

طیف محاسباتی انرژی نوترون در چشمه‌های α -n با استفاده از روش مونت کارلو

مجتبی خلج، رحیم کوهی فایق و محمد هادی هادی زاده یزدی

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

دریافت مقاله: ۷۷/۱۲/۳ دریافت نسخه نهایی: ۷۸/۴/۲۰

چکیده

در چشمه α -Be به عنوان یک چشمه (α, n) ، برهمکنش $Be(\alpha, n)$ رخ می‌دهد و نوترونی با انرژیهای متفاوت در کانالهای مختلف تولید می‌شوند. در این تحقیق، با استفاده از اعداد کاتوره‌ای، این برهمکنش شبیه سازی، و سپس طیف انرژی نوترونی حاصل محاسبه شده است. در آغاز، فقط یک کانال واکنش، که عمده ترین کانال است، در نظر گرفته می‌شود. این کانال $n + {}^{12}C$ است که خود شامل سه زیرکانال مجزا می‌باشد. سپس، برای رسیدن به وضعیت واقعیت فرض می‌شود که نوترون پس از تولد و پیش از خروج از چشمه، حداکثر یک برهمکنش با ذرات چشمه انجام می‌دهد. در پایان، نتایج به دست آمده با نتایج دیگران مقایسه می‌شود.

۱. مقدمه

نوترون به دلیل نداشتن بار الکتریکی نمی‌تواند برهمکنشهای الکترومغناطیسی انجام دهد، بنابراین نمی‌توان آن را به طور مستقیم آشکار کرد. با توجه به کاربردهای گوناگون نوترون در علوم و فنون مختلف، تعیین انرژی این ذره که مستلزم آشکارسازی آن است بسیار مورد توجه است. از زمان کشف نوترون، چندین روش برای تعیین انرژی آن ابداع شده است که در همه آنها انرژی نوترون به طور غیرمستقیم و با استفاده از برخورد های فیزیکی آن با ذرات دیگر، محاسبه می‌شود. این روشها شامل، زمان پرواز، اندازه گیری با استفاده از امولسیون هسته‌ای، اندازه گیری با استفاده از پس زنی پروتون، و روش محاسبه تحلیلی با استفاده از داده‌های تجربی است. روش دیگر،

که در این مقاله به آن می‌پردازیم، روش مونت کارلو است که با پیدایش رایانه‌های سریع بسط و گسترش بسیاری یافته است.

۲. چشمه‌های نوترون

در طبیعت عناصری وجود دارند که خودبه‌خود ذره α گسیل می‌کنند. اما هیچ عنصری را نمی‌توان یافت که نوترون گسیل کند [۱]. برای تولید نوترون از برهمکنشهای هسته‌ای استفاده می‌شود. این برهمکنشها شامل (α, n) ، (γ, n) ، (p, n) و (d, n) هستند که هر کدام از آنها را می‌توان با عناصر مختلفی به عنوان هدف به کار برد. البته برهمکنش (f, n) نیز به عنوان یک چشمه گسیلنده نوترون مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ مثلاً ${}^{252}Cf$ با شکافت خودبه‌خودی، نوترون تولید می‌کند.

روشهای دیگر معمول، استفاده می شود [۱۴].

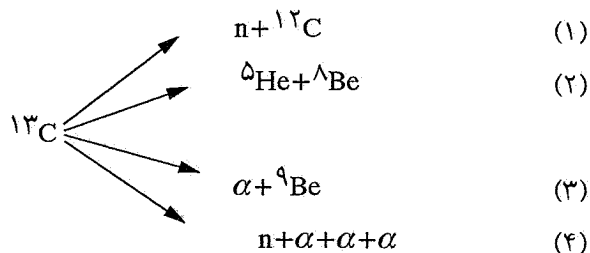
طیف محاسباتی نوترون برای هر چشمه، وقتی با واقعیت تطبیق خواهد کرد که از تمامی حوادثی که در چشمه رخ می دهد، و در نهایت، منجر به تولید نوترون می گردد، اطلاع کافی داشته باشیم. لذا، گام به گام، حوادثی را که در چشمه Am-Be رخ می دهند بررسی، و با استفاده از روش مونت کارلو آنها را شبیه سازی و طیف چشمه را محاسبه می کنیم؛ طیف چشمه های $\alpha-n$ دیگر نیز تقریباً شبیه طیف چشمه Am-Be است.

