

گذر از شکافت نامتقارن به متقارن در واکنش شکافت اورانیوم ۲۳۸ با پروتونهای ۴۵ - ۶۹ MeV

هوشیار نوشاد

پژوهشکده علوم هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی ۸۳۶ - ۱۴۳۹۵، تهران
پست الکترونیکی: hmoshad@aeoi.org.ir

(دریافت مقاله: ۸۵/۸/۶؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۵/۱۲/۲۳)

چکیده

هدفهای نازک ^{238}U با پروتونهای ۴۵، ۵۵، ۶۵ و ۶۹ MeV شتابدهنده سیکلوترون دانشگاه توهوکوی ژاپن بمباران شد و طیفهای گامای گسیل شده از محصولات شکافت با روش طیف‌نگاری پرتوهای گاما به دست آمد. سپس توزیع جرم پاره‌های شکافت و سطح مقطع کل شکافت در هر انرژی اندازه‌گیری شد. دقت این آزمایش به اندازه کافی بود که بتوان داده‌های دقیق و قابل اطمینانی به دست آورد. نتایج تجربی حاصل نشان می‌دهند که در واکنش $^{238}\text{U}(p, f)$ برای $E_p > 65 \text{ MeV}$ ، مؤلفه نامتقارن در توزیع جرم از بین می‌رود و شکافت متقارن به صورت مد غالب ظاهر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: توزیع جرم، اورانیوم ۲۳۸، شکافت متقارن، شکافت نامتقارن، سطح مقطع شکافت، پروتونهای ۴۵ - ۶۹ MeV

۱. مقدمه

از زمان کشف پدیده شکافت هسته‌ای در ۱۹۳۹ تاکنون، اندازه‌گیری توزیع جرم و سطح مقطع شکافت همواره مورد توجه فیزیکدانان هسته‌ای بوده است. با این وجود، هنوز معمای توزیع جرم پاره‌های شکافت حل نشده است. به عبارت دیگر، بستگی این توزیع به انرژی برانگیختگی هسته شکافنده هنوز به درستی درک نشده است. مطالعه توزیع جرم پاره‌های شکافت، اطلاعات ارزنده‌ای در باره ساختار هسته‌ها ارائه می‌دهد و می‌تواند پاسخگوی معمای دیرینه شکافت متقارن یا نامتقارن هسته‌ها باشد. در اکتینیدها ($103 < Z < 89$)، توزیع جرم به‌وضوح نامتقارن است [۱] ولی برای هسته‌های سبک‌تر (پیش‌اکتینیدها) تا حد خیلی زیادی متقارن می‌شود [۲]، به طوری که سهم شکافت نامتقارن عملاً ناچیز است. هر چند که در این هسته‌ها اثرات پوسته‌ای نیز در توزیع جرم نقش دارند

[۳]. این در حالی است که در هسته مرکب ^{226}Ra توزیع جرم پاره‌های شکافت دارای سه برآمدگی است [۴]. خوشبختانه همواره هنگامی که انرژی برانگیختگی هسته شکافنده افزایش می‌یابد، اثرات پوسته‌ای به تدریج از بین می‌روند و توزیع جرم به سمت توزیع متقارن میل می‌کند. در این صورت می‌توان ویژگیهای شکافت چنین هسته‌هایی را با مدل قطره مایع بررسی نمود [۵]. از طرفی دیگر، با اندازه‌گیری سطح مقطع کل شکافت می‌توان پارامترهایی مانند احتمال شکافت و ارتفاع سد شکافت هسته‌های شکافنده را نیز به دست آورد [۶].

