

بررسی توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت هسته‌های طلا و بیسموت با پروتونهای ۲۵ MeV تا ۳۰ MeV

سعید سهیلی^{۱،۲،۳}، هوشیار نوشاد^۱ و محمد لامعی رشتی^۱

۱- بخش فیزیک هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران، صندوق پستی ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵

۲- دانشکده فیزیک و علوم هسته‌ای، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران، صندوق پستی ۴۳۹۵-۳۱۵۸۵

۳- گروه فیزیک دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، کد پستی ۶۵۱۷۴

دریافت نسخه نهایی: ۸۰/۴/۳۱

دریافت مقاله: ۷۹/۱۲/۲۲

چکیده

در این بررسی، توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت عناصر طلا و بیسموت با باریکه پروتون در گستره انرژی ۲۵ تا ۳۰ میلیون الکترون ولت با استفاده از آشکارسازهای سد سطحی اندازه‌گیری شد. ناهمسانگری زاویه‌ای پاره‌های شکافت اندازه‌گیری شده با پیش بینی مدل آماری نقطه زینی استاندارد همخوانی دارد. سطح مقطع کل شکافت این عناصر نیز در انرژی‌های تابشی مختلف اندازه‌گیری شد و با نتایج اندازه‌گیری قبلی مقایسه گردید.

واژه‌های کلیدی: شکافت هسته‌ای، توزیع زاویه‌ای، سطح مقطع کل شکافت، $^{197}\text{Au}(p,f)$ ، $^{209}\text{Bi}(p,f)$

۱. مقدمه

با توجه به اینکه از کشف پدیده شکافت هسته‌ای بیش از چند دهه می‌گذرد، به دلیل پیچیده بودن این فرایند، مطالعات تجربی و نظری این پدیده همچنان ادامه دارد و تلاش‌های متعددی در فهم جنبه‌های مختلف این پدیده صورت گرفته است.

مطالعه توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت به عنوان منبع سرشاری از اطلاعات در مورد این فرایند یک مفهوم عام و دینامیک شکافت یک مفهوم خاص محسوب می‌شود. به ویژه، این مطالعه در تعیین تکانه زاویه‌ای، گشتاور لختی موثر، ارتفاع سد شکافت، سطح مقطع کل شکافت، پیش بینی نوترونهای گسیل شده حایز اهمیت است [۷-۱]. مثلاً می‌توان مقادیر ارتفاع سد شکافت و گشتاور لختی موثر را با تحلیل داده‌های

تجربی روی سطوح مقطع دیفرانسیلی شکافت به دست آورد [۸-۱۰]. از طرفی تکانه زاویه‌ای از روی ناهمسانگردی توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت قابل استخراج است [۱۱].

یکی از نتایج اساسی نظریه آماری ناهمسانگردی زاویه‌ای شکافت این است که توزیع تصویر (K) تکانه زاویه‌ای کل I در امتداد محور تقارن هسته‌ای یک توزیع گاوسی است [۱۲]:

$$\begin{cases} \rho(K) \propto \exp\left(-K^2/2K_\perp^2\right), & K \leq I \\ \rho(k) = 0, & K > I \end{cases} \quad (1)$$

که در آن K_\perp^2 ، وردایی توزیع گاوسی است و با رابطه زیر داده می‌شود:

$$K_\perp^2 = \frac{t}{\hbar^2} \left[\left(\frac{1}{\tau_{\parallel}} \right) - \left(\frac{1}{\tau_{\perp}} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

و یا:

$$K_{\perp}^{\perp} = t \frac{\tau_{\text{eff}}}{\hbar^2} \quad (3)$$

در اینجا τ_{eff} ، τ_{\perp} ، τ_{\parallel} و t به ترتیب گشتاور لختی موثر، گشتاور لختی موازی محور تقارن، گشتاور لختی در امتداد عمود بر محور تقارن، و دمای هسته در نقطه زینی است. وقتی که تکانه زاویه‌ای مداری در صفحه‌ای عمود بر راستای باریکه تابشی قرار گیرد، گسیل پاره‌های شکافت اساساً نسبت به راستای باریکه تابشی رو به جلو و رو به عقب با شدت بیشتری صورت می‌گیرد. ناهمسانگردی زاویه‌ای با رابطه زیر داده می‌شود:

$$A = \frac{W(180^\circ, 90^\circ)}{W(90^\circ)} \approx 1 + \left[\frac{\langle I^{\perp} \rangle}{(+K_{\perp}^{\perp})} \right] \quad (4)$$

تعیین K_{eff}^{\perp} از داده‌های تجربی ناهمسانگردی زاویه‌ای (A)، به گشتاور دوم توزیع تکانه زاویه‌ای یعنی $\langle I^{\perp} \rangle$ وابسته است. در این پژوهش، سعی کردیم که توزیع زاویه‌ای $w(\theta)$ پاره‌های شکافت را برای عناصر طلا و بیسموت در واکنشهای القایی با پروتون و در انرژیهای مختلف اندازه‌گیری کنیم. در اندازه‌گیریهای قبلی پاره‌های شکافت با استفاده از روشهای رادیو شیمی و یا گیراندازی در ورقه‌های جاذب آشکار شده‌اند [۱۳-۱۷]، در صورتی که در این اندازه‌گیری برای آشکار کردن پاره‌های شکافت از آشکارسازهای سد سطحی استفاده شده است که نسبت به روشهای قبلی بسیار دقیقتر است. در ضمن سطح مقطع کل شکافت هسته‌های مرکب ^{198}Hg و ^{211}Po در واکنشهای $^{197}\text{Au}(p,f)$ و $^{209}\text{Bi}(p,f)$ به ترتیب در انرژیهای تابشی (۲۸-۳۰ MeV) و (۲۵-۳۰ MeV) نیز اندازه‌گیری شده و با اندازه‌گیریهای قبلی مقایسه شده است.

۲. روش تجربی

سطح مقطع جزئی شکافت عناصر طلا و بیسموت با استفاده از باریکه پروتون حاصل از سیکلوترون مرکز تحقیقات هسته‌ای کرج که در گستره انرژی ۱۵-۳۰ MeV قابل دسترسی است اندازه‌گیری شد. پراکندگی انرژی باریکه پروتون برای انرژی ۳۰ MeV حدود ۰/۶ MeV است.

برای تولید باریکه پروتون از ورقه کربن استفاده شد. با تنظیم ورقه کربن برای شعاعهای مختلف باریکه امکان تغییر انرژی باریکه در این گستره انرژی وجود دارد. سیکلوترون

مرکز تحقیقات هسته‌ای کرج از نوع سیکلون ۳۰ است. در این نوع سیکلوترون از چشمه خارجی یون منفی (H⁻) استفاده می‌شود.

برای آشکار کردن پاره‌های شکافت از دو آشکارساز سد سطحی سیلیکون (SSB) ساخت شرکت اورسیس^۱ که دارای سطح موثر 100mm^2 و 300mm^2 بودند استفاده شد.

محفظه واکنش از جنس آلومینیوم در سازمان انرژی اتمی ایران طراحی و ساخته شد. باریکه تابشی بعد از عبور از یک گردآورنده آلومینیومی قیفی شکل با خنک کننده آب که قطر روزنه آن یک سانتیمتر بود از یک گردآورنده گرافیتی با قطر روزنه پنج میلیمتر عبور کرده و وارد محفظه واکنش می‌شود. برای تنظیم باریکه تابشی از یک قطعه کوارتز که از اتاق کنترل توسط دوربین قابل رویت بود استفاده شد. درون محفظه واکنش چرخ دنده‌هایی از جنس آلومینیوم برای چرخش آشکارسازهای سد سطحی نصب گردید. چرخش آشکارسازها به وسیله دو موتور الکتریکی پله‌ای امکان پذیر بود که با استفاده از یک برد الکترونیکی که در بخش سیکلوترون مرکز تحقیقات هسته‌ای کرج طراحی و ساخته شد به صورت کامپیوتری از اتاق شمارش قابل کنترل بود. برای اندازه‌گیری بار الکتریکی جمع شده در انتهای خط باریکه در هر مرحله اجرای آزمایش از یک برد الکترونیک که در بخش سیکلوترون مرکز تحقیقات هسته‌ای کرج طراحی و ساخته شد استفاده کردیم.

هدفهای طلا و بیسموت به روش لایه نشانی تبخیری تهیه شدند. چون هدف بیسموت بسیار شکننده است از یک زیرلایه کربن به ضخامت چگالشی $4.0\mu\text{g}/\text{cm}^2$ استفاده شد. در صورتی که هدف طلا به صورت خود نگهدار تهیه شد. با استفاده از روش پس پراکندگی راترفورد (RBS) ضخامت‌های هدفهای طلا و بیسموت به ترتیب $34.0\mu\text{g}/\text{cm}^2$ و $57.0\mu\text{g}/\text{cm}^2$ تعیین شد. روش آنالیز پیکسی^۲ نشان داد که این هدفها دارای ناخالصی شکافت پذیر نیستند. در تمام آزمایشها زاویه سطح ورقه هدف نسبت به راستای باریکه تابشی ۴۵ درجه بوده است. الکترونیک آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است.

