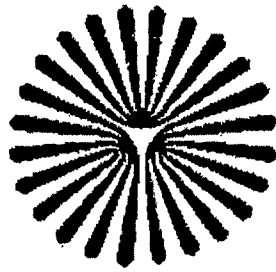


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

11909



دانشگاه پیام نور مشهد

عنوان پایان نامه :

دوزیمتری نوترون چشمه $^{252}\text{Cf}_{98}$ و محاسبه توزیع دوز آن در

بافت نرم و فانتوم آب

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای

استاد راهنما :

دکتر علی اصغر مولوی

استاد مشاور :

مهندس علی رضا بینش

نگارنده :

میشم پرتوی

بهمن ۸۶

۱۳۸۷ / ۱۲ / ۸

۱۳۸۷ / ۱۲ / ۸

۹۵۹۱۷

مجلس استانیتهای دانشجوین
مجلس استانیتهای دانشجوین

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدردانی

سپاس فقط مختص ذات بی همتای اوست و سپاس از بنده سپاس از اوست. اینک که به یاری خدا این مرحله دانشگاهی را به پایان می رسانم جا دارد تا مراتب سپاس و قدردانی خودم را از اساتید محترم و کسانی که مرا در این سالها یاری کرده اند به جا آورم. مراتب سپاس و قدردانی خود را به محضر استاد گرامی جناب آقای دکتر مولوی که در طول این پژوهش اینجانب را از راهنمایی های بزرگوارانه و خردمندانه خویش بهره مند ساخته اند و هر بار روحیه ای تازه به من می بخشیدند تقدیم می دارم. همچنین از استاد گرامی جناب آقای مهندس ینش که تشویق هایشان موجبات دلگرمی بیشتر را فراهم می کرد کمال تشکر را دارم. از استاد گرامی جناب آقای دکتر محمدی به خاطر قبول زحمت مطالعه و داوری این پایان نامه سپاسگذاری می کنم. از خانواده عزیزم که در این مدت همراه و یار من بودند و لحظه لحظه زندگیم را مدیون آنها می دانم و اگر بذل توجه و عنایت اینان نبود، بنده به این مرحله نمی رسیدم تشکر کرده و امید وارم توانسته باشم ذره ای از فداکاری هایشان را جبران کرده باشم.

فهرست مطالب

چکیده

فصل اول: برهم‌کنش نوترون با ماده

- ۱-۱ تاریخچه کشف شکافت هسته‌ای..... ۱
- ۲-۱ فیزیک فرآیند شکافت..... ۲
- ۳-۱ شکافت خود بخود..... ۴
- ۴-۱ پاره‌های شکافت..... ۵
- ۵-۱ پرتوزایی پاره‌های شکافت..... ۷
- ۶-۱ برهم‌کنش نوترون با ماده..... ۸
- ۱-۶-۱ برخورد کشسان..... ۹
- ۲-۶-۱ برخورد ناکشسان..... ۹
- ۳-۶-۱ برخورد غیر کشسان..... ۱۰
- ۴-۶-۱ فرآیند گیر اندازی (شکار)..... ۱۰
- ۷-۱ اهمیت نسبی برهم‌کنش نوترون با عناصر H و C و N و O..... ۱۰

فصل دوم: برهم‌کنش گاما با ماده

- ۱-۲ مقدمه..... ۱۳
- ۲-۲ برهم‌کنش پرتوهای گاما با ماده..... ۱۴
- ۱-۲-۲ اثر فوتوالکتریک..... ۱۴
- ۲-۲-۲ اثر کامپتون..... ۱۵
- ۳-۲-۲ تولید زوج..... ۱۷
- ۳-۲ اهمیت نسبی فرآیندهای فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج..... ۱۸

فصل سوم: معرفی چشمه کالیفرنیم

- ۱-۳ چشمه کالیفرنیم ۱۹
- ۲-۳ گاماهاى گسیل شده از چشمه $^{252}_{98}\text{Cf}$ ۲۲
- ۱-۲-۳ اشعه گامای حاصل از پاره‌های شکافت ۲۲
- ۲-۲-۳ اشعه گامای ناشی از واپاشی آلفای ایزوتوپ $^{252}_{98}\text{Cf}$ ۲۳
- ۲-۲-۳ اشعه گامای ناشی از برهم‌کنش (n, γ) ۲۴