در این آزمایش، هدفهای ^{238}U با پروتونهای در محدوده انرژی ۴۵ - ۶۹ MeV بمباران شدند. این واکنش، هسته مرکب شکافنده $^{239}\text{Np}^*$ را با انرژی برانگیختگی $74/3 - 50/3 \text{ MeV}$ به وجود می‌آورد. سپس با طیف‌نگاری پرتوهای گاما، سطح مقطع شکافت برای ایجاد هر پاره شکافت، منحنی توزیع جرم و

دستگاه آشکارساز ژرمانیم فوق خالص (HPGe) با قدرت تفکیک (FWHM) $1/8$ keV در انرژی 1332 keV، و دو تحلیلگر چند کاناله (MCA) با 4096 کانال استفاده شد. فاصله بین نمونه‌ها و آشکارسازها به گونه‌ای اختیار شده بود که زمان مرده آشکارسازها از 10% تجاوز نمی‌کرد. زمان لازم برای ثبت طیفهای گاما نیز از یک دقیقه تا چندین روز بود. برای کالیبراسیون انرژی آشکارسازها نیز از چشمه‌های نقطه‌ای استاندارد ^{152}Eu و ^{241}Am استفاده شد.

۳. محاسبه سطح مقطع

تابش دهی نمونه N اتم، N' اتم رادیواکتیو را مطابق رابطه زیر تولید می‌کند.

$$\frac{dN'}{dt} = -\lambda N' + RNq, \quad (1)$$

که در آن λ ثابت واپاشی بر حسب s^{-1} ، کمیت R تعداد واکنشهای ایجاد شده به ازای یک کولن بار الکتریکی بر حسب C^{-1} و q جریان باریکه بر حسب آمپر است. در $t = 0$ داریم $N' = 0$ ، پس خواهیم داشت:

$$N'(t) = \frac{RNq}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t)) . \quad (2)$$

اگر زمان بمباران t_i باشد، تعداد هسته‌های رادیواکتیو تولید شده در پایان بمباران (N'_i) برابر است با:

$$N'_i = \frac{RNq}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t_i)) . \quad (3)$$

فعالیت نمونه رادیواکتیو در پایان بمباران ($A_i = \lambda N'_i$) برابر است با:

$$A_i = RNq(1 - \exp(-\lambda t_i)) . \quad (4)$$

پس از بمباران، فعالیت نمونه بر حسب زمان به صورت زیر کاهش می‌یابد:

$$A(t) = A_i \exp(-\lambda t) = RNq(1 - \exp(-\lambda t_i)) \exp(-\lambda t), \quad (5)$$

که در آن $t > t_i$ است. شمارش خالص زیر قله فوتوالکتریک (c) برابر است با:

$$c = \varepsilon \gamma \int_{t_c}^{t_c + t_m} A(t) dt = \frac{\varepsilon \gamma RNq}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t_i)) \exp(-\lambda t_c) (1 - \exp(-\lambda t_m)) \quad (6)$$

سطح مقطع کل شکافت در هر انرژی به دست آمد. دقت انجام این آزمایش به حد کافی بود که بتوان گذر از شکافت نامتقارن به شکافت متقارن را مشاهده نمود.

۲. روش تجربی

در این آزمایش، سطح مقطع تشکیل محصولات شکافت، توزیع جرم و سطح مقطع کل شکافت ^{238}U با پروتونهای 45 ، 55 ، 65 و 69 MeV با روش طیف‌نگاری پرتوهای گاما اندازه‌گیری شده است. این پژوهش در مرکز سیکلوترون و رادیو ایزوتوپ (CYRIC) دانشکده مهندسی انرژی و علوم کوانتومی (QSE) دانشگاه توهوکوی ژاپن انجام شده است.