1. Eurisys
2. PIXE

$$E_x = E_{c.m.} + Q - B_f \langle I^2 \rangle - E_R \langle I^2 \rangle \quad (7)$$

که در اینجا، B_f ارتفاع سد شکافت، Q مقدار Q تشکیل هسته مرکب، $E_{c.m.}$ انرژی ذره تابشی در دستگاه مرکز جرم، و E_R انرژی چرخشی است. کمیت‌های B_f و E_R بخصوص در واکنش‌های یون سنگین به اسپین وابسته است در صورتی که برای پرتابه‌های سبک نظیر پروتون با تقریب خوبی می‌توان از E_R صرف نظر و B_f را مستقل از اسپین تصور کرد.

با در نظر گرفتن گسیل نوترونهای پیش شکافت، انرژی برانگیختگی از رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۶ و ۲۷]:

$$E_x^{eff} = E_x - v_{pre} E_n, (E_n = B_n + \nu t), \quad (8)$$

که در اینجا v_{pre} تعداد نوترونهای پیش شکافت و E_n انرژی متوسطی است که به وسیله هر کدام از نوترونها برداشته می‌شود (B_n و t به ترتیب انرژی جدایی نوترون و دمای هسته‌ای است). متوسط انرژی جنبشی نوترونهای تبخیری را νt تعیین می‌کند. دما در نقطه زینی با استفاده از E_x^{eff} محاسبه می‌شود. در این صورت با در نظر گرفتن گسیل نوترونهای پیش شکافت، مقادیر دمای هسته‌ای پایتیر به دست آمده، K^2 حاصله کوچکتر خواهد شد. با فرض اینکه متوسط تکانه زاویه‌ای که به وسیله هر نوترون حمل می‌گردد برابر $0/5$ است، می‌توان اثر تبخیر نوترونها را روی مقادیر $\langle I^2 \rangle$ نیز در نظر گرفت که معمولا این اثر بیش از ده درصد این کمیت را تغییر نمی‌دهد. با این وجود تغییر در مقدار K^2 به دلیل گسیل نوترونها قابل ملاحظه است.

۴. محاسبات

۴.۱. توزیع زاویه‌ای

می‌توان نشان داد که عبارت زیر برای توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت $w(\theta)$ مناسب است [۲۸]:

$$A = w(\theta)/w(90^\circ) = 1 + \gamma \cos^2 \theta \quad (9)$$

جدولهای ۱ و ۲ به ترتیب کمیت γ را برای عناصر بیسموت و طلا با باریکه پروتون در انرژیهای مختلف مشخص می‌کند.

مطابق با مدل اپتیکی [۲۹ و ۳۰] برای واکنش (p, f) می‌توان رابطه زیر را برای محاسبه $(I_m)^2$ در نظر گرفت:

$$(I_m)^2 = \nu/4 E_p - \nu t \quad (10)$$

که در آن E_p انرژی پروتون برحسب مگاالکترون ولت است.

توزیعهای خام یک و دو پارامتری پاره‌های شکافت ناشی از شکافت القایی عناصر بیسموت و طلا با باریکه پروتون در بعضی از انرژیها در شکلهای ۲ تا ۷ داده شده‌اند.

۳. مبنای نظری

توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت در حالت کلی برحسب مدل‌های گذرا [۱۲ و ۱۸-۲۴] قابل توصیف است. مدل آماری نقطه زینی استاندارد در توصیف داده‌های تجربی بخصوص با پرتابه‌های سبک نظیر نوکلئون و ذره آلفا از موفقیت چشمگیری برخوردار بوده است. مطابق با این مدل، محور تقارن هسته در نقطه زین که سمتگیری توزیع موج فرقه متقارن با اعداد کوانتمی M, I و K را توصیف می‌کند تا نقطه انقطاع بدون تغییر باقی می‌ماند. کمیت‌های M و K به ترتیب تصویر تکانه زاویه‌ای کل در امتداد محور تقارن هسته و محور ثابت فضایی (در راستای باریکه تابشی) است. برای توصیف کمی توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت فرض می‌کنیم که، الف) پاره‌های شکافت در امتداد محور تقارن هسته‌ای جدا می‌شوند و ب) اگرچه K یک عدد کوانتمی خوب بین گذار هسته از وضعیت اولیه تا نقطه زین نیست، دور از نقطه زین عدد کوانتمی خوبی است.

هالپرن و استرویتینسکی [۱۲] عبارتی را برای سطح مقطع دیفرانسیلی در زاویه θ به دست آورده‌اند که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{W(\theta)}{W(90^\circ)} = \sin^{-2} \theta \left[\frac{\int_0^{P \sin^2 \theta} \sqrt{x} \exp(-x) J_0(ix) dx}{\int_0^P \sqrt{x} \exp(-x) J_0(ix) dx} \right]^2, \quad (5)$$

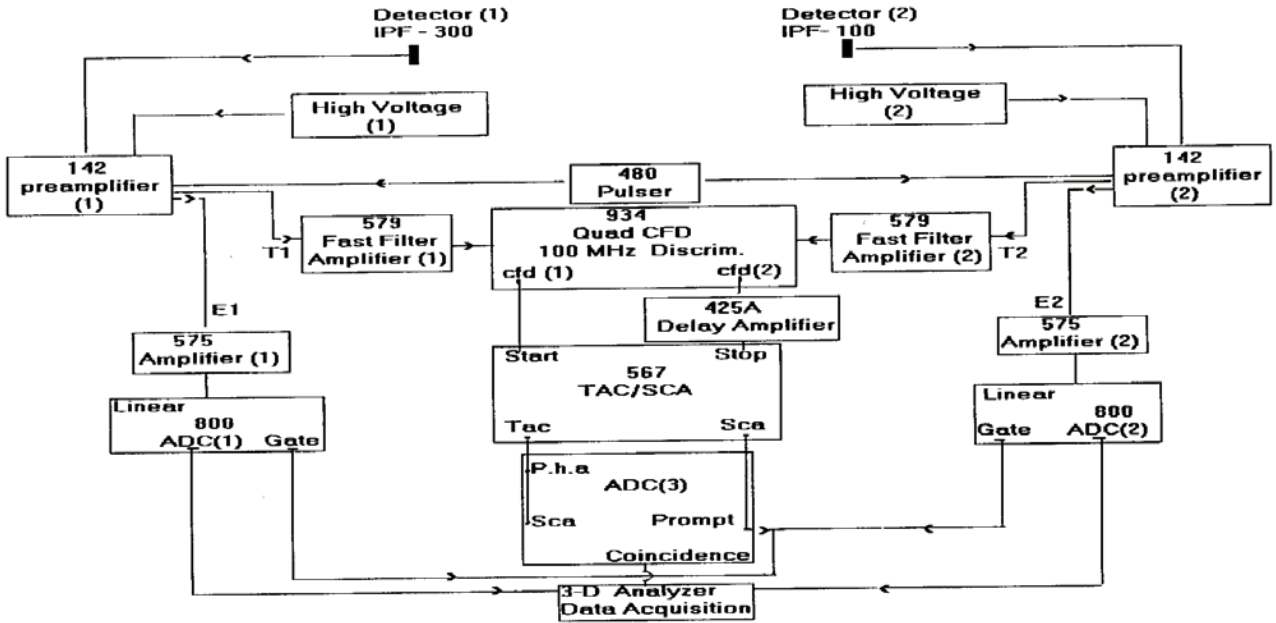
که در آن $p = \left(\frac{I_m}{\nu K} \right)^2$ و $x = \left(\frac{I \sin \theta}{\nu K} \right)^2$ تکانه زاویه‌ای است. J_0 تابع بسل مرتبه صفر با آرگومان مجازی و θ زاویه پاره شکافت نسبت به راستای باریکه تابشی در چارچوب مرکز جرم است.

دمای هسته در نقطه زین به انرژی برانگیختگی در این نقطه مطابق رابطه زیر وابسته است:

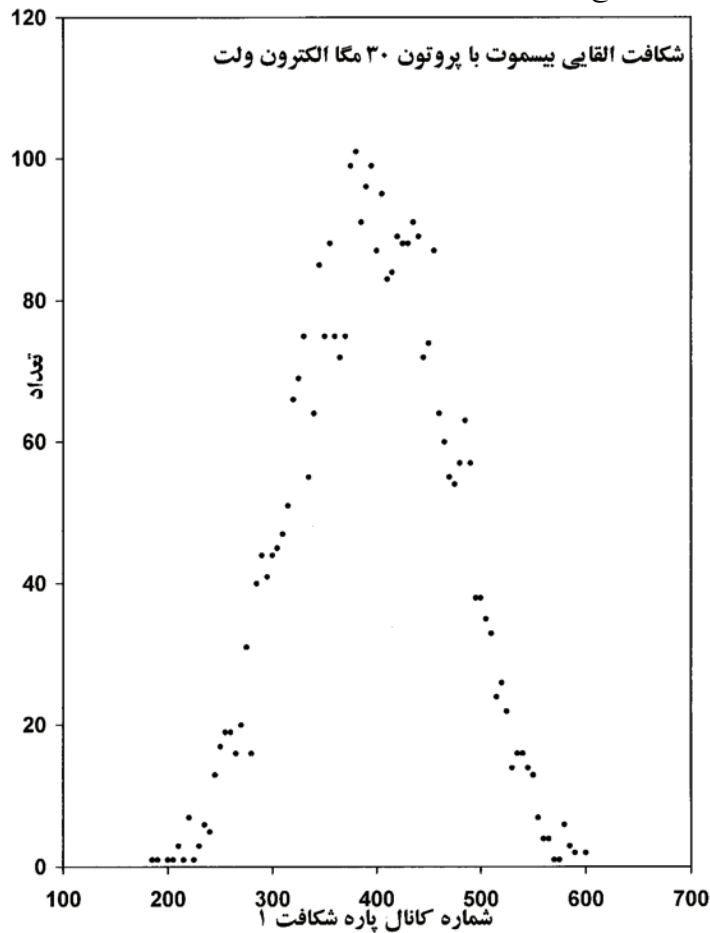
$$t = [E_x/a]^{1/2}, \quad (6)$$

که در این رابطه a پارامتر چگالی تراز است. انرژی برانگیختگی در نقطه زین با رابطه زیر داده می‌شود