ابتدا برای برهمکنش $Be(\alpha, n)$ باید ذره آلفا تولید شود که این آلفا با انرژی 5.48 MeV از هسته ^{241}Am گسیل می شود. البته آلفاهای با انرژیهای دیگری نیز وجود دارند، اما چون فراوانی و/یا اختلاف انرژی آنها با آلفای مذکور بسیار کم است، انرژی آلفا را 5.48 MeV در نظر می گیریم. آلفا پس از گسیل از Am به گلوله های Be برخورد می کند و وارد آنها می شود، و پس از طی مسافتی، با یکی از هسته های Be برهمکنش کرده و جذب آن می شود. در طول مسیری که آلفا درون گلوله Be می پیماید، در اثر برخوردهای کولنی با اتمهای Be مقداری انرژی از دست می دهد. برای تعیین انرژی ذره آلفا به هنگام برهمکنش با Be متذکر می شویم که احتمال برهمکنش یک ذره با ذره دیگر از رابطه زیر [۱ و ۵]

$$n \sigma(E_{\alpha}, \theta) \frac{dE_{\alpha}}{dx}$$

به دست می آید، که در آن n تعداد هسته های هدف در واحد حجم، σ سطح مقطع برخورد، و $\frac{dE_{\alpha}}{dx}$ توان ایستاندگی محیط برای ذره آلفاست. این احتمال را برای انرژیهای از صفر تا 5.48 MeV ، در بازه های 0.5 تا 0 ، محاسبه و با هم جمع می کنیم، و آنگاه، عددی کاتوره ای بین صفر و این حاصل جمع تولید می کنیم؛ بسته به اینکه این عدد در کدام بازه 0.5 واقع بشود، انرژی برهمکنش آلفا متفاوت خواهد بود. در اینجا برای واکنش $Be(\alpha, n)$ دو کانال در نظر می گیریم: یکی کانال ۱، و دیگری کانال ۴. کانال ۱ خود شامل ۳ زیرکانال، مطابق با سه

عمده ترین برهم کنشی که از آن برای تولید نوترون استفاده می شود برهمکنش (α, n) است که در آزمایشگاهها کاربرد فراوان دارد، و از این نظر، آن را بیشتر مورد بررسی قرار می دهیم. هدفی که معمولاً برای این واکنش به کار برده می شود ^9Be ، و عوامل گسیلنده آلفا، عنصرهای سنگینی مانند ^{241}Am یا ^{226}Ra هستند؛ در این کار، چشمه Am-Be مورد نظر است. در اثر برخورد و جذب ذرات آلفا در ^9Be ، هسته مرکب ^{13}C تشکیل می شود، که معمولاً، در حالت برانگیخته است و، به طور عمده، از طریق کانالهای زیر واپاشی می کند [۲]



در کانال ۲، ^8Be خیلی سریع به دو ذره آلفا، و ^5He به یک نوترون و یک ذره آلفا تبدیل می شوند. البته مهمترین کانال، همان کانال ۱ است و کانالهای دیگر با احتمالهای خیلی کم رخ می دهند [۳]. در این مقاله ما فقط به بررسی کانالهای ۱ و ۴ می پردازیم.

وقتی نوترون در کانال ۱ تولید شد، بسته به اینکه هسته ^{12}C در چه حالتی از برانگیختگی باشد، انرژی آن متفاوت است.