چهار هدف نازک ^{238}U هر یک با ضخامت $100 \mu\text{g/cm}^2$ بر روی لایه نازکی از اکسید آلومینیم (Al_2O_3) به ضخامت $30 \mu\text{m}$ نشانده شده بود. ضخامت هر یک از هدفها با وزن کردن دقیق آنها و همین‌طور با طیف‌سنجی پرتوهای ایکس و آلفا به دست آمد. با شمارش پرتوهای آلفای گسیلی از چهار نقطه برای هر هدف اورانیم، یکنواخت بودن ضخامت هدفها با خطای 3% مورد تایید قرار گرفت. برای جلوگیری از فرار پاره‌های شکافت، هر هدف اورانیم بین دو پولک نازک از جنس بریلیم به ضخامت $100 \mu\text{m}$ قرار داشت. از پولکهای مسی و آلومینیمی به ضخامت‌های بین 100 الی $500 \mu\text{m}$ نیز به منظور کاهش انرژی باریکه پروتون به مقدار مورد نظر، و همین‌طور برای اندازه‌گیری شدت باریکه پروتون در مدت زمان آزمایش استفاده شد. مجموعه هدفهای اورانیم، پولکهای بریلیم، مس و آلومینیم یک هدف مرکب^۱ را به ضخامت $6/22$ mm تشکیل می‌داد. انرژی باریکه پروتون فرودی 70 MeV بود که در عبور از پولکهای مسی و آلومینیمی به انرژیهای 69 ، 65 ، 55 و 45 MeV در برخورد با هدفهای اورانیم کاهش می‌یافت. قطر باریکه پروتون $7 - 6$ mm، زمان بمباران 30 دقیقه، میانگین جریان باریکه $72 \mu\text{A}$ و کل بار الکتریکی جمع شده در فارادی کاپ تقریباً $1200 \mu\text{C}$ بود. برای ثبت طیفهای گامای حاصل از هدفهای اورانیم و پولکهای مسی و آلومینیمی از دو

۱. Stack target

محصولات شکافت استفاده شود. این کمیته‌ها از کتاب "جدول ایزوتوپها" [۸] به دست آمده‌اند. برای اطمینان از صحت تشخیص هر یک از محصولات شکافت، شناسایی آنها به وسیله تحلیل تعدادی طیف گاما که در زمانهای متوالی ثبت شده بود، و با در نظر گرفتن نیمه عمر آنها انجام شد. در مواردی، این عمل با تحلیل همزمان دو یا چند قله فوتوالکتریک برای محصولات شکافت با انرژیهای نزدیک به هم، صورت گرفت. با این وجود، در مواردی نیز محصولات شکافت ایزوبار (با عدد جرمی یکسان) به دست آمد.

به طوری که از رابطه (۹) دیده می‌شود، برای محاسبه سطح مقطع تشکیل هر یک از این محصولات شکافت باید جریان باریکه پروتون را در هدفهای اورانیم و یا تعداد کل پروتونها (I) را در مدت زمان بمباران داشته باشیم. بدین منظور از جمع‌آوری طیف گامای حاصل از پولکهای مسی و آلومینیمی و واکنشهای مونیتورینگ $^{22}\text{Na}(p, x)^{22}\text{Al}$ و $^{56}\text{Co}(p, x)^{56}\text{Cu}$ استفاده شد [۹]. در واکنش $^{22}\text{Na}(p, x)^{22}\text{Al}$ ، هسته ^{22}Na با نیمه عمر ۲/۶۰۲ سال، طی فرایند گیراندازی الکترون، به هسته ^{22}Ne در حالت پایه تبدیل می‌شود و گامای با انرژی ۱۲۷۴/۵ keV و نسبت شاخه‌ای ۹۹/۹۴٪ گسیل می‌کند. در واکنش $^{56}\text{Co}(p, x)^{56}\text{Cu}$ نیز هسته ^{56}Co با گیراندازی الکترون، به هسته ^{56}Fe در حالت پایه تبدیل می‌شود و با نیمه عمر ۷۷/۷ روز پرتوهای گامای با انرژیهای ۸۴۶/۸ keV و ۱۲۳۸/۳ keV و نسبتهای شاخه‌ای به ترتیب ۹۹/۹٪ و ۶۷٪ گسیل می‌کند. در این آزمایش، برای اندازه‌گیری جریان باریکه پروتون توسط پولکهای آلومینیم و مس، به ترتیب از انرژیهای ۱۲۷۴/۵ keV و ۸۴۶/۸ keV استفاده شد. کمیت I مطابق رابطه (۹) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$I = \frac{\lambda c t_i}{\epsilon \gamma \sigma N_s (1 - \exp(-\lambda t_i)) \exp(-\lambda t_c) (1 - \exp(-\lambda t_m))} \quad (12)$$