فصل چهارم: پرتودرمانی و دوز جذبی

- ۱-۴ سرطان ۲۵
- ۲-۴ روشهای درمانی ۲۶
- ۱-۲-۴ جراحی ۲۶
- ۲-۲-۴ شیمی درمانی ۲۶
- ۳-۲-۴ رادیوتراپی (پرتودرمانی) ۲۸
- ۳-۴ چشمه‌های رادیواکتیو برای درمان کاشتی ۳۰
- ۱-۳-۴ قالب‌ها یا پلاک‌ها (Molds or plaques) ۳۰
- ۲-۳-۴ کشت‌های درون بافتی (Interstitial implants) ۳۱
- ۳-۳-۴ کشت‌های درون حفره‌ای (Intracavity implants) ۳۱
- ۴-۴ حفاظت در برابر چشمه‌های رادیواکتیو بسته ۳۲
- ۵-۴ تاریخچه دوز جذبی ۳۴
- ۶-۴ مفهوم کرما و تعریف آن ۳۶
- ۷-۴ رابطه کرما و دوز جذب ۳۷

۴-۸ دوزیمتری در میدان مخلوط ۳۸

فصل پنجم: روش مونت کارلو، کد MCNP و نتایج دوزیمتری

۵-۱ مقدمه ۴۰

۵-۲ شبیه سازی با استفاده از تولید اعداد تصادفی به روش مونت کارلو ۴۱

۵-۳ آشنایی با کد رایانه‌ای MCNP ۴۴

۵-۴ معرفی کتابخانه سطح مقطع‌ها در کد MCNP ۴۵

۵-۵ آشنایی با فایل ورودی MCNP ۴۶

۵-۵-۱ پیکره کلی یک فایل ورودی کد MCNP ۴۶

۵-۵-۲ تعریف هندسه مساله ۴۷

۵-۵-۳ تعریف چشمه ۴۷

۵-۵-۴ تعریف مد حل مساله ۴۸

۵-۵-۵ تعریف کارت اهمیت ۴۸

۵-۵-۶ تعریف خواسته‌ها و خروجی‌های مساله (تالی‌ها) ۴۹

۵-۵-۷ تعریف نوع مواد داخل سلول‌ها ۵۰

۵-۵-۸ شرط پایان ۵۰

۵-۶ برآورد خطاهای مونت کارلو ۵۱

۵-۷ مشخصات چشمه و فانتوم ۵۴

۵-۸ محاسبه دوز ناشی از نوترون ۵۶

۵-۹ محاسبه دوز ناشی از گاما ۵۹

۵-۱۰ محاسبه دوز ناشی از گاماهاى القایی و دوز کل ۶۱

۵-۱۱ جمع بندی و نتیجه‌گیری ۶۵

مراجع

Abstract

Theoretical and experimental studies have been applied for dosimetric parameters determination of the brachytherapy sources. Usually, Monte Carlo method has been used to define such quantities as the anisotropy dose function, the radial dose function, and the dose calculation close to the source in brachytherapy. ^{252}Cf source is used widely in brachytherapy to treat localized tumors near body site. In this present work, we have used MCNP4C code to calculate relative dose and anisotropy dose function HDR ^{252}Cf in a water phantom.

^{252}Cf is an artificial radioisotope which is produced in small amounts. The decay of this isotope is in the form of alpha particles emission (97%) and spontaneous fission (3%). The average number of neutrons in each fission is $3.77 \frac{n}{sf}$. So a very small amount of this element can produce a considerable neutron flux. For example a source of 2 or 3 milligrams in size can emit $10^6 \frac{n}{s}$.

In the present work, the dose distribution has been calculated around the ^{252}Cf located in the center of water phantom sphere with 15 cm radius. Relative dose curves draw, Then, the isodose points were found by interpolate from relative dose curves.

چکیده

امروزه با پیشرفت فیزیک هسته‌ای و کاربرد آن در علوم مختلف از جمله پزشکی، تشخیص و درمان بسیاری از بیماری‌ها میسر گردیده است. یکی از کاربردهای پزشکی هسته‌ای در درمان سرطان‌ها، استفاده از روش پرتودرمانی می‌باشد.

