسمت به بررسی چشمه‌های نوترون و ویژگی‌های آنها می‌پردازیم.

۲-۲-۱ چشمه‌های شکافت خود به خودی

بسیاری از هسته‌های با عدد اتمی بالاتر از اورانیوم دارای احتمال قابل توجهی برای شکافت خود به خودی هستند. در هر شکافت چندین نوترون سریع ایجاد می‌شوند. محصولات دیگر شکافت شامل پاره‌های سنگین شکافت، گاماهای آنی شکافت، بتا و گاماهای حاصل از فعال شدن نمونه است. چشمه‌های رادیوایزوتوپی نوترون در محفظه‌هایی قرار داده می‌شوند که نوترون‌های سریع و گاماها می‌توانند از آن خارج شوند.

رایج‌ترین چشمه شکافت خود به خودی ^{252}Cf است. نیمه عمر ^{252}Cf ۲/۶۵ سال و واپاشی غالب آن واپاشی آلفازا است. آهنگ گسیل آلفای این چشمه ۳۲ برابر شکاف خود به خودی است. این چشمه در هر میکروگرم ماده چشمه 2.3×10^6 نوترون در هر ثانیه تولید می‌کند. بنابراین ماده فعال چشمه بسیار کم (معمولاً از مرتبه میکروگرم) است که باعث می‌شود اندازه چشمه با لحاظ کردن کپسول مورد نیاز کوچک باشد.



شکل ۲-۱-طیف نوترون‌های چشمه ^{252}Cf [۸].

طیف انرژی نوترون‌های این چشمه در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. قله طیف در بازه انرژی ۰/۵ MeV تا ۱MeV قرار دارد و مقدار قابل توجهی از نوترون‌های چشمه دارای انرژی ۸ تا ۱۰MeV هستند.

شکل طیف نوترون‌های شکافت با رابطه زیر تخمین زده می‌شود. مقدار ثابت T در معادله زیر برابر ۱/۳MeV است[۸].

$$\frac{dN}{dE} = E^{1/2} \quad e^{-E/T} \qquad ۴-۲$$

۲-۲-۲ چشمه‌های رادیو ایزوتوپی (α, n)

از واپاشی بعضی از هسته‌های پرتوزا، ذرات آلفای پر انرژی حاصل می‌شوند. بنابراین با ترکیب این هسته‌ها با مواد نوترون‌زای مناسب می‌توان چشمه نوترون تهیه کرد. مواد مختلفی با واکنش‌های خاص می‌توانند نوترون تولید کنند. بیشترین نوترون‌ها وقتی بدست می‌آیند که ماده نوترون‌زا برلیوم انتخاب شود در این صورت واکنشی که رخ می‌دهد به صورت

$$^{4}_{2}\alpha + ^{9}_{4}Be \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n \qquad ۵-۲$$

است که مقدار انرژی آزاد شده آن ۵/۷۱MeV است.

وقتی پرتو آلفا به هدفی با ضخامتی قابل مقایسه با برد آن برخورد می کند، بیشتر ذرات در هدف متوقف می‌شوند و تقریباً یک ذره از 10^4 ذره با هسته‌های هدف بر هم‌کنش نوترون‌زا انجام می‌دهد. همین نتیجه برای ترکیب مواد آلفازا با برلیوم به دست می‌آید. همه عناصر آلفازای کاربردی از آکتینیدها هستند. تحقیقات نشان می-دهد آلیاژهای پایداری با ترکیب MBe_{13} می‌توان ساخت که M از فلزات اکتینید است.