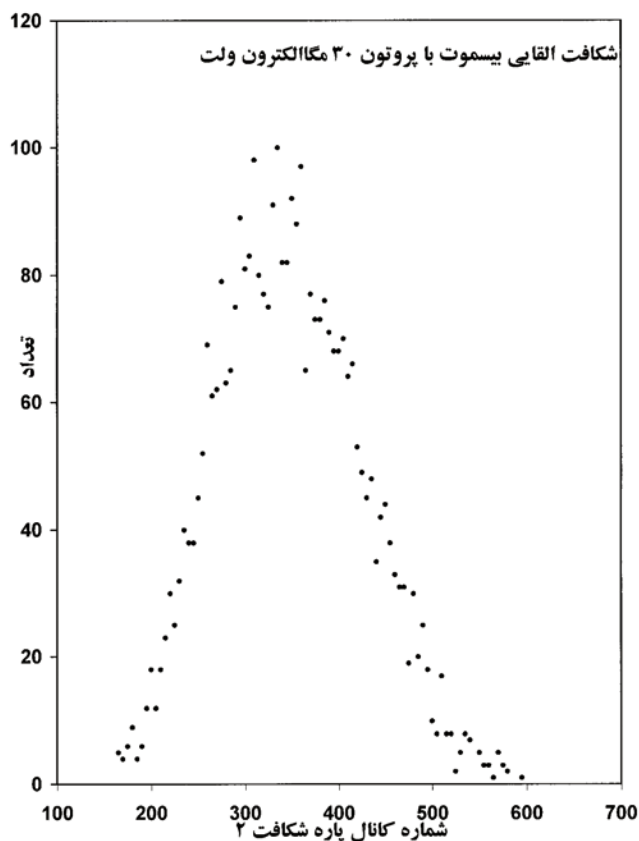
[۲۵]:



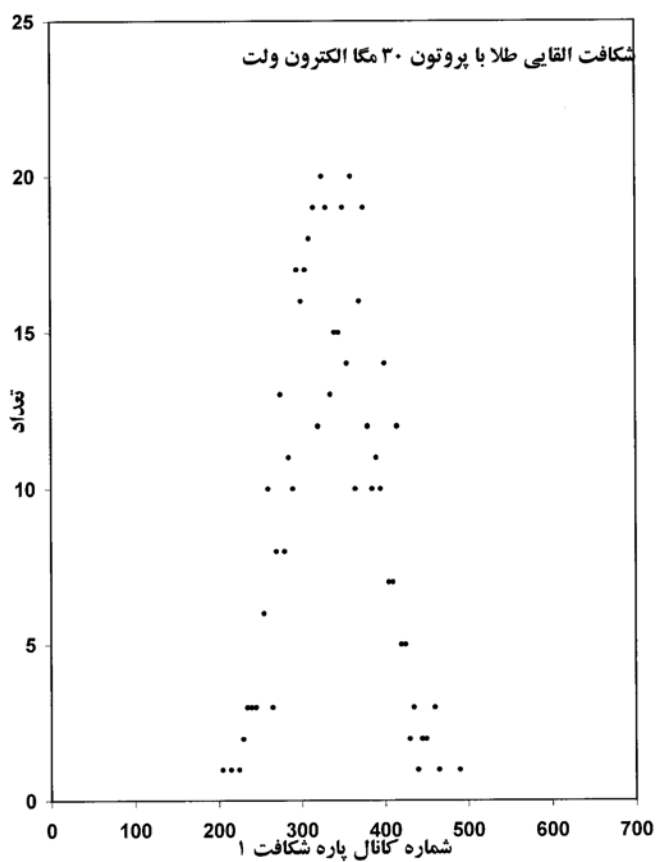
شکل ۱. مدار الکترونیک آزمایش. آشکارسازها ساخت شرکت اورسیس، ADC3 ساخت شرکت ایتر تکنیک و بقیه مدولهای الکترونیک ساخت شرکت اورتک (ORTEC) است. دستگاه جمع‌آوری داده‌ها در سازمان انرژی اتمی ایران طراحی و ساخته شده است.



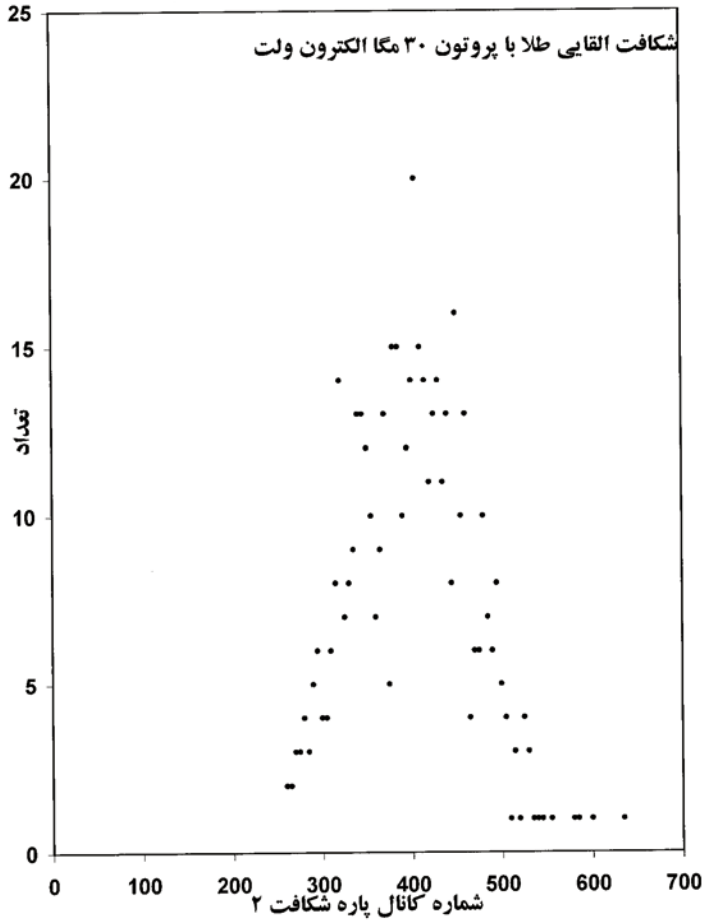
شکل ۲. توزیع یک پارامتری تعداد فرایند شکافت همفرود برحسب شماره کانال انرژی پاره شکافت ۱ در واکنش بیسموت با پروتونهای ۳۰ MeV. آشکارساز ۲ در زاویه ۹۰ درجه نسبت به راستای باریکه تابشی قرار گرفت.



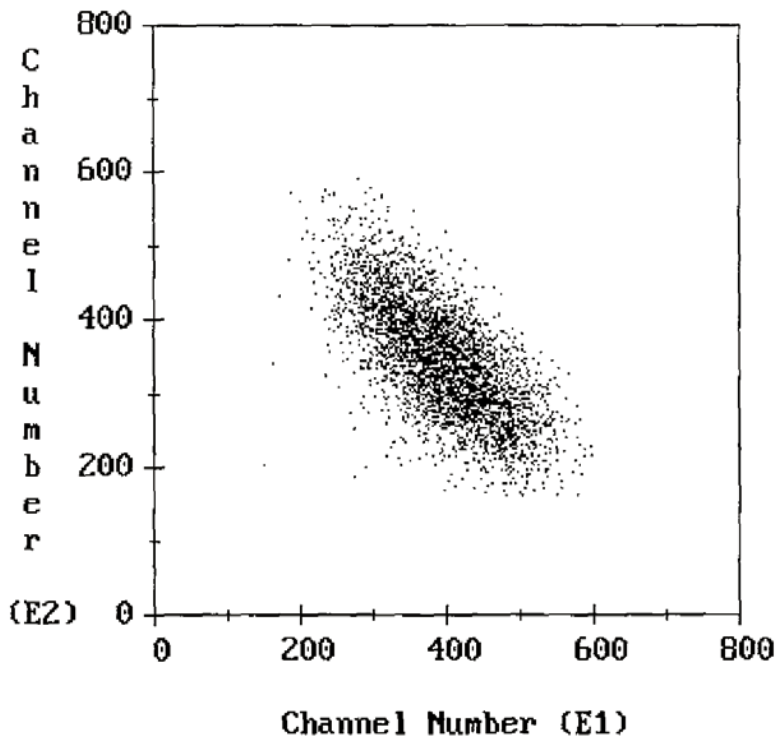
شکل ۳. توزیع یک پارامتری تعداد فرایندهای شکافت همفرود برحسب شماره کانال انرژی پاره شکافت ۲ در واکنش بیسموت با پروتونهای ۳۰ MeV. آشکارساز ۲ در زاویه ۹۰ درجه نسبت به راستای باریکه تابشی قرار گرفت.