پرتودرمانی به معنای از بین بردن تومورهای بدخیم و یا کوچک کردن آنها توسط اشعه دادن می‌باشد. پرتودرمانی به دو صورت، پرتودرمانی خارجی (تله‌تراپی) و یا پرتودرمانی داخلی (براکی‌تراپی) می‌باشد. مزیت براکی‌تراپی نسبت به تله‌تراپی در این است که بیشترین دوز به بافت سرطانی و کمترین دوز به بافت سالم اطراف تومور می‌رسد.

چشمه‌های رادیواکتیو برای درمان کاشتی را می‌توان در سه گروه نام‌گذاری کرد: ۱- قالب‌ها یا پلاک‌ها ۲- کشت‌های درون بافتی ۳- کشت‌های درون حفره‌ای که هر کدام با توجه به نوع و مکان سرطان استفاده می‌شوند.

چشمه براکی‌تراپی شبیه سازی شده در این پژوهش $^{252}_{98}\text{Cf}$ می‌باشد. واپاشی غالب این ایزوتوپ مانند بیشتر اکتیدها، تلاشی آلفا است، به طوری که ۳٪ واپاشی‌ها از نوع شکافت خودبخود با نیمه عمر ۸۵/۵ سال و ۹۷٪ از نوع آلفا با نیمه عمر ۲/۷۳ سال هستند. یک گرم ماده فعال از این ایزوتوپ، تعداد $2/3 \times 10^{12}$ نوترون بر ثانیه گسیل می‌کند و فعالیت آن 2×10^{13} Bq است. به بیان دیگر با حدود چند میلی گرم ماده فعال این ایزوتوپ می‌توان چشمه‌ای با قابلیت گسیل $\frac{n}{s} \times 10^6$ و نیمه عمر مؤثر ۲/۶۵ سال تولید کرد.

گاما‌های گسیل شده از ایزوتوپ $^{252}_{98}\text{Cf}$ را می‌توان در سه گروه دسته بندی کرد: ۱- اشعه گامای حاصل از پاره‌های شکافت ۲- اشعه گامای ناشی از واپاشی آلفا ۳- اشعه گامای ناشی از برهم‌کنش (n, γ) . در این پایان‌نامه با استفاده از کد MCNP، دوز ناشی از چشمه کالیفرنیم را در فانتوم آب و در فواصل مختلف از چشمه که از سه قسمت، دوز نوترون‌ها، دوز فوتون‌ها و دوز ناشی از برهم‌کنش (n, γ) تشکیل می‌شود به دست آورده و برای محاسبه دوز کل این سه نوع دوز را با هم جمع می‌کنیم؛ آنگاه منحنی‌های PDD بر حسب فاصله را رسم نموده و با درون‌یابی از روی این منحنی‌ها، منحنی‌های هم‌دوز را ترسیم نمودیم.

فصل اول

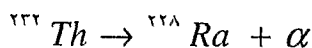
برهم کنش نوترون با ماده

۱-۱ تاریخچه کشف شکافت هسته‌ای

پیشرفت فیزیک هسته‌ای در سال ۱۹۳۰/۱۳۰۹ خیلی با سرعت صورت گرفت. به دنبال کشف نوترون توسط چادویک در سال ۱۹۳۲/۱۳۱۱، مطالعه اثرات هسته‌های مختلف که در معرض پرتوهای نوترون قرار می‌گرفتند، مورد توجه قرار گرفت. انریکو فرمی و همکارانش در ایتالیا، عناصر مختلفی را در معرض پرتوهای نوترونی قرار دادند و پرتوزایی القایی حاصل از گیراندازی نوترون را مطالعه کردند. آنها کشف کردند که بسیاری از هسته‌ها به دنبال گیراندازی نوترون، با گسیل β^- واپاشیده می‌شوند و طی این فرآیند، هسته‌ها تمایل دارند که با تبدیل یک نوترون، فزونی نوترون را جبران کنند [۱].

اما در بمباران اورانیوم با نوترون نتایج عجیبی بدست آمد. فرمی و همکارانش در نتایج آزمایش با اورانیوم، به جای یک عنصر رادیو اکتیو، چهار عنصر با چهار نیمه عمر متفاوت پیدا کردند. چون تا آن موقع فقط سه ایزوتوپ اورانیوم شناخته شده بود، یکی از عناصر حاصله را به اشتباه عنصر ۹۳ تصور کردند. در طی این سالها، مقالات فرمی و همکارانش مورد توجه ماینتر (Meitner)، هان (Hahn) و اشتراسمان (Strassman) قرار گرفت. آنها نیز آزمایشهای فرمی را در برلین تکرار کردند و در آزمایشهای خود از روش شاخص گذاری (Indicator) استفاده کردند.