که در آن پارامترهای λ ، c ، ϵ ، γ ، σ و N_s مقادیر متناظر با آلومینیم و یا مس هستند و از طیفهای گامای گسیل شده از آنها به دست می‌آیند. کمیت ϵ برای فواصل مختلف بین پولکها و آشکارسازها، ابعاد هندسی آنها و انرژی گامای گسیل شده از

که در آن ϵ کارایی آشکارساز، γ نسبت شاخه‌ای، t_c زمان سرد شدن و t_m زمان اندازه‌گیری طیف است. اگر s مساحت آن قسمت از هدف باشد که در معرض تابش پروتون است، آنگاه سطح مقطع واکنش برابر است با [۷]:

$$\sigma = \frac{A_i t_i s}{N I (1 - \exp(-\lambda t_i))} \quad (7)$$

که در آن I تعداد کل پروتونهای باریکه در طول مدت بمباران است. با حذف $\exp(-\lambda t_i)$ در عبارتهای (۴) و (۷) خواهیم داشت:

$$\sigma = \frac{(RNq) t_i s}{N I} = \frac{(RNq) t_i}{N_s I} \quad (8)$$

که در آن $N_s = \frac{N}{s}$ تعداد اتمهای هدف در 1 cm^2 است. با حذف RNq در دو عبارت (۶) و (۸) داریم:

$$\sigma = \frac{\lambda c t_i}{\epsilon \gamma N_s (1 - \exp(-\lambda t_i)) \exp(-\lambda t_c) (1 - \exp(-\lambda t_m))} \quad (9)$$

۴. محاسبات و آنالیز داده‌های تجربی

در این واکنش، انرژی برانگیختگی هسته مرکب (E_{ex}) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$p + {}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{Np}^* \rightarrow \text{شکافت} \quad (10)$$