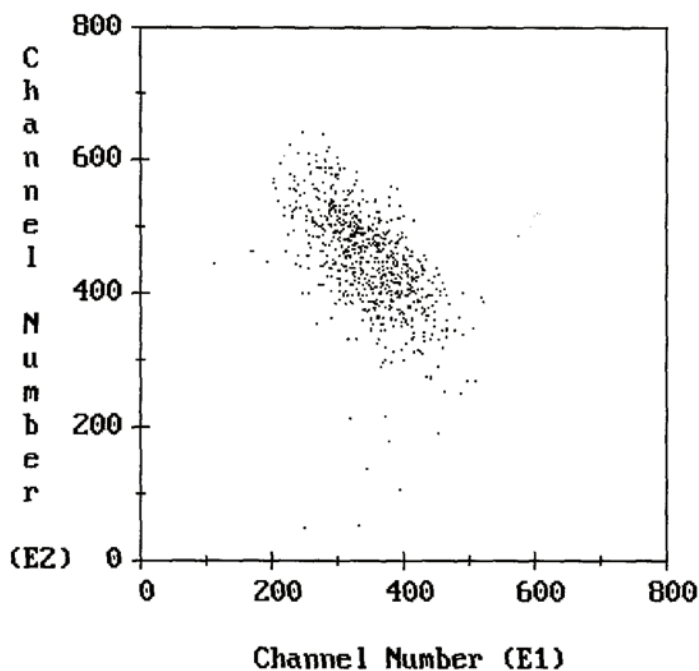
شکل ۴. توزیع یک پارامتری تعداد شکافت همفرود برحسب شماره کانال انرژی پاره شکافت ۱ در واکنش طلا با پروتونهای ۳۰ MeV. آشکارساز ۲ در زاویه ۹۰ درجه نسبت به راستای باریکه تابشی قرار گرفت.



شکل ۵. توزیع یک پارامتری تعداد شکافت همفرود برحسب شماره کانال انرژی پاره شکافت ۲ در واکنش طلا با پروتونهای ۳۰ MeV. آشکارساز ۲ در زاویه ۹۰ درجه نسبت به راستای باریکه تابشی قرار گرفت.



شکل ۶. توزیع دو پارامتری (شماره کانال انرژی دو پاره شکافت همفرود) در واکنش بیسموت با پروتونهای ۳۰ MeV، با اعمال شرط روی کانال انرژی رویدادهای تصادفی حذف شده‌اند. آشکارساز ۲ در زاویه ۹۰ درجه نسبت به راستای باریکه تابشی قرار گرفت.



شکل ۷. توزیع دو پارامتری (شماره کانال انرژی دو پاره شکافت همفروید) در واکنش طلا با پروتونهای ۳۰ MeV آشکارساز ۲ در زاویه ۹۰ درجه نسبت به راستای باریکه تابشی قرار گرفت.

باریکه پروتون صورت گرفته است. کمیت γ در این انرژیها از روی رفتار تغییرات این کمیت برحسب انرژی باریکه تابشی تخمین زده شده است. خطاهای نشان داده شده در شکل‌های ۸ تا ۱۳ به دلیل خطای ناشی از زاویه فضایی آشکارسازها و خطای در چرخش آشکارسازها می‌باشد. جدول‌های ۳ و ۴ خلاصه نتایج اندازه‌گیری ناهمسانگردی و پیش بینی نظری را برای واکنشهای $^{197}\text{Au}(p,f)$ و $^{209}\text{Bi}(p,f)$ نشان می‌دهد. در محاسبات نظری پارامتر چگالی تراز از رابطه $a \approx 0.126 A, \text{MeV}^{-1}$ به دست آمده است. ارتفاع سد شکافت برای هسته‌های مرکب ^{198}Hg و ^{210}Po به ترتیب ۲۰/۷ MeV و ۲۱/۷ MeV می‌باشد [۱۵].

باید در نظر داشت که در محاسبات فوق از اسپین هسته هدف صرف نظر شده است. برای حالتی که $\Gamma_f/\Gamma_n \ll 1$ ، خطای در ناهمسانگردی زاویه‌ای با در نظر گرفتن اسپین هدف برای واکنشهای $^{197}\text{Au}(p,f)$ و $^{209}\text{Bi}(p,f)$ به ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۳۳ است که با محسوب نمودن خطا مقادیر اندازه‌گیری تجربی با پیش بینی نظری همخوانی دارد [۳۱].

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ تغییرات ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت را برای عناصر طلا و بیسموت برحسب انرژی باریکه پروتون نشان می‌دهد.

جدول ۱. مقدار کمیت γ برای ^{209}Bi در انرژی‌های مختلف پروتون

γ	E_p (MeV)
۰/۳۸۷۳	۳۰
۰/۱۸۳۶	۲۹
۰/۱۳۷	۲۸
۰/۳۲۷۹	۲۶/۵
۰/۹۷۲۱	۲۵

جدول ۲. مقدار کمیت γ برای ^{197}Au در انرژی‌های مختلف پروتون

γ	E_p (MeV)
۰/۶۹۱۵	۳۰
۰/۲۳۲۶	۲۹
۰/۳۲۰۱	۲۸

توزیع زاویه‌ای برای واکنشهای $^{197}\text{Au}(p,f)$ و $^{209}\text{Bi}(p,f)$ در شکل‌های ۸ تا ۱۳ نشان داده شده است. برازش توزیع زاویه‌ای اندازه‌گیری شده با مجموعه‌ای از چند جمله‌ایهای لژاندر، ناهمسانگردی زاویه‌ای شکافت (رابطه ۴) را تعیین می‌کند. باید توجه داشت که به دلیل محدودیت زمانی در بمباران هدف بیسموت با باریکه پروتون در انرژیهای ۲۶/۵ و ۲۸ مگاالکترون ولت، اندازه‌گیریها فقط در زاویه ۹۰ درجه نسبت به راستای

جدول ۳. ناهمسانگردی زاویه‌ای اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش بینی نظری برای واکنش $^{197}\text{Au}(p,f)$

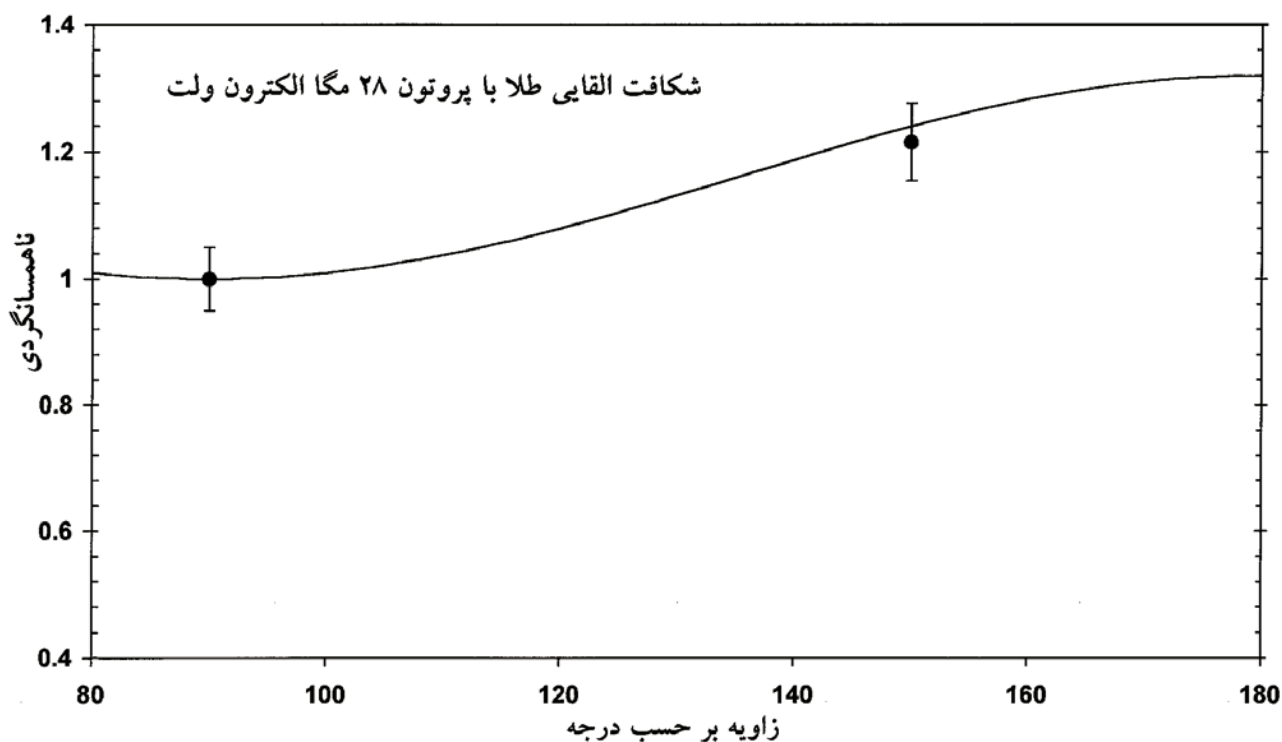
$E_p(\text{MeV})$	$U^*(\text{MeV})$	$T(\text{MeV})$	$\rho_{\text{eff}}/\hbar^2 (\text{MeV})^{-1}$	K^2	$\langle I^2 \rangle$	$A=w(0)/w(90)$	
						A_{Theory}	$A_{\text{Exp.}}$
۲۸	۱۳/۳	۰/۷۳	۳۰	۲۱/۹	۵۳/۵	۱/۴۹	۱/۳۲
۲۹	۱۴/۲	۰/۷۶	۳۰	۲۲/۷	۵۵/۵	۱/۵۰	۱/۲۸
۳۰	۱۵/۲	۰/۷۸	۳۰	۲۳/۵	۵۷/۵	۱/۵۱	۱/۵۷

* $U=E_x-B_f$ است که در آن E_x و B_f به ترتیب انرژی برانگیختگی و ارتفاع سد شکافت هسته مرکب ^{98}Hg اند.