اشتراسمان و هان در سال ۱۳۱۷/۱۹۳۸ آزمایشهای خود را تکرار کردند و در طی این آزمایشها، عناصری را که تصور می کردند چهار ایزوتوپ رادیوم است، پیدا کردند. این نتیجه نامعقول می نمود، زیرا برای تولید رادیوم از اورانیوم باید طبق واکنشهای زیر دو آلفا گسیل می شد و این از لحاظ انرژی قابل قبول نبود.



هان و اشتراسمان با استفاده از روشهای رادیو شیمیایی خیلی دقیق یقین پیدا کردند که آنچه تصور می کردند ایزوتوپ رادیوم است در واقع باریوم (Ba) بوده است [۲]. بنابراین نتیجه گرفتند که با بمباران عناصر سنگین توسط نوترون، طی فرآیند ناشناخته‌ای عناصر سبکتر بوجود می آیند؛ که این فرآیند ناشناخته را اولین بار مایتنر و فریش در سال ۱۳۱۸/۱۹۳۹ شکافت (Fission) نامیدند [۳].

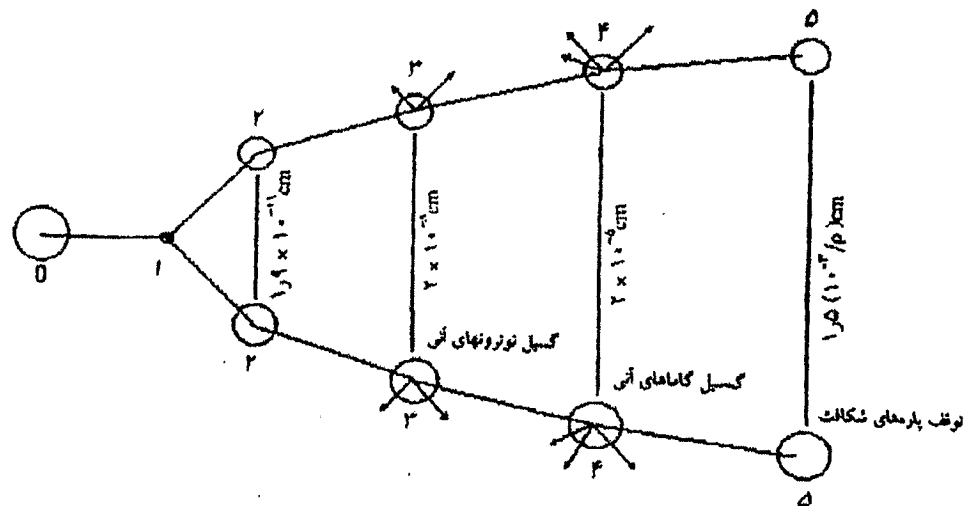
۲-۱ فیزیک فرآیند شکافت

شکافت عمدتاً بر اثر رقابت بین نیروهای هسته‌ای و کولنی در هسته‌های سنگین حاصل می شود. انرژی بستگی هسته‌ای کل تقریباً متناسب با A (یا تقریباً متناسب با Z) افزایش می یابد، در حالی که انرژی دافعه کولنی پروتون‌ها به طور سریعتر مثلاً متناسب با Z^2 افزایش می یابد. می توان هسته‌های سنگین را به صورت هسته‌های واقع در نزدیک لبه چاه پتانسیل در نظر گرفت، که در آن سد کولنی خیلی نازک و به آسانی قابل نفوذ است. در این صورت شکافت می تواند خودبخود به عنوان یک فرآیند واپاشی طبیعی روی دهد، یا می تواند از طریق جذب یک ذره با انرژی نسبتاً کم، نظیر یک فوتون یا نوترون ایجاد شود.