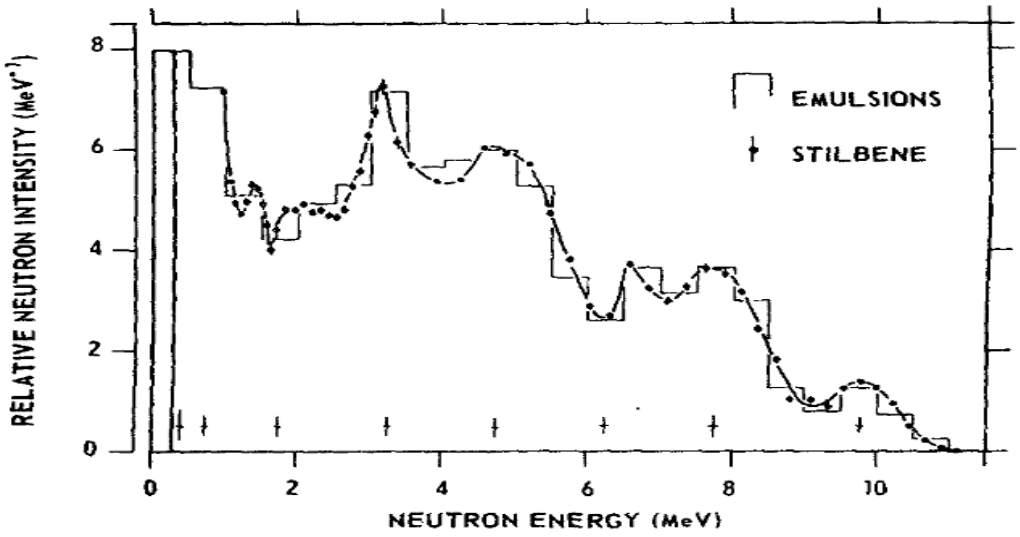
برخی از چشمه‌های (α, n) رایج در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. بعضی از عناصر این جدول مانند ^{226}RA و ^{227} AC منجر به یک زنجیره واپاشی طولانی وتولید ذرات دیگر می‌شوند که باعث تولید پس‌زمینه گامای زیادی در طیف گاما می‌شود. بنابراین این چشمه‌ها برای آزمایش‌هایی که شامل اندازه‌گیری طیف گاماست، مناسب نیستند.

Table 1.6 Characteristics of Be(α, n) Neutron Sources

Source	Half-Life	E_α (MeV)	Neutron Yield per 10^6 Primary Alpha Particles		Percent Yield with $E_n < 1.5$ MeV	
			Calculated	Experimental	Calculated	Experimental
^{239}Pu/Be	24000 y	5.14	65	57	11	9–33
^{210}Po/Be	138 d	5.30	73	69	13	12
^{238}Pu/Be	87.4 y	5.48	79[a]	—	—	—
^{241}Am/Be	433 y	5.48	82	70	14	15–23
^{244}Cm/Be	18 y	5.79	100[b]	—	18	29
^{242}Cm/Be	162 d	6.10	118	106	22	26
^{226}Ra/Be + daughters	1602 y	Multiple	502	—	26	33–38
^{227}Ac/Be +daughters	21.6 y	Multiple	702	—	28	38

شکل ۲-۲- چشمه‌های نوترون (α, n) [۸].

پرکاربردترین چشمه‌ی (α, n) احتمالاً ^{239}PU-Be است. حدود ۱۶ گرم از ماده این چشمه برای تولید فعالیت یک کوری لازم است. یعنی با فقط اندازه چند سانتی‌متری از این چشمه می‌توان 10^7 n/s تولید کرد. برای افزایش نوترون‌های این چشمه بدون تغییر در اندازه چشمه باید از مواد آلفازا با فعالیت بیشتر استفاده شود. طیف نوترون های ^{239}Pu-Be در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. برای چشمه‌هایی با چند گرم ماده چشمه، طیف نوترون‌هایی که از سطح چشمه خارج می‌شوند شبیه طیف نوترون‌های برهم‌کنش (α, n) است. برای چشمه‌های بزرگتر، برهم‌کنش‌های ثانویه ناشی از پراکندگی نوترون داخل چشمه، مانند برهم کنش(n,2n) برای برلیوم، (n,fission) برای پلوتونیوم و برهم‌کنش‌های دیگر، روی طیف نوترون های خارج شده از سطح چشمه اثر می-گذارد.



شکل ۲-۳- طیف نوترون های ^{239}Pu-Be [۸].

۲-۲-۳ چشمه‌های فوتونوترون

بعضی از چشمه‌های گاما با ترکیب مواد مناسب هدف می‌توانند برای تولید چشمه‌های نوترون به کاررروند. اساس کار این چشمه‌ها این است که ماده هدف با جذب یک فوتون که دارای انرژی کافی است می تواند یک نوترون آزاد کند. تنها دو عنصر $^{9}_{4}Be$ و $^{2}_{1}H$ مواد کاربردی برای تولید چشمه‌های فوتونوترون هستند. واکنش صورت گرفته در این عناصر به شکل زیر است:

$$^{9}_{4}Be + h\nu \rightarrow {}^{8}_{4}Be + {}^{1}_{0}n \qquad \text{Q= -1.666 MeV} \qquad (۲-۶)$$

$$^{2}_{1}H + h\nu \rightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{1}_{0}n \qquad \text{Q=-2.226 MeV}$$