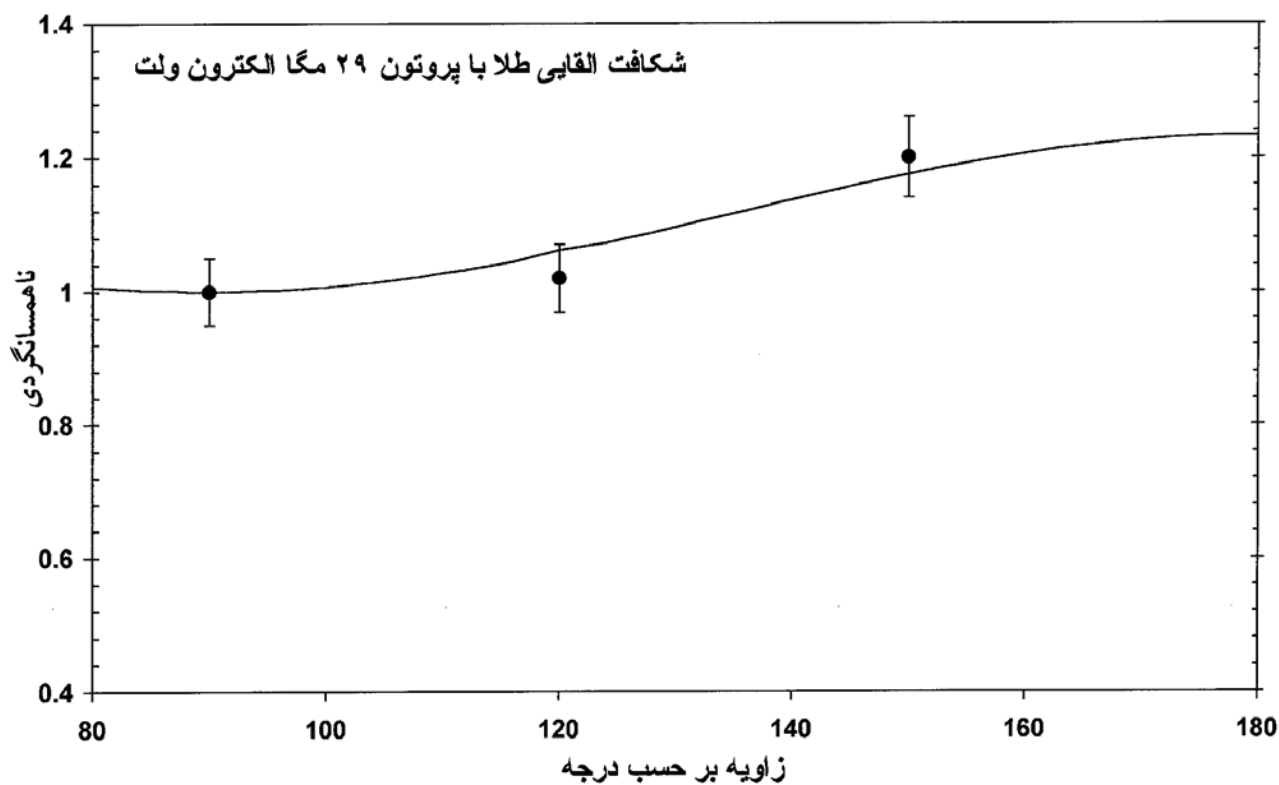
جدول ۴. ناهمسانگردی زاویه‌ای اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش بینی نظری برای واکنش

$E_p(\text{MeV})$	$U^*(\text{MeV})$	$T(\text{MeV})$	$\rho_{\text{eff}}/\hbar^2 (\text{MeV})^{-1}$	K^2	$\langle I^2 \rangle$	$A=w(0)/w(90)$	
						A_{Theory}	$A_{\text{Exp.}}$
۲۵	۹/۲	۰/۵۹	۲۵	۱۴/۷	۴۷/۶	۱/۶۴	۱/۷۱
۲۶/۵	۱۰/۸	۰/۶۴	۲۷	۱۷/۲	۵۰/۶	۱/۶۰	۱/۳۳
۲۸	۱۲/۲	۰/۶۸	۳۰	۲۰/۳	۵۳/۵	۱/۵۳	۱/۲۰
۲۹	۱۳/۱	۰/۷۱	۳۰	۲۱/۱	۵۵/۴	۱/۵۴	۱/۲۳
۳۰	۱۴/۱	۰/۷۳	۳۰	۲۱/۹	۵۷/۴	۱/۵۵	۱/۳۹

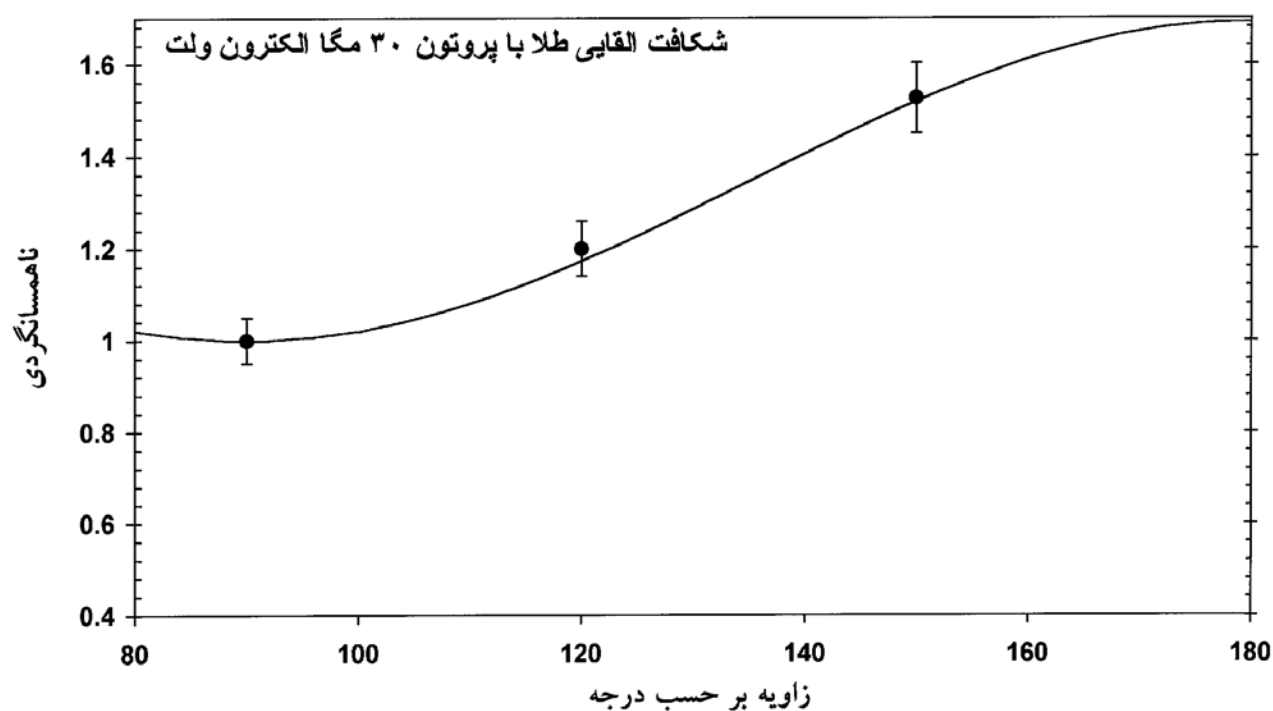
* $U=E_x-B_f$ است که در آن E_x و B_f به ترتیب انرژی برانگیختگی و ارتفاع سد شکافت هسته مرکب ^{210}Po اند.