شکافت هسته‌ای یک پدیده کاملاً تجمعی است، به طوری که تحت تأثیر یک رشته نوسان‌های شدید، هسته تغییر شکل پیدا کرده و این تغییر شکل منجر به شکسته شدن آن به دو پاره شکافت تقریباً هم جرم می‌شود. این شکستگی را برش می‌نامند. در نقطه برش ممکن است بیشتر از دو پاره شکافت نیز بوجود آید.

بعد از نقطه برش، نیروی دافعه کولنی پاره‌های شکافت، بیشتر از نیروی جاذبه هسته‌ای آنها شده و پاره‌ها یکدیگر را دفع می‌کنند، و در خلال آن با گسیل نوترون و پرتو بتا به حالت‌هایی با عمر طولانی و یا حالت‌های پایه وا انگیخته می‌شوند. فرآیند وا انگیختگی اولیه را فرآیند آنی (prompt) می‌نامند. پاره‌های شکافت حتی اگر در حالت پایه‌شان تشکیل شوند معمولاً دور از خط پایداری بتا (β) هستند. بنابراین با گسیل بتا یا نوترون به هسته‌های پایدار تبدیل می‌شوند؛ این فرآیندها را فرآیندهای تأخیری (delay) می‌نامند [۴].

مقیاس زمانی مراحل مختلف شکافت در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. در این شکل، مقیاس افقی، زمان بقای مراحل مختلف و مقیاس عمودی، فاصله بین پاره‌های شکافت را نمایش می‌دهد [۵].



$$| -10^{-14} \text{ s} | - | 10^{-10} \text{ s} | - | 10^{-13} \text{ s} | - | 2 \times 10^{-12} \text{ s} | - | (15/p) \times 10^{-17} \text{ s} |$$

شکل ۱-۱: نمایش فرآیند شکافت. رویدادها عبارتند از:

- ۰- شکل‌گیری حالت اولیه ۱- شکافت (لحظه برش) ۲- پاره‌های شکافت ۳- گسیل نوترون‌های آبی
- ۴- گسیل گاماها ی آبی ۵- توقف پاره‌های شکافت و واپاشی آنها توسط فرآیندهای تأخیری.

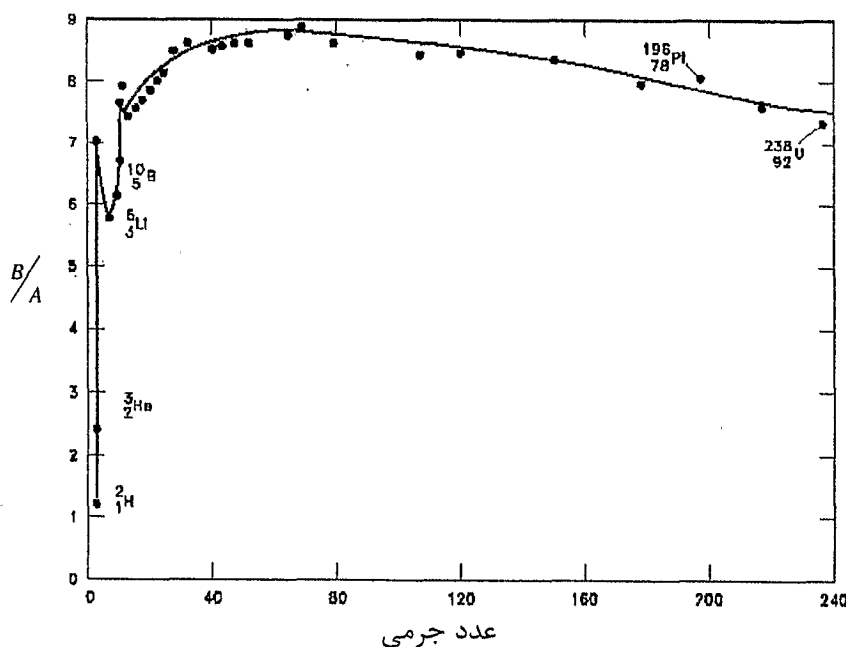
۳-۱ شکافت خود بخود

اغلب تصور می‌کنیم که شکافت تحت شرایط غیر طبیعی، مثلاً در یک راکتور هسته‌ای، رخ می‌دهد اما بعضی هسته‌ها در طبیعت وجود دارند که عمل واپاشی رادیواکتیو در آنها به صورت شکافت خودبخودی ظاهر می‌شود. این فرآیند با شکافت ایجاد شده توسط نوترون یا شکافت القایی که در راکتور رخ می‌دهد، مشابهت دارد ولی با این تفاوت که در این مورد لزومی به گیراندازی قبلی نوترون برای شروع شکافت نیست. در این فرآیند، هسته سنگین که نوترون اضافه دارد تقریباً به دو نیمه تقسیم می‌شود و به دو هسته سبک‌تر تبدیل می‌گردد. هسته‌های نهایی بر خلاف واپاشی آلفا و بتا