برای انجام واکنش‌های فوق، فوتون‌هایی با انرژی معادل حداقل انرژی Q لازم است. بنابراین تنها گاماهای پر انرژی می‌توانند این واکنش‌ها را انجام دهند. اگر انرژی گاما بیشتر از این مقدار کمینه باشد انرژی نوترون آزاد شده از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$E_n(\theta) = \frac{\mu(E\gamma+Q)}{m+\mu} + \frac{E_\gamma[(2mM)(m+M)(E\gamma+Q)]}{(m+M)^2} cos\theta \qquad ۷-۲$$

که:

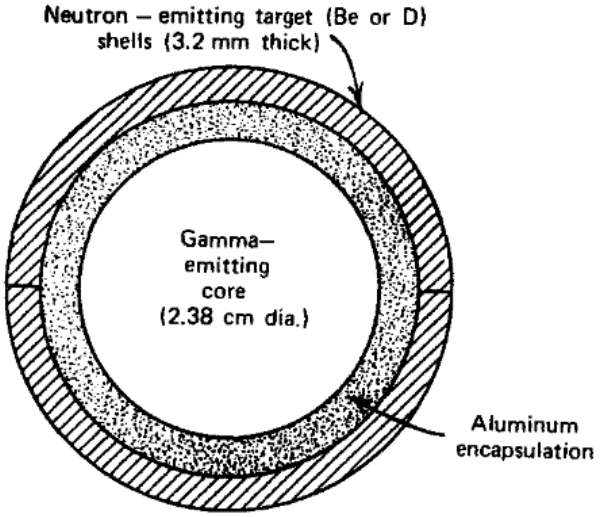
θ = زاویه بین فوتون گاما و راستای نوترون آزاد شده

E_γ = انرژی گاما

μ = جرم هسته پس زده شده $\times c^2$

m = جرم نوترون $\times c^۲$

مزیت چشمه‌های فوتونوترون آن است که اگر چشمه گاما تک انرژی باشد، نوترون‌های آزاد شده هم تقریباً تک انرژی هستند. (توزیع فضایی ناشی از معادله ۲-۷ به یک طیف با تنها چند درصد اختلاف انرژی نوترون-ها منجر می‌شود). شکل ۲-۴ ساختار یک چشمه فوتونوترون را نشان می‌دهد. مهم‌ترین مشکل این چشمه‌ها این است که برای تولید شار نوترون مناسبی باید چشمه‌های گاما با شدت خیلی زیاد به کار برده شود. برای مثال برای چشمه‌ای به شکل ۲-۴ تنها حدود یک گاما از $۱۰^۶$-$۱۰^۵$ گامای برخوردی تولید نوترون می‌کند. بنابراین نوترون-های خروجی در پس زمینه گامای بسیار بالایی ظاهر می‌شوند.



شکل ۲-۴- ساختار یک چشمه فوتونوترون کروی[۸].

۲-۲-۴ شتاب دهنده‌های ذرات باردار

شتاب‌دهنده‌ها از طریق واکنش‌های ذرات باردار، نوترون‌های سریع تولید می‌کنند. دوتا از بیشترین واکنش-هایی که برای تولید نوترون در شتاب دهنده‌ها انجام می‌شود، واکنش‌های D-D و واکنش D-T است.

$$ {}_1^2H + {}_1^2H \rightarrow {}_2^3H + {}_0^1n \qquad Q = 3.26\ MeV \qquad ۸-۲ $$

$$ {}_1^2H + {}_1^3H \rightarrow {}_2^4H + {}_0^1n \qquad Q = 17.6\ MeV $$

به دلیل سد کولنی بزرگی که بین ذرات دوترون و ذرات برخوردی وجود دارد، دوترون‌ها تا انرژی خیلی بالا باید شتاب داده شوند. این واکنش‌ها در مولدهای نوترون به طور گسترده انجام می‌شود. در این مولدها، دوترون‌ها تحت پتانسیل 100-300 KV شتاب داده می‌شوند. نوترون‌های تولید شده در این مولدها تک انرژی و دارای انرژی 3MeV، برای هم‌کنش‌های D-D و انرژی 14 MeV، برای هم‌کنش‌های D-T هستند. یک بیم ۱mA دوترون از یک ضخامت هدف دوترون حدود $۱۰^{۹}\ n/s$ و در حدود $۱۰^{۱۱}\ n/s$ از یک هدف ترتیومی نوترون تولید خواهد کرد[۸].