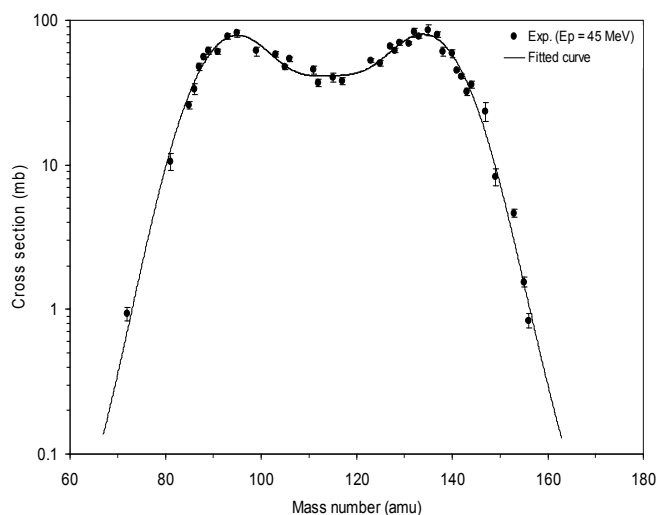
$$E_{ex} = Q + E_p$$

که در آن Q مقدار مربوط به واکنش است و طبق رابطه زیر

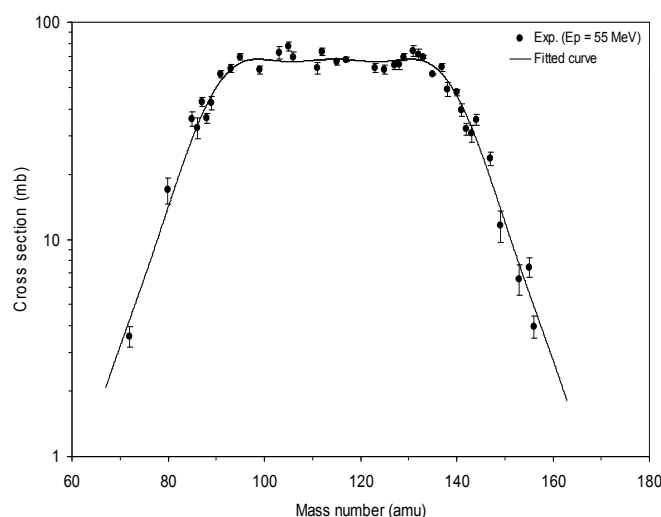
$$Q = (m_p + m_U - m_{\text{Np}}) c^2 \quad (11)$$

برابر $5/3 \text{ MeV}$ به دست می‌آید. در این واکنش، انرژی برانگیختگی هسته مرکب شکافته ${}^{239}\text{Np}^*$ مقادیر $50/3$ ، $60/3$ ، $70/3$ و $74/3$ مگا الکترون ولت را اختیار می‌کند.

در این آزمایش، تعدادی از محصولات شکافت با در نظر گرفتن قله فوتوالکتریک مناسب، نیمه عمر، نسبت شاخه‌ای، زمان سرد شدن نمونه و زمان اندازه‌گیری طیف به دست آمد. به علت تنوع محصولات شکافت ایجاد شده و همپوشانی طیف گامای گسیلی از آنها، شناسایی محصولات شکافت معمولاً کاری طاقت‌فرسا و مستلزم صرف وقت زیادی است. بدین منظور، لازم است از مقادیر دقیق نیمه عمر و نسبت شاخه‌ای

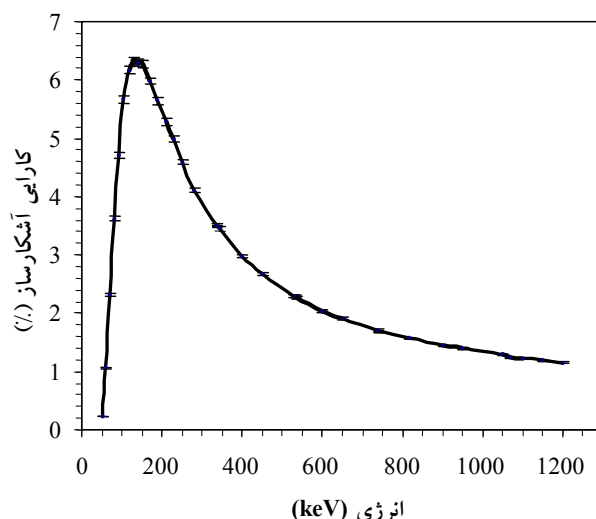


شکل ۲. توزیع جرم محصولات شکافت در واکنش شکافت القایی اورانیم ۲۳۸ با پروتونهای ۴۵ MeV.



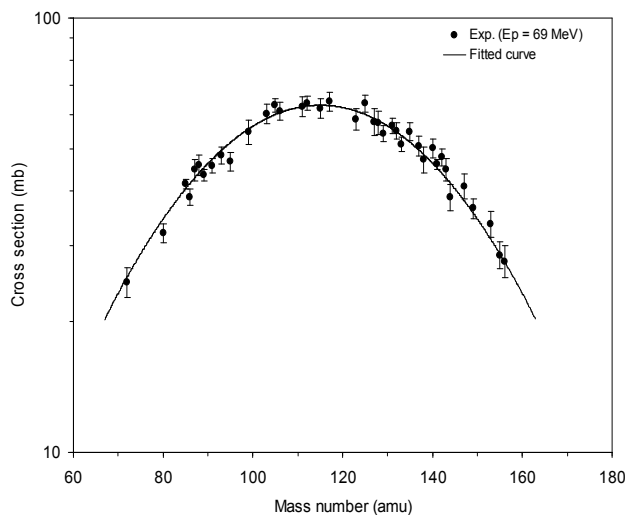
شکل ۳. توزیع جرم محصولات شکافت در واکنش شکافت القایی اورانیم ۲۳۸ با پروتونهای ۵۵ MeV.