دقیقاً مشخص نیستند. بلکه بطور آماری در گستره هسته‌های میان وزن توزیع شده‌اند. هسته‌های ^{254}Cf ($t_{1/2} = 60/5d$) و ^{252}Cf ($t_{1/2} = 2/648y$) و ^{256}Fm ($t_{1/2} = 2/6h$) عمده‌ترین نمونه‌هایی هستند که خودبخود شکافته می‌شوند. با توجه به نیمه عمر نسبتاً زیاد ^{252}Cf نسبت به بقیه اهمیت بیشتری دارد.

۴-۱ پاره‌های شکافت

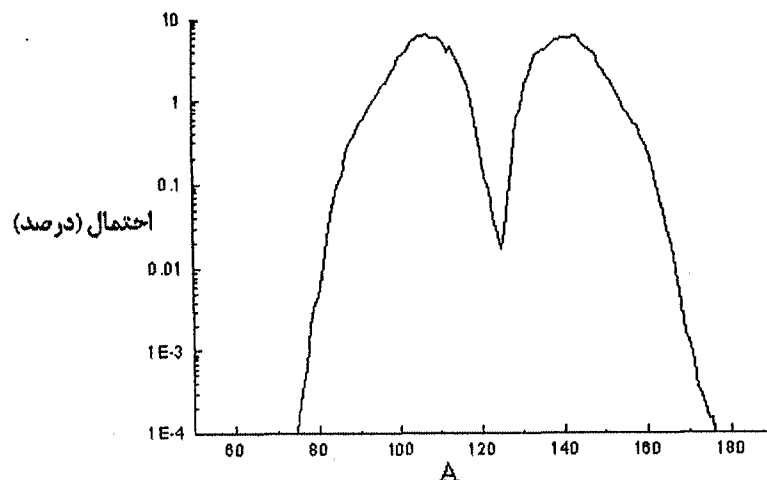
همان گونه که دیدیم شکافت واکنشی است که در آن یک هسته سنگین به دو پاره سبکتر تقسیم می‌شود. در فرآیند شکافت انرژی آزاد می‌شود، زیرا انرژی بستگی برای هر نوکلئون در هسته سنگین، کمتر از پاره‌های شکافت متعلق به میانه جدول تناوبی است. در واقع برای $A > 65$ انرژی بستگی متوسط بر نوکلئون کاهش می‌یابد.



شکل ۱-۲: انرژی بستگی متوسط بر حسب عدد جرمی.

بنابراین هسته‌ای با A بزرگ ممکن است با عمل شکافت به پیکربندی پایدارتری برسد. چنین شکافت خودبخودی ممکن است ولی بسیار نامحتمل است. فقط هسته‌های بسیار سنگین ($Z > 92$) با آهنگی چشمگیر دستخوش شکافت خودبخودی می‌شوند.

یک هسته همیشه به یک نحو تقسیم نمی‌شود. هر پاره شکافت با احتمالی خاص جزء محصولات شکافت خواهد بود. بطور مثال بر اساس داده‌های موجود در آزمایشگاه ملی لوس آلاموس در سال ۱۳۷۲/۱۹۹۳ عنصر ${}^{252}_{98}\text{Cf}$ در اثر شکافت خودبخود حدوداً به ۸۴۶ پاره متفاوت شکافته می‌شود، که هر یک از این پاره‌ها احتمالی خاص را به خود اختصاص می‌دهد [۶].



شکل ۱-۳: درصد محصولات شکافت خودبخود ${}^{252}_{98}\text{Cf}$ بر حسب عدد جرمی A .