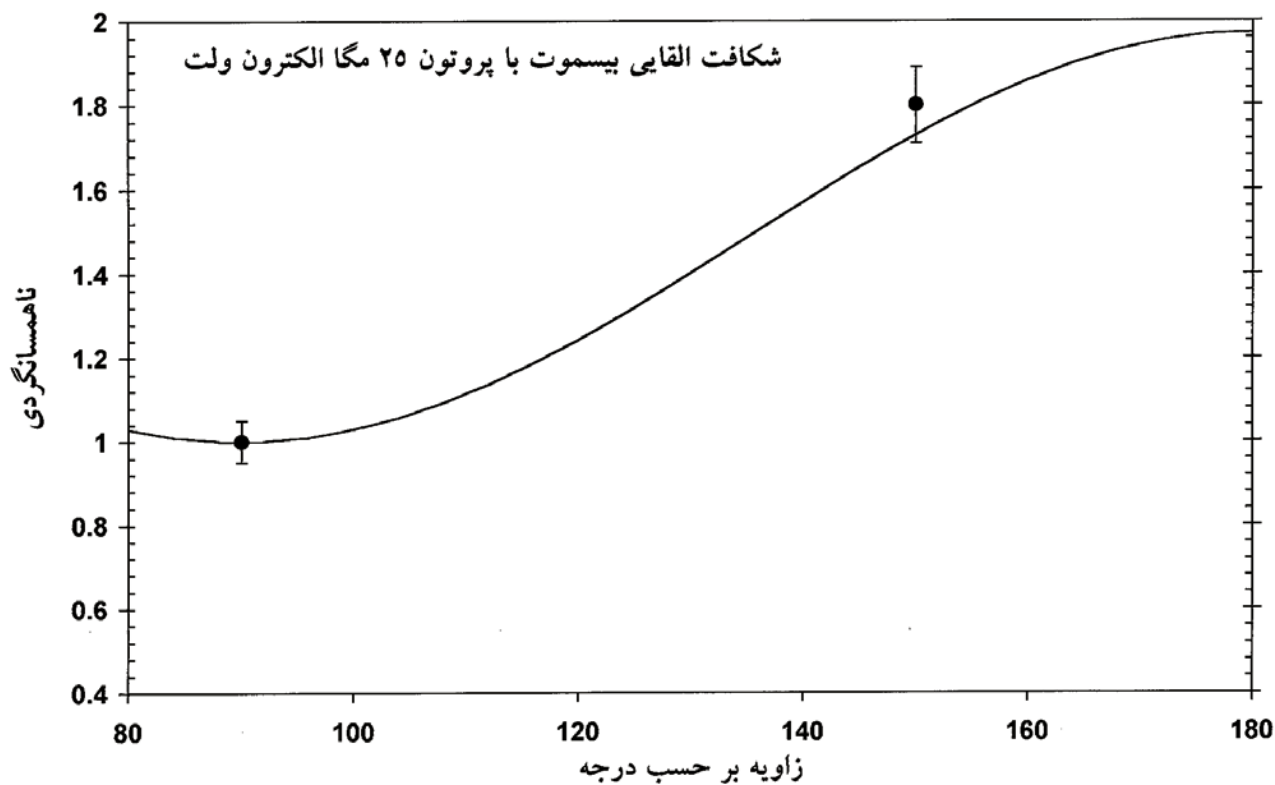
شکل ۸. توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت عنصر طلا با باریکه پروتون ۲۸ MeV. منحنی پر برازش با چندجمله‌ای لزاندر است.



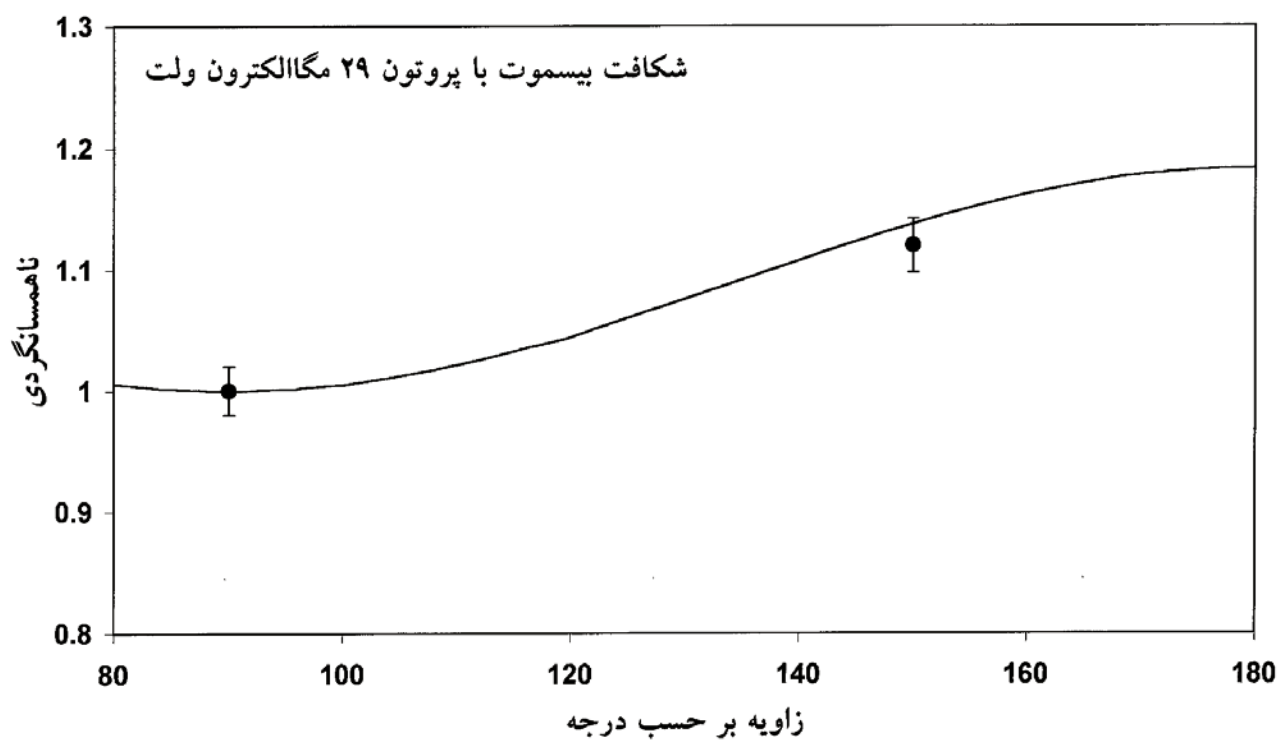
شکل ۹. توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت عنصر طلا با باریکه پروتون ۲۹ MeV. منحنی بر برازش چند جمله‌ای لژاندر است.



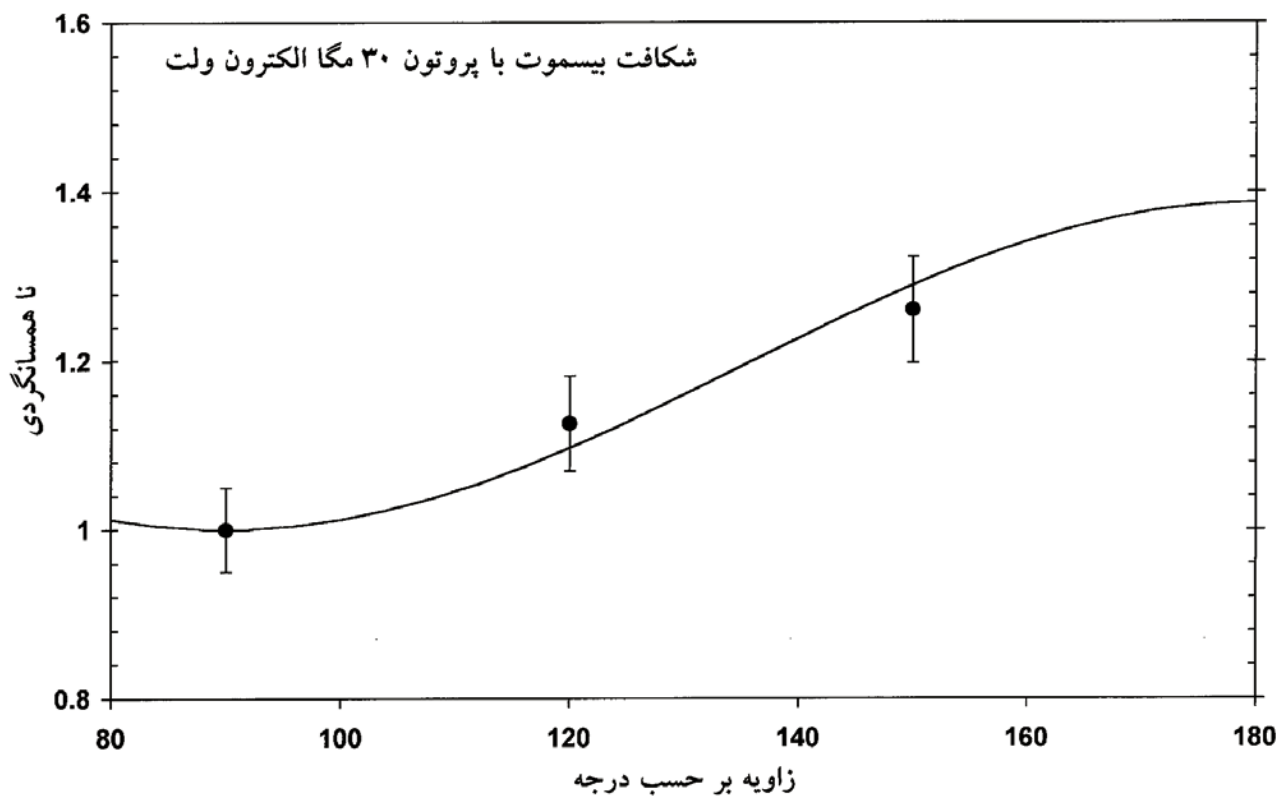
شکل ۱۰. توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت عنصر طلا با باریکه پروتون ۳۰ MeV. منحنی بر برازش با چند جمله‌ای لژاندر است.



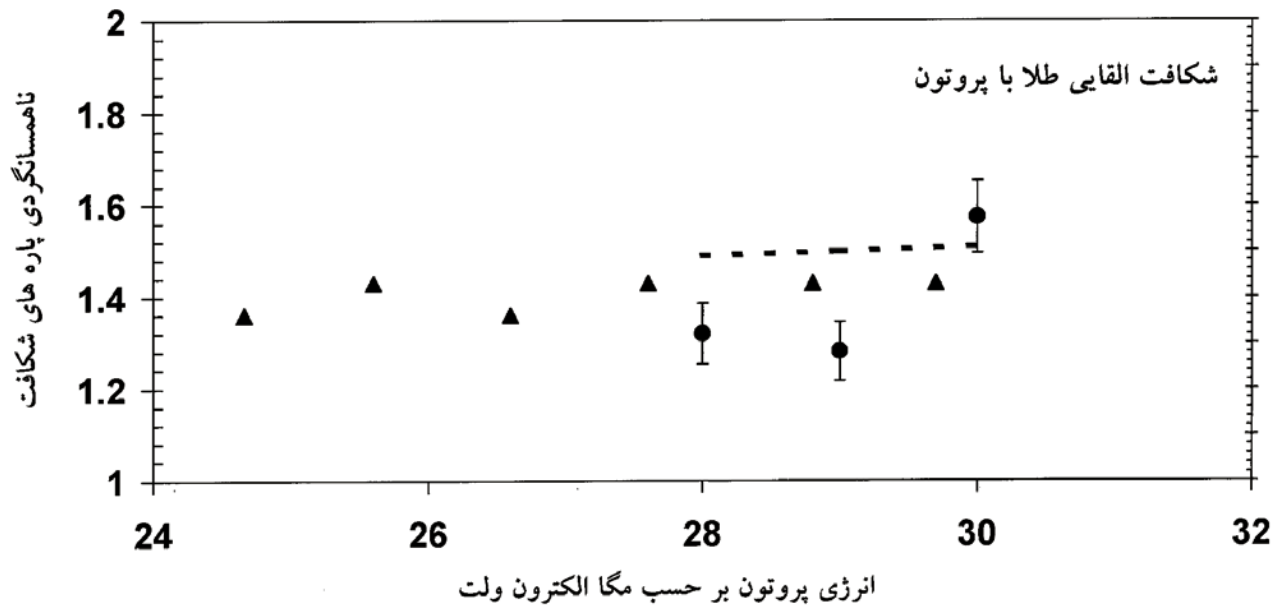
شکل ۱۱. توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت عنصر بیسموت با باریکه پروتون ۲۵ MeV. منحنی پریرازش با چند جمله‌ای لژاندر است.



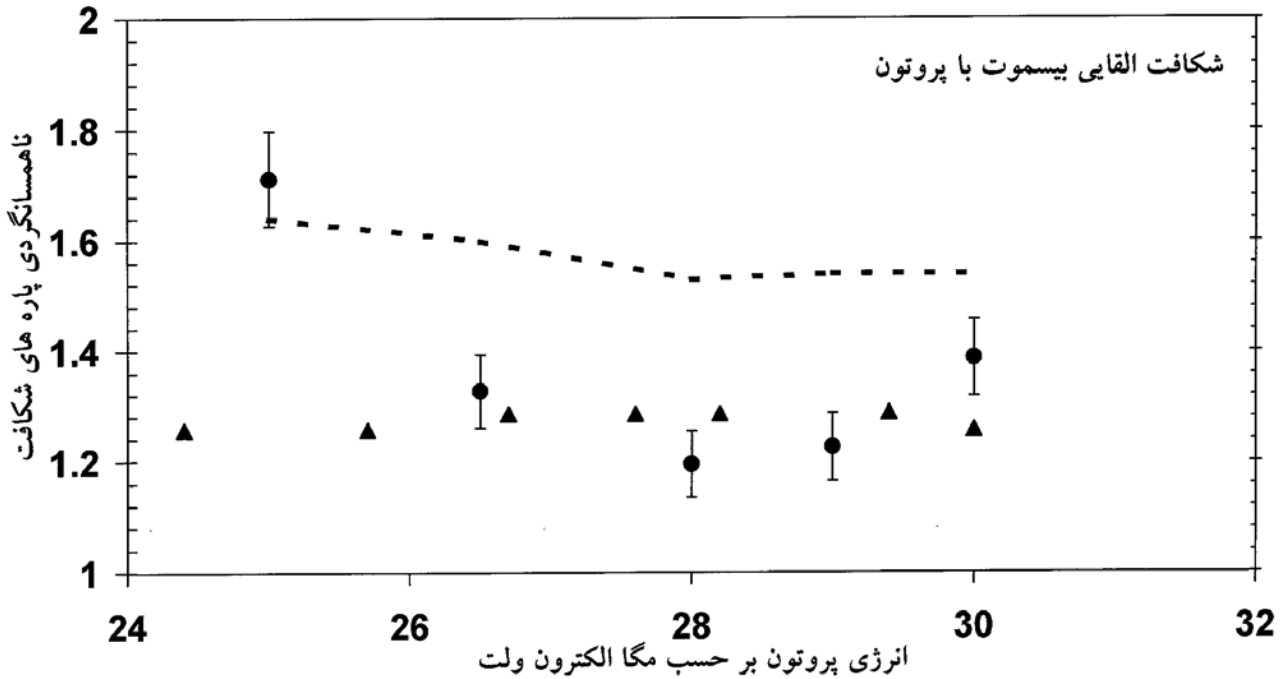
شکل ۱۲. توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت عنصر بیسموت با باریکه پروتون ۲۹ MeV. منحنی پریرازش با چند جمله‌ای لژاندر است.



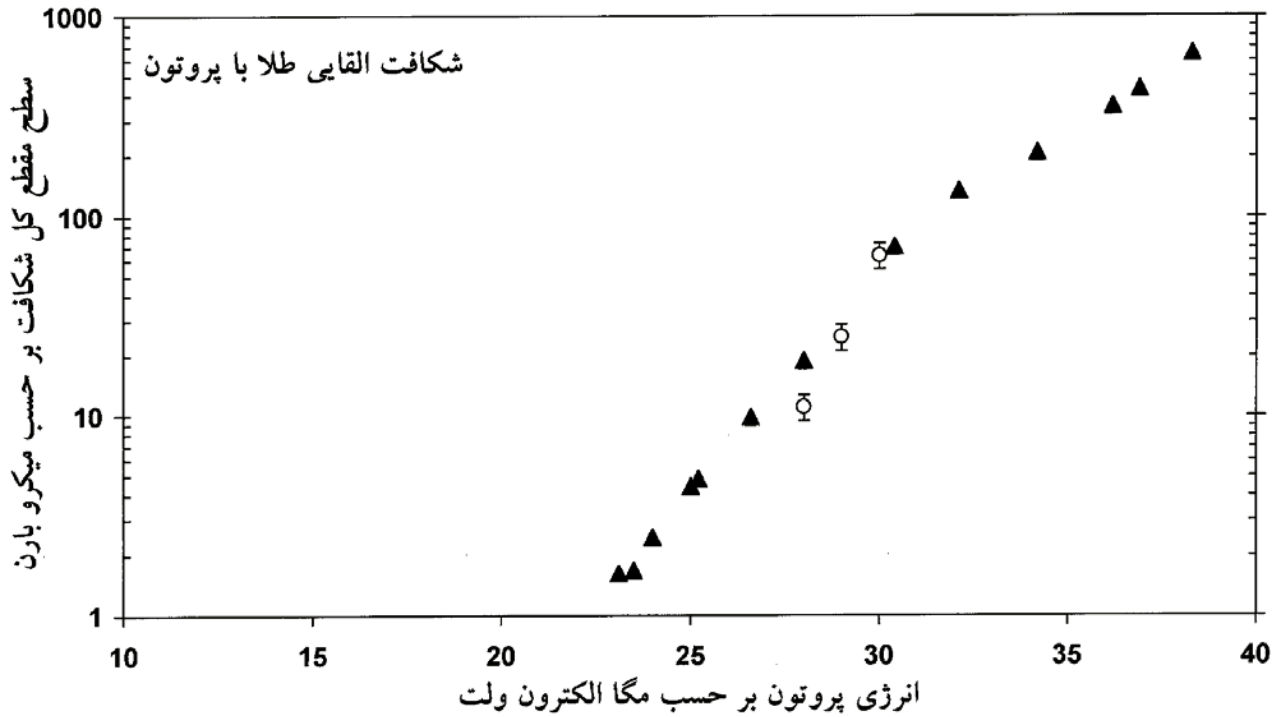
شکل ۱۳. توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت عنصر بیسموت باریکه پروتون ۳۰ MeV. منحنی پربرازش با چند جمله‌ای لژاندر است.



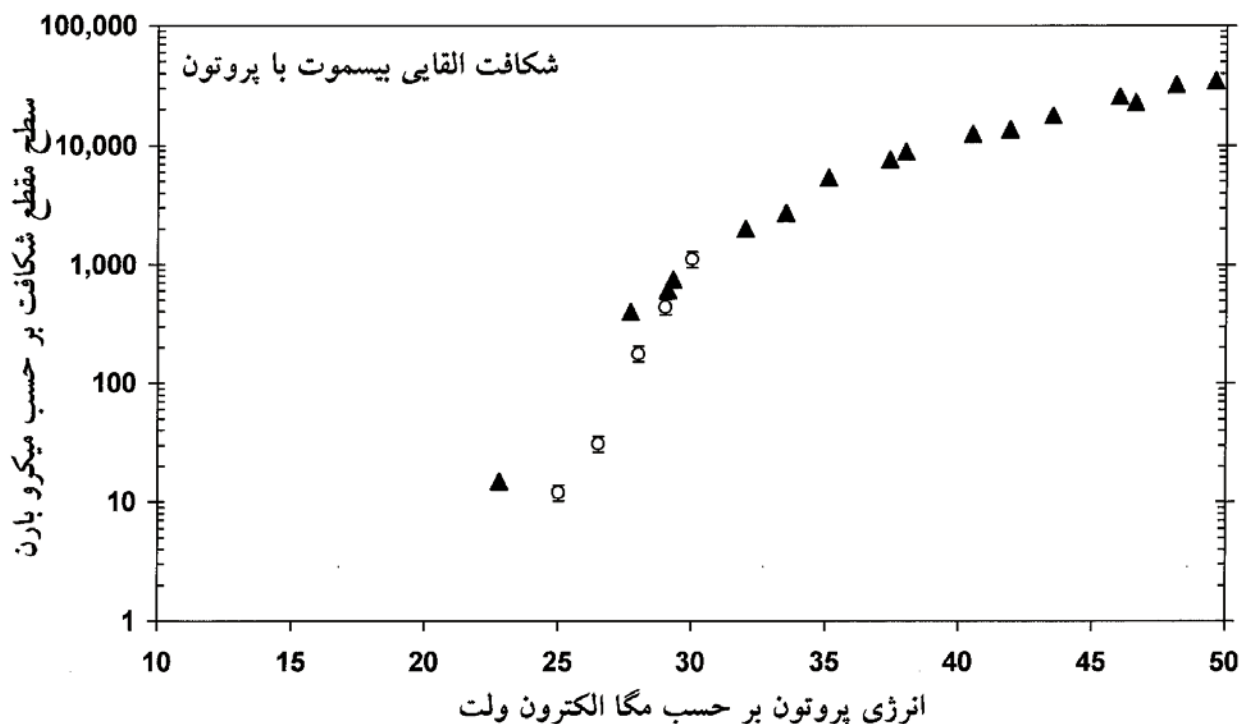
شکل ۱۴. ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت عنصر طلا با باریکه پروتون در انرژیهای مختلف. Δ مربوط به مراجع [۳ و ۴]، منحنی خط چین پیش بینی مدل آماری نقطه زینی استاندارد (بدون در نظر گرفتن اسپین هسته هدف)، و \bullet مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده کنونی است.



شکل ۱۵. ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت عنصر بیسموت با باریکه پروتون در انرژیهای مختلف. Δ مربوط به مراجع [۴۳]، منحنی خط چین پیش بینی مدل آماری نقطه زینی استاندارد (بدون در نظر گرفتن اسپین هسته هدف)، و \bullet مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده کنونی است.



شکل ۱۶. سطح مقطع کل شکافت عنصر طلا با باریکه پروتون \blacktriangle مربوط به مرجع [۱۴] و \circ مربوط به اندازه‌گیریهای کنونی است.



شکل ۱۷. سطح مقطع کل شکافت عنصر بیسموت با باریکه پروتون ▲ مربوط به مرجع [۱۴] و ◻ مربوط به اندازه‌گیریهای کنونی است.

۵. نتیجه گیری

همان گونه که مشاهده می‌شود، علت اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده سطح مقطع کل شکافت و ناهمسانگردی زاویه‌ای در این آزمایش با نتایج قبلی در روش آشکارسازی است. در آزمایشهای قبلی از ورقه جاذب برای آشکار کردن پاره‌های شکافت استفاده شده است که نسبت به روش ما از دقت کمتری برخوردار است. در ضمن توزیع زاویه‌ای عناصر مذکور تاکنون اندازه‌گیری نشده است.

باید دانست که با توجه به رابطه (۳)، بردایی توزیع عدد کوانتومی K ، یعنی K^2 به دمای هسته‌ای t ، و گشتاور لختی موثر (τ_{eff}) وابسته است. از طرفی با توجه به رابطه (۴)، ناهمسانگردی زاویه‌ای (A) به گشتاور دوم توزیع تکانه زاویه‌ای یعنی $\langle I^2 \rangle$ وابسته است. از طریق تجربی کمیت A در انرژیهای تابشی مختلف قابل اندازه‌گیری است (شکل‌های ۱۴ و ۱۵). بنابراین با معلوم بودن K^2 می‌توان $\langle I^2 \rangle$ را به دست آورد و یا با معلوم بودن $\langle I^2 \rangle$ می‌توان K^2 را به دست آورد. بدین ترتیب یکی از دو کمیت t و τ_{eff} قابل تعیین است و چون t نیز مطابق رابطه (۶) به انرژی برانگیختگی در نقطه زمین مربوط است، می‌توان از رابطه (۷) ارتفاع سد شکافت، و یا از

۲.۴. محاسبه سطح مقطع شکافت

برای محاسبه سطح مقطع کل شکافت در واکنشهای عنصر طلا و بیسموت با باریکه پروتون به ازای انرژیهای مختلف باریکه تابشی، فرض می‌کنیم که سطح مقطع دیفرانسیلی شکافت در تطبیق با نتایج تجربی به صورت زیر باشد:

$$\frac{d\sigma_f}{d\Omega} = K [1 + \alpha' P_2(\cos \theta)] \quad (11)$$

که در آن k و α' ضریب ثابتی هستند.

با توجه به وابستگی زاویه‌ای سطح مقطع دیفرانسیلی شکافت به زاویه، سطح مقطع کل شکافت از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\sigma_f = \int \frac{d\sigma_f(\theta)}{d\Omega} = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \frac{d\sigma_f(\theta)}{d\Omega} \sin \theta d\theta d\phi = 2\pi k \quad (12)$$

شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب تغییرات لگاریتمی سطح مقطع کل شکافت را بر حسب انرژیهای مختلف باریکه پروتون برای عناصر طلا و بیسموت نشان می‌دهد. در این اندازه‌گیریها، جمع خطاهای اندازه‌گیری در سطوح مقطع کل شکافت به واسطه خطای در اندازه‌گیری جریان باریکه (۶٪)، زاویه فضایی آشکارساز (۳٪)، و نیز خطاهای آماری به واسطه تعداد رویدادهای شکافت آشکار شده حدود ۹٪ محاسبه شده است.

از مقایسه پارامتر عدم تقارن جرمی هسته‌های مرکب پولونیوم و جیوه با پارامتر بوزینارو-گالن مربوط به این عناصر به این نتیجه می‌رسیم که پارامتر عدم تقارن جرمی این عناصر از این پارامتر بزرگتر است. به طوری که می‌توان مقادیر اندازه‌گیری شده ناهمسانگردی را به کمک مدل آماری نقطه زینی استاندارد پیش بینی نمود.

برای واکنشهای شکافت القایی با پرتابه‌های سنگین عکس مورد فوق صادق است و مقادیر اندازه‌گیری شده ناهمسانگردی زاویه‌ای از پیش بینی مقادیر مدل آماری نقطه زینی استاندارد بزرگتر است که آن را می‌توان به فرایندهای شکافت پیش تعادلی و شبکه شکافت نسبت داد (۳۳).

رابطه (۸) تعداد نوترونهای گسیلی را به دست آورد.

پارامتر عدم تقارن جرمی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\alpha = (A_T - A_P) / (A_T + A_P), \quad (13)$$

که در آن، A_T و A_P به ترتیب عدد جرمی هسته هدف و پرتابه است. کمیت عدم تقارن جرمی بحرانی بوزینارو-گالن و پارامتر شکافت پذیری به صورت زیر تعریف می‌گردند (۳۲):

$$\alpha_{BG} = \left\{ p \sqrt{(x - x_{BG}) / (x - x_{BG}) + q}, (x > x_{BG}) \right. \quad (14)$$

$$\left. \chi = \frac{Z^2 / A}{50.783 \left\{ -1/7826 \left[(N - Z) / A \right]^2 \right\}} \right. \quad (15)$$

که در این معادلات $x_{BG} = 0.396$ ، $q = 0.24