۲-۳ برهمکنش‌های نوترون

یک ویژگی روشن و مهم بر هم‌کنش‌های نوترون- هسته آن است که نوترون به دلیل بی بار بودن، وقتی وارد ماده می‌شود با الکترون‌ها برهم‌کنش نمی‌کند و به هنگام نزدیک شدن به هسته تحت تأثیر هیچ گونه نیروی دافعه قرار نمی‌گیرد. در نتیجه، نوترون می‌تواند با هر انرژی با هسته برهم کنش کند و همان طور که فرمی[1] کشف کرد، نوترون های با انرژی پایین، معمولاً آسان‌تر از نوترون‌های با انرژی بالا بر هم‌کنش انجام می‌دهند. نوترون‌ها بر حسب انرژی‌شان برهم‌کنش‌های متفاوتی با هسته انجام می‌دهند[۹].

۲-۳-۱ برهم‌کنش‌های نوترون‌های سریع

یک نوترون سریع می‌تواند به صورت مستقیم یا تشکیل هسته مرکب با هسته برهم‌کنش کند. در برهم کنش مستقیم می‌تواند پراکندگی کشسان یا غیر کشسان رخ دهد. معمولا هسته مرکب تشکیل شده با نوترون‌های سریع در حالت بسیار برانگیخته تشکیل می‌شود. این برانگیختگی ناشی از انرژی بستگی نوترون که حدود ۸ MeV و

[1] Enrico Fermi

انرژی جنبشی منتقل شده از نوترون به هسته است. بنابراین هسته مرکب به سرعت از طریق یکی از کانال‌های زیر واپاشی می‌کند.

پراکندگی کشسان ترکیبی: اگر هسته هدف بعد از واکنش با نوترون چه از نظر ترکیب ایزوتوپی و چه از نظر انرژی داخلی تغییری نکرده باشد این فرایند پراکندگی کشسان نامیده می‌شود. در این حالت نوترون دوباره ساطع می‌شود و هسته هدف در حالت پایین‌تر یا بالاتر از حالت پایه دوباره شکل می‌گیرد. این واپاشی، پراکندگی کشسان ترکیبی است و احتمال آن همیشه وجود دارد و اغلب در پراکندگی کشسان کل مشاهده شده سهم مهمی دارد.

پراکندگی ناکشسان: در این حالت هسته مرکب نوترونی با انرژی جنبشی کمتر ساطع می‌کند و هسته هدف به حالت برانگیخته بالاتر می‌رود. احتمال وقوع پراکندگی ناکشسان به ترازهای برانگیخته ممکن هسته بستگی دارد.

(n, p): این کانال معمولا در برخورد نوترون‌های سریع با همه عناصر اتفاق می‌افتد. هسته باقی مانده یک نوترون دریافت کرده ویک پروتون از دست داده است بنابراین معمولا ناپایدار است و از طریق β واپاشی می‌کند.

(n,2n): اگر انرژی نوترون فرودی به اندازه کافی زیاد باشد می‌تواند دو نوترون از هسته بکند. در واکنش‌های (n,2n) هسته باقی مانده ممکن است پایدار باشد یا به علت کمبود نوترون با گسیل پوزیترون واپاشی کند. در هسته‌های متوسط واپاشی‌های (n,2n) و (n, p) مهم می‌شوند. این واکنش‌ها دارای انرژی آستانه هستند. مثلا برای یک واکنش با Q منفی انرژی آستانه مقدار مثبت $-\frac{M+m}{M}Q$ است، که M جرم هسته و m جرم نوترون است.

(n,α): ذره دیگری که احتمال گسیل آن وجود دارد آلفاست. واکنش (n,α) گاهی در عناصر سبک باعث تجزیه هسته می‌شود. مثلا کربن به سه آلفا تجزیه می‌شود.

(n,γ): پس از جذب نوترون و تشکیل هسته مرکب، اگر کانال‌های همه ذرات بسته شوند، انرژی برانگیختگی هسته به صوت گاما آزاد می‌شود. ولی واکنش (n,γ) برای نوترون‌های سریع دارای اهمیت کمتری است[۱۰]

شکافت: در بعضی از عناصر سنگین نوترون‌های سریع هم می‌توانند باعث شکافت شوند.