چنانچه در شکل ۱-۳ مشاهده می‌گردد احتمال شکافت متقارن نسبت به شکافت نامتقارن کمتر می‌باشد. پاره‌های شکافت خیلی پیچیده‌تر از ذرات ساده مانند نوکلئون‌ها هستند، زیرا می‌توانند به شکلهای غیر کروی درآیند، نوسان کنند و صورت‌های مختلف برانگیختگی را اختیار کنند. در تمام فرآیندهای شکافت، وقتی که سد کولنی پشت سر گذاشته می‌شود، دو پاره شکافت توسط نیروی کولنی به خارج شتاب می‌گیرند، به طوری که انرژی جنبشی نهایی آن‌ها نزدیک به ارتفاع سد می‌شود.

۵-۱ پرتوزایی پاره‌های شکافت

پاره‌های شکافت اغلب ناپایدارند و با گسیل نوترون، بتا و گاما واپاشیده می‌شوند و اغلب آنها پس از رخداد شکافت، پرتوزا باقی می‌مانند. در جدول ۱-۱ خلاصه‌ای از محصولات و انرژی‌های تقریبی هر

کدام، در اثر شکافت آمده است. ذرات مهمی که از پاره‌های شکافت گسیل می‌شوند عبارتند از:

۱- بتا (β): تقریباً در هر شکافت شش ذره بتا گسیل می‌شود که انرژی کل 7 MeV را حمل می‌کنند.

۲- گاما (γ): تقریباً هفت پرتو گاما، هنگام شکافت گسیل می‌شوند. اینها را گاما‌های آنی می‌نامند.

پس از آن تقریباً هفت تا هشت گامای دیگر آزاد می‌شوند که به گاما‌های تأخیری معروفند. فوتونها در

کل حدود 15 MeV در هر شکافت حمل می‌کنند.

۳- نوترون (n): تعداد نوترون‌ها در هر شکافت بین ۲ تا ۳ است. نوترون‌ها انرژی‌های متفاوتی دارند،

مثلاً انرژی نوترون‌های حاصل از شکافت خودبخود $^{252}_{98}\text{Cf}$ دارای یک طیف ماکسولی می‌باشند.

انرژی میانگین نوترونی که در شکافت گسیل می‌شود حدود 2 MeV است. بیش از ۹۹٪ نوترون‌ها

هنگام شکافت گسیل می‌شوند که نوترون‌های آنی نامیده می‌شوند. کسر کوچکی نیز به صورت

نوترون‌های تأخیری گسیل می‌شوند.

۴- نوترینو (ν): حدود 11 MeV انرژی را نوترینوها که در خلال شکافت تولید می‌شوند، حمل

می‌کنند، این انرژی تنها بخشی از محصول انرژی شکافت است که کاملاً فرار می‌کند. این انرژی نشانگر

۵٪ انرژی کل شکافت است [۷].

جدول ۱-۱ خلاصه‌ای از محصولات شکافت

ذره	شکافت/تعداد	شکافت/MeV
پاره‌های شکافت	۲	۱۶۰ تا ۱۷۰
نوترون	۲ تا ۳	۵
گاما (آنی)	۷	۸
گاما (تأخیری)	۷	۷
بتا	۶	۷
نوترینو	۶	۱۱

۱-۶ برهم‌کنش نوترون با ماده

برهم‌کنش‌های نوترون با ماده تغییرات ملایمی با انرژی و عدد اتمی، آن گونه که برخوردهای فوتون با ماده نشان می‌دهد، ندارد. بنابراین بیان آنها در غالب اصول کلی مشکل‌تر می‌باشد.

برهم‌کنش نوترون با ماده برخلاف برهم‌کنش فوتون با ماده که الکترون‌های با سرعت زیاد در مواد تحت تابش ایجاد می‌کند، بازه نسبتاً وسیعی از هسته‌های برگشتی، ذرات زیر اتمی و فوتون‌هایی که برهم‌کنش‌های آن در فصل بعدی معرفی می‌شوند را تولید می‌نمایند. ذرات باردار متنوعی که بدین وسیله به وجود می‌آیند، انرژی‌شان را به روش‌های بسیار متفاوتی به محیط منتقل نموده و این امر نتایج بیولوژیکی مهمی را در بردارد.