شکلها در حقیقت نمایانگر توزیع جرم محصولات شکافت اورانیم ۲۳۸ در این محدوده انرژی هستند. مقادیر اندازه‌گیری شده برای سطح مقطع کل شکافت ^{238}U در این آزمایش، و همین‌طور برخی از داده‌های تجربی موجود در مقاله‌های دیگران در جدول ۱ نشان داده شده است. این مقدار تقریباً ثابت و برابر 1900 mb است. میانگین خطای ایجاد شده در این اندازه‌گیری حدود ۸٪ بود.

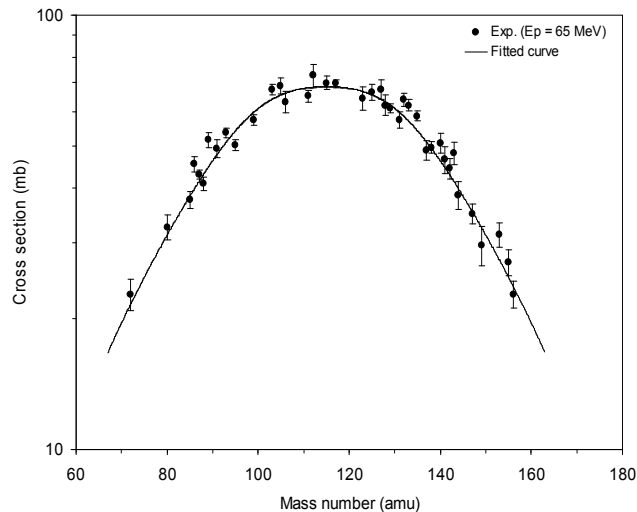


شکل ۱. کارایی یکی از آشکارسازهای ژرمانیم فوق خالص برای پرتوهای گامای گسیلی از هدف اورانیم در فاصله ۳ cm از آشکارساز (نمونه و آشکارساز هم محور و موازی هستند).

آنها (۱۲۷۴/۵ keV برای آلومینیم و ۸۴۶/۸ keV برای مس)، با استفاده از برنامه کامپیوتری EGS4 محاسبه شد. به علاوه، ϵ برای هدفهای اورانیم نیز به صورت تابعی از انرژی به دست آمد. شکل ۱ کارایی یکی از این آشکارسازها را برای هدف اورانیم در فاصله ۳ cm از آشکارساز نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری جریان باریکه پروتون (I)، سطح مقطع واکنش (σ) در واکنشهای مونیتورینگ $^{27}\text{Al}(p,x)^{24}\text{Na}$ و $^{56}\text{Co}(p,x)^{\text{nat}}\text{Cu}$ نیز به ترتیب از داده‌های تجربی موجود در مراجع ۱۰ و ۱۱ به دست آمد. منحنیهای تجربی σ به صورت تابعی از انرژی پروتون فرودی را می‌توان در مرجع [۹] نیز یافت. در نتیجه، در این آزمایش، میانگین تعداد پروتونها در مدت ۳۰ دقیقه بمباران با تحلیل طیف گامای گسیل شده از پولکهای مسی و آلومینیمی به ترتیب برابر $5/17 \times 10^{15}$ و $4/27 \times 10^{15}$ و $5/02 \times 10^{15}$ و $4/64 \times 10^{15}$ در انرژیهای ۵۵، ۶۵، ۶۹ و ۴۵ MeV به دست آمد. میانگین خطای حاصل در این اندازه‌گیری حدود ۴٪ بود. سپس سطح مقطع تشکیل محصولات شکافت با در نظر گرفتن رابطه (۹) در انرژیهای مذکور به دست آمد. مقادیر تجربی به همراه منحنیهای برازش شده به آنها در شکلهای ۲، ۳، ۴ و ۵ نمایش داده شده‌اند. این



شکل ۵. توزیع جرم محصولات شکافت در واکنش شکافت القایی اورانیم ۲۳۸ با پروتونهای ۶۹ MeV.