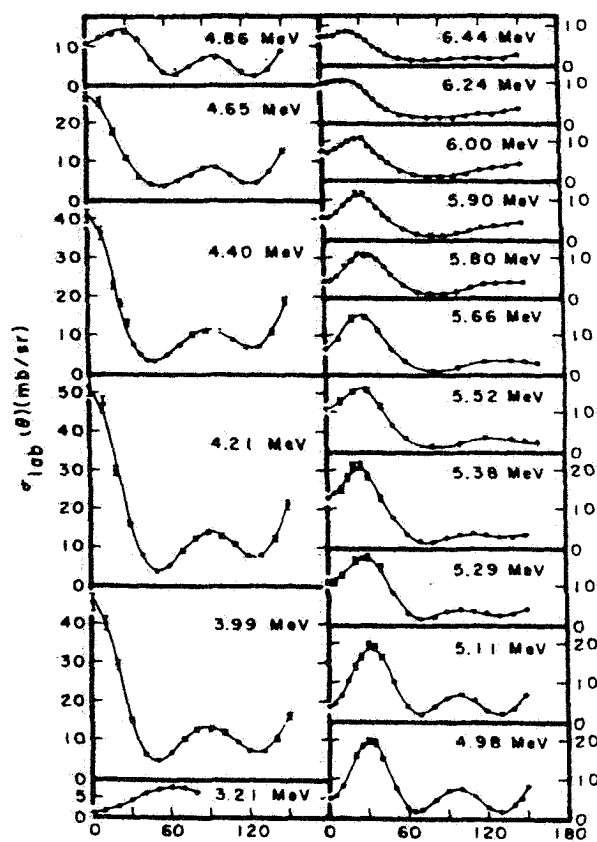
۳. محاسبات مونت کارلو

این محاسبات مبتنی بر اعداد کاتوره ای هستند که، همان گونه که می دانیم، هیچ ارتباط مشخصی بین آنها برقرار نیست. برای تولید این اعداد از زیر برنامه های نوشته شده در مرجع ۴ استفاده می شود. توزیع این اعداد یکنواخت است اما در محاسبات مونت کارلو به اعداد کاتوره ای با توزیعهای مختلف نیاز داریم که برای این منظور از اعداد با توزیع یکنواخت در روش حذفی، یا

گام بعدی، تعیین زاویه گسیل نوترون نسبت به جهت اولیه آلفاست. توزیع زاویه‌ای نوترون در برهمکنش مذکور علاوه بر وابستگی به تراز برانگیخته ^{12}C به انرژی ذره آلفا هم وابسته است. بنابراین برای تعیین جهت نوترون گسیل شده باید از $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ که برای انرژیهای مختلف آلفا و ترازهای ^{12}C فرق می‌کند استفاده کرد. متأسفانه چنین سطح مقطعی به راحتی قابل اندازه‌گیری نیستند و به همین دلیل تهیه منابع جدید و مطمئن مشکل است. برای این منظور از داده‌های مرجع ۵ استفاده کرده‌ایم که برای نمونه توزیعهای زاویه‌ای آن مرجع را برای تراز پایه ^{12}C در شکل ۱ نمایش داده‌ایم. همان‌طور که ملاحظه می‌شود این توزیعها در انرژیهای آلفای معینی ارائه شده‌اند. این وضعیت برای داده‌های دیگر هم وجود دارد. توزیع زاویه‌ای مورد نیاز در انرژی آلفای مورد بررسی، که غالباً برای آن توزیعی ارائه نشده است، از درونبایی خطی این داده‌ها به دست آمده است. حال با استفاده از توزیعهای زاویه‌ای موجود برای سه حالت کربن، توزیعی برای اعداد کاتوره‌ای تولید می‌کنیم که با توزیع مربوط به زیرکانال انتخاب شده و انرژی آلفای مورد بررسی مشابه باشد؛ عددی که از این توزیعها انتخاب می‌شود زاویه گسیل نوترون را مشخص می‌کند. اکنون، با داشتن انرژی برهمکنش آلفا، کانال و واکنش و زاویه گسیل نوترون، با استفاده از رابطه سینماتیکی

$$\sqrt{E_{\alpha}} = -\frac{\sqrt{M_n M_{\alpha} E_n}}{M_c - M_{\alpha}} \cos \theta \pm \left\{ \frac{M_n M_{\alpha} E_n}{(M_c - M_{\alpha})^2} \right. \\ \left. \cos^2 \theta + \frac{M_c + M_n}{M_c - M_{\alpha}} E_n - \frac{M_c}{M_c - M_{\alpha}} Q \right\}^{1/2}$$

انرژی نوترون را حساب می‌کنیم. انرژی نوترون که حساب شد با توجه به ساختاری که به طور ستونی برای طیف نوترون در نظر گرفته‌ایم، ستون مربوطه را به اندازه یک واحد افزایش می‌دهیم. به عبارت دیگر در محاسبات انجام شده از مونت کارلوی آنالوگ استفاده کرده‌ایم و اصولاً به روشهای کاهش واریانس همچون روش وزنی، انشقاق، و غیره نپرداخته‌ایم. دلیل اصلی این امر آن



زاویه آزمایشگاهی (درجه)

شکل ۱. توزیع زاویه‌ای نوترون برای تراز پایه کربن در کانال ۱ (از مرجع ۵).

حالت پایه، برانگیختگی اول و برانگیختگی دوم ^{12}C است. برای تعیین کانال و واکنش، باز هم از اعداد کاتوره‌ای استفاده می‌کنیم، به این ترتیب که با داشتن سطح مقطعی هر کانال، عددی بین صفر و σ_{tot} همخوان با انرژی از پیش تعیین شده ذره آلفا تولید، و با توجه به موقعیت این عدد در بازه‌های مربوط به کانالها، کانال وقوع واکنش را مشخص می‌کنیم. سطح مقطع واکنش $\text{Be}(\alpha, n)$ در زیرکانالهای مذکور و کانال ۴ را همراه با سطح مقطع کل واکنش به صورت تابعی از انرژی در شکل ۱ ملاحظه می‌کنید. البته لازم به یادآوری است که زیرکانالهای دیگری (حالت‌های برانگیختگی بالاتر ^{12}C) هم وجود دارند، اما چون انرژی آستانه آنها بالا و سطح مقطع آنها در انرژی پایتتر از ۶ MeV خیلی کوچک است از آن چشم‌پوشی کرده‌ایم.

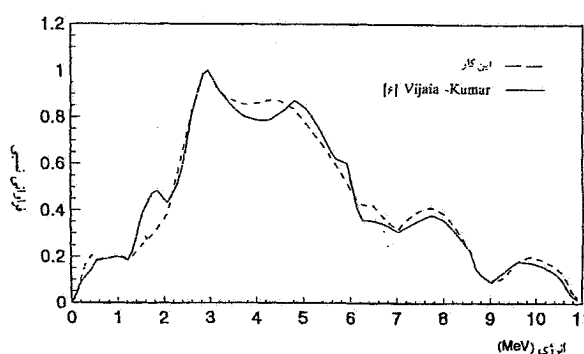
است از

$$\sum_t e^{-\sum_t x} dx$$

با استفاده از سطح مقطع ماکروسکوپی کل چشمه و اعداد کاتوره‌ای، مسافتی را که نوترون از محل تولید تا اولین برخوردش با ذرات محیط طی می‌کند محاسبه، و سپس، با لحاظ کردن سطح مقطع واکنشها برای هر یک از عناصر چشمه، با روشی که قبلاً شرح آن گذشت نوع واکنش و عنصری که نوترون با آن برخورد می‌کند را تعیین می‌کنیم. اگر برهمکنش، پراکندگی باشد (خواه کشسان، خواه ناکشسان) به کمک اعداد کاتوره‌ای و توزیعیهای زاویه‌ای موجود زاویه پراکندگی را تعیین و با توجه به سینماتیک برخورد [۷] انرژی پس از پراکندگی نوترون را حساب می‌کنیم. اگر برهمکنش (n, f) رخ بدهد، چون توزیع انرژی نوترونهای حاصل از شکافت در دسترس است [۸]، با استفاده از اعداد کاتوره‌ای انرژی این نوترونها را نیز حساب می‌کنیم. اما اگر برهمکنش (n, γ) رخ بدهد، به دلیل در اختیار نبودن توزیعیهای زاویه‌ای نوترونهای حاصل، این توزیعیها را یکسواخت در نظر می‌گیریم و محاسبات را مطابق برهمکنشهای دیگر انجام می‌دهیم.

تمام این محاسبات پس از برنامه‌نویسی با رایانه انجام، و نتایج حاصل در شکل ۳. الف با طیف بی‌برخورد چشمه، یعنی حالتی که نوترون حاصل از برهمکنش (α, n) بدون انجام برهمکنشی از چشمه خارج شود، مقایسه شده است. در شکل ۳. ب نیز نتیجه کار ویجی و کمار [۶] جهت مقایسه آورده شده است. در هر دو شکل، همان‌طور که انتظار می‌رود، اثر برهمکنشهای درون چشمه در قسمت‌های کم انرژی طیف ظاهر می‌شود.

در شکل ۴ نتیجه نهایی محاسبات را با نتیجه اندازه‌گیریهای اخیر ارائه شده در [۹ و ۱۰] مقایسه کرده‌ایم. اگرچه توافق کلی بین دو طیف به روشنی دیده می‌شود، اما اختلافهایی جزئی نیز مشهود است. بررسی این اختلافها، موضوع تحقیق عده‌ای از پژوهشگران بوده است، و نتیجه این



شکل ۲ طیف بی‌برخورد چشمه Am-Be

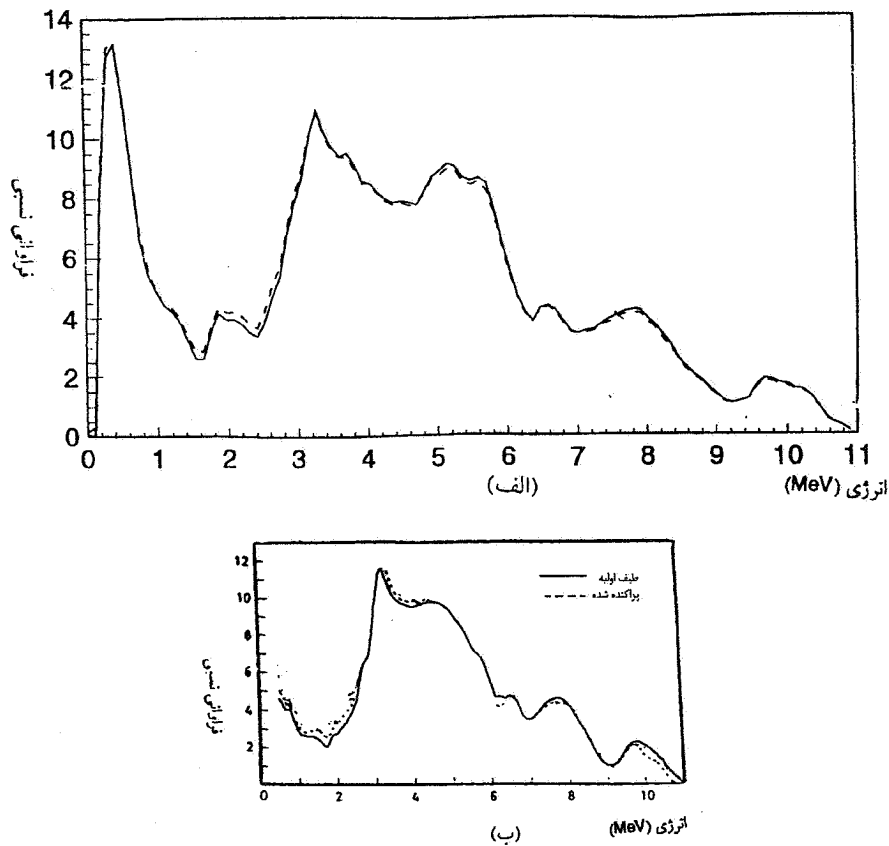
بوده است که ساده بودن محاسبات، زمان اجرای برنامه توسط رایانه را آنقدر کوتاه می‌ساخت که زمینه استفاده از محاسبات غیر آنالوگ را ایجاد نمی‌کرد. شکل ۲، نشانگر مقایسه طیف محاسبه شده در این کار (فقط با لحاظ کردن کانالهای ۱ و ۴) با کار محاسباتی انجام شده توسط ویجی و کمار [۶] است.

تا اینجا برهمکنش نوترون با مواد موجود در چشمه‌های، O، Be، و Am، را لحاظ نکرده‌ایم. چون سطح مقطع نوترون با این مواد، حداقل در بعضی از انرژیها بزرگ است، به نظر می‌آید که احتمال نسبی چنین برهمکنشهایی، و در نتیجه تغییر در طیف محاسبه شده، قابل ملاحظه باشد. اما از طرفی چشمه‌های Am-Be معمولاً کوچک‌اند، در حد چند سانتیمتر مکعب، و ثابت شده است [۶] که برهمکنشهای چندگانه بسیار معدوداند و اثر قابل ملاحظه‌ای بر طیف نوترون این چشمه‌ها ندارند. بر این اساس فرض می‌کنیم که نوترون قبل از خروج از چشمه حداکثر یک برهمکنش با هسته‌های چشمه انجام می‌دهد. بدیهی است که در این مرحله به سطح مقطع برهمکنشهای نوترون با ذرات چشمه نیاز داریم. در این محاسبات از سطح مقطعهای موجود در کتابخانه ENDFB-IV استفاده کرده‌ایم. این سطح مقطعها نشان می‌دهند برهمکنشهایی که در چشمه رخ می‌دهند عبارت‌اند از

$$(n, n'), (n, n)$$

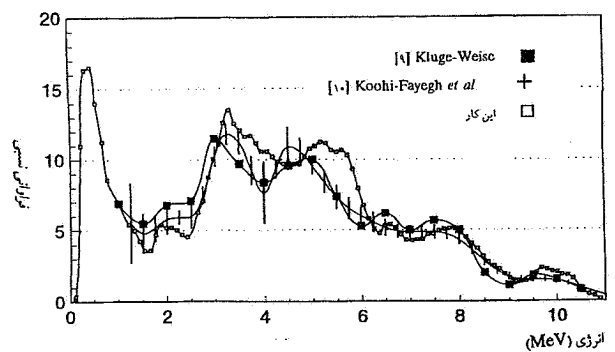
$$(n, \gamma), (n, f)$$

و احتمال برهمکنش نوترون با ماده در فاصله x و $x+dx$ عبارت



شکل ۳. مقایسه طیف بی برخورد و طیف واقعی چشمه Am-Be ، (الف) این کار، (ب) مرجع ۴.

متأسفانه فروشندگان این چشمه‌ها مشخصات دقیق آنها، مثل قطر دانه‌ها و... را ارائه نمی‌دهند که بتوان محاسبات را دقیقتر با نتایج تجربی مقایسه کرد. از آن گذشته اندازه‌گیری طیف هم با دقت لازم برای مقایسه با محاسبات امکان‌پذیر نیست، بخصوص در انرژی‌های پایینتر از ۱ MeV که اندازه‌گیری مشکلتر است. این مطلب به خوبی از مقایسه دو طیف اندازه‌گیری شده در شکل ۴ دیده می‌شود. اما خوشبختانه در اغلب کاربردهای این‌گونه چشمه‌ها به چنین دقتی نیاز نیست.



شکل ۴ مقایسه طیف محاسباتی چشمه Am-Be با نتایج تجربی.

تحقیقات نشان داده است که عوامل متعددی مثل اندازه دانه‌های Be و Am درون چشمه، چگالی مخلوط، اندازه فیزیکی چشمه، و داده‌های هسته‌ای در ایجاد این ناسازگاریها سهم‌اند.

مراجع

۱. و میرهوف، "مبانی فیزیک هسته‌ای"، مترجم م ف رحیمی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد ۱۳۷۱.
2. B Antolkovic and Z Dolenc, *Nuclear Physics A* **237** (1975) 235.
3. K W Geiger and L Van der zawn, *Nuclear Instruments & Methods* **131** (1975) 315
4. W H Press, B P Flannery and S A Teukolsky, *Numerical Recipies*, Cambridge University Press 1986.
5. A W Obst, T B Grandy and J L Weil, *Physical Review C* **5** (1970) 738.
6. A D Vijaia and A Kumar, *Nuclear Instruments & Methods* **111** (1973) 435.
۷. ک کرین، "آشنایی با فیزیک هسته‌ای ج ۲"، مترجم ن میرفخرایی و م مدرس، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۱.
8. J R Lamarsh, *Nuclear reactor Theory*, New York University Press, (1965).
9. H Kluge and K Weise, *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 2, No. 2 (1982) 85-93.
10. R Koochi-Fayegh, S Green and M C Scott, *Nuclear Instruments and Methods (in preparation)*.