۱-۶-۱ برخورد کشسان

ساده‌ترین فرآیند برهم‌کنش برای یک نوترون برخورد کشسان آن با یک هسته‌ی اتم است، در این برخورد نوترون منحرف شده و بخشی از انرژی آن به هسته منتقل می‌شود. انرژی منتقل شده E_{tr} ، به هسته‌ای با جرم M در اثر برخورد کشسان نوترونی به جرم m و انرژی E_n از رابطه زیر بدست می‌آید :

$$E_{tr} = E_n \frac{4Mm}{(M+m)^2} \cos^2 \theta \quad (۲-۱)$$

θ زاویه برگشت هسته در مختصات آزمایشگاهی است. این رابطه نشان می‌دهد که انرژی انتقالی در صورتی بیشترین مقدار است که جرم هسته کمترین مقدار باشد و این امر برای هسته هیدروژن (پروتون) با جرم بسیار نزدیک به نوترون اتفاق می‌افتد. چنین برخوردی را به صورت $H(n,n')H$ نشان داده و سطح مقطع آن با افزایش انرژی نوترون ابتدا به سرعت و سپس برای انرژی‌های ۱ تا ۲ MeV اولیه به طور آهسته و در انرژی‌های بیشتر به طور آهسته‌تر کاهش می‌یابد سطح مقطع برای سایر مواد مهم بیولوژیکی مانند اکسیژن، ازت و کربن به همین صورت می‌باشد.

۱-۶-۲ برخورد ناکشسان

در برخورد نوترون با هسته، نوترون می‌تواند به طور لحظه‌ای توسط هسته شکار شده و سپس با انرژی کاهش یافته‌ای تابش شود. در این صورت هسته به حالت تحریکی در آمده و با تابش پرتو گاما به حالت پایه‌ای خود بر می‌گردد. یک مثال از چنین برخوردی $^{16}O(n,n')^{16}O^*$ است که $^{16}O^*$ با تابش پرتو گاما با انرژی ۶/۱ MeV به حالت پایدار بر می‌گردد.

۱-۶-۳ برخورد غیرکشسان

اگر ذره حاصل از برخورد نوترون نباشد، عبارت غیرکشسان استفاده می‌شود. در عناصر مهم بیولوژیکی مانند کربن، ازت و اکسیژن برخوردهای ناکشسان و غیرکشسان معمولاً دارای انرژی آستانه‌ای در محدوده $4-12 \text{ MeV}$ می‌باشند. با افزایش انرژی آستانه به بیشتر از 10 MeV ، سطح مقطع این برخوردها با سرعت افزایش یافته و به مقدار نسبتاً ثابتی می‌رسد.

۱-۶-۴ فرآیند گیر اندازی (شکار)

نوترون‌های حرارتی می‌توانند توسط هسته شکار شوند. سطح مقطع این واکنش در انرژی‌های بیشتر از 0.25 MeV اغلب با افزایش انرژی نوترون کاهش می‌یابد. دو مثال مهم برای این فرآیند عبارتست از $^1\text{H}(n,\gamma)^1\text{H}$ که انرژی پرتوگاما آن 2.2 MeV می‌باشد و $^{14}\text{C}(n,p)^{14}\text{N}$ که پروتون با انرژی 0.6 MeV تولید می‌نماید.

۱-۷ اهمیت نسبی برهم‌کنش نوترون با عناصر H و C و N و O

اولین مرحله برای انتقال انرژی نوترون به ماده، تبدیل آن به انرژی جنبشی ذرات باردار است. برای نوترون با انرژی‌های بین 100 eV تا 20 MeV و در بافت نرم که عمدتاً از عناصر H و C و N و O تشکیل شده، برخورد کشسان با هیدروژن مهمترین فرآیند می‌باشد. بطوریکه واکنش $^1\text{H}(n,n')^1\text{H}$ در 10 KeV حدود 97% انرژی اولیه را انتقال می‌دهد. این مقدار مطابق آنچه در شکل ۱-۴ ملاحظه می‌شود، در 8 MeV به حدود 87% و در 18 MeV تا حدود 70% کاهش می‌یابد. این امر - با توجه به آن که هیدروژن تنها 10% وزنی بافت نرم را تشکیل می‌دهد- این نکته را مشخص می‌کند که در دوزیمتری نوترون هر ماده‌ای که به عنوان معادل بافت استفاده می‌شود، بایستی حاوی هیدروژن به مقدار بسیار نزدیک به بافت مورد نظر باشد. فرآیندهایی که در مراحل بعدی اهمیت قرار دارند، به