شکل ۴. توزیع جرم محصولات شکافت در واکنش شکافت القایی اورانیم ۲۳۸ با پروتونهای ۶۵ MeV.

جدول ۱. سطح مقطع کل شکافت اورانیم ۲۳۸ با پروتون.

مرجع	سطح مقطع کل شکافت (mb)	انرژی پروتون (MeV)
[۱۲]	~۲۰۰	۱۰
[۱۳]	~۳۰۰	۱۵
[۱۲]	~۱۱۰۰	۲۰
[۱۴]	~۱۸۰۰	۳۰
(این آزمایش)	1848 ± 148	۴۵
(این آزمایش)	1887 ± 151	۵۵
(این آزمایش)	1997 ± 160	۶۵
(این آزمایش)	1905 ± 152	۶۹
[۱۴]	~۱۸۰۰	۷۰
[۱۴]	~۱۸۰۰	۱۰۰
[۱۵]	~۱۸۰۰	۱۳۰

۵. بحث و نتیجه گیری

دو منحنی کناری، متناظر با پاره‌های شکافت سبک و سنگین تشکیل شده در شکافت نامتقارن هستند و غالب بودن اثرات پوسته‌ای را نشان می‌دهند، در حالی که منحنی میانی، متناظر با شکافت متقارن است. در هسته‌های شکافته با انرژی

در حالت کلی، توزیع جرم پاره‌های شکافت دارای دو مد متقارن و نامتقارن است. بنابراین می‌توان توزیع جرم را به صورت ترکیبی از سه منحنی گاوسی جداگانه در نظر گرفت.

سنگین با منحنی گاوسی، نشان دهنده وجود اثرات پوسته‌ای در منحنی توزیع جرم است. برای $E_p = 69 \text{ MeV}$ داریم $E_{ex} = 74/3 \text{ MeV}$. مقادیر σ و FWHM از رابطه تجربی (۱۳) و رابطه (۱۴) به ترتیب برابر $12/4 \text{ amu}$ و $29/2 \text{ amu}$ به دست می‌آیند. این مقدار با مقدار اندازه‌گیری شده در شکل ۵ یعنی $FWHM \cong 70 \text{ amu}$ اختلاف بسیار دارد. این اختلاف به علت محو شدن اثرات پوسته‌ای و ظاهر شدن مد شکافت متقارن است.

در شکل‌های ۵ - ۲ همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش انرژی پروتون، احتمال وقوع شکافت نامتقارن نسبت به شکافت متقارن کاهش می‌یابد. به طوری که برای پروتون‌های با انرژی بیش‌تر از 65 MeV ، مؤلفه شکافت نامتقارن محو می‌شود و توزیع جرم به سمت توزیع گاوسی میل می‌کند. به گونه‌ای که می‌توان رفتار هسته مرکب شکافته ^{239}Np را در انرژی‌های برانگیختگی بالاتر از $70/3 \text{ MeV}$ با مدل قطره مایع بررسی نمود. از طرفی، سطح مقطع کل شکافت در این محدوده انرژی، تقریباً مستقل از انرژی پروتون فرودی است. این نتیجه با داده‌های تجربی ارائه شده در مرجع ۱۷ نیز سازگار است.

قدردانی

از پروفیسور مامورو بابا رئیس مرکز سیکلوترون و رادیو ایزوتوپ دانشگاه توهوکوی ژاپن، پروفیسور تام اوتسوکوی و دکتر ماسایوکی هاگی‌وارا صمیمانه تشکر می‌کنم.

برانگیختگی کم، سهم منحنی میانی ناچیز است و عملاً توزیع جرم پاره‌های شکافت، ترکیبی از دو منحنی گاوسی کناری (به صورت منحنی دو کوهانه) خواهد بود و آن هم متناظر با شکافت نامتقارن است. در هسته‌های شکافته با انرژی برانگیختگی زیاد، توزیع جرم عملاً تحت تأثیر منحنی میانی قرار می‌گیرد و شکافت متقارن به صورت مد غالب ظاهر می‌شود. در این مدل، هر یک از این سه منحنی به طور جداگانه گاوسی در نظر گرفته می‌شوند. در منحنی دو کوهانه توزیع جرم پاره‌های شکافت، کوهان (قله) مربوط به پاره‌های شکافت سنگین را در صورتی می‌توان گاوسی در نظر گرفت که بین انحراف استاندارد (σ) آن بر حسب amu و انرژی برانگیختگی هسته مرکب شکافته (E_{ex}) بر حسب MeV رابطه تجربی زیر برقرار باشد [۱۶]:

$$\sqrt{2\sigma^2 - 106} = 0/235(E_{ex} - 14/0) \quad (13)$$

برای $E_p = 45 \text{ MeV}$ ، انرژی برانگیختگی هسته شکافته $^{239}\text{Np}^*$ برابر $50/3 \text{ MeV}$ است. از رابطه ۱۳ داریم: $\sigma = 9/5 \text{ amu}$. بنابراین خواهیم داشت:

$$FWHM = 2\sqrt{2Ln2} \sigma = 2/355 \sigma = 22/3 \text{ amu} \quad (14)$$

در این آزمایش، از شکل ۲، مقدار FWHM برای قله مربوط به پاره‌های شکافت سنگین، در واکنش شکافت اورانیم ۲۳۸ با پروتون‌های 45 MeV ، تقریباً برابر با 21 amu به دست می‌آید. این مقدار با مقدار محاسبه شده از رابطه تجربی (۱۳) و رابطه (۱۴) به خوبی سازگار است. بنابراین در واکنش $^{238}\text{U}(p, f)$ با پروتون‌های 45 MeV ، تطابق قله مربوط به پاره‌های شکافت

مراجع

1. R Vandenbosch and J R Huizenga, *Nuclear Fission*, Academic Press, New York (1973).
2. H Noshad, S Soheyli and M Lamehi-Rachti, *J. Nucl. Sci. Technol.* **38** (2001) 901.
3. S I Mulgin, K H Schmidt, A Grewe and S V Zhdanov, *Nucl. Phys. A* **640** (1998) 375.
4. R C Jensen and A W Fairhall, *Phys. Rev.* **109** (1958) 942.
5. J R Nix and W J Swiatecki, *Nucl. Phys.* **71** (1965) 1.
6. A J Sierk, *Phys. Rev. C* **33** (1986) 2039.
7. E Karttunen, M Brenner, V A Rubchena, S A Egorov, V B Funschtein, V A Jakovlev and Yu A Selitskiy, *Nucl. Sci. Eng.* **109** (1991) 350.
8. R B Firestone, *Table of Isotopes*, Vol. 1 & 2, Eighth edition, Wiley, New York (1996).
9. www-nds.iaea.org/medical/monitor_reactions.html
10. G F Steyn, S J Mills, F M Nortier, B R S Simpson and B R Meyer, *Appl. Radiat. Isot.* **41** (1990) 315.
11. S J Mills, G F Steyn and F M Nortier, *Appl. Radiat. Isot.* **43** (1992) 1019.
12. G H McCormick and B L Cohen, *Phys. Rev.* **96** (1954) 722.

- (1956) 807.
16. S Baba, H Umezawa and H Baba, *Nucl. Phys. A* **175** (1971) 177.
17. C Chung and J J Hogan, *Phys. Rev. C* **25** (1982) 899.
13. A T Kandil, *J. Inorg. Nucl. Chem.* **38** (1976) 37.
14. P C Stevenson, H G Hicks, W E Nervik and D R Nethaway, *Phys. Rev.* **111** (1958) 886.
15. H M Steiner and J A Jungerman, *Phys. Rev.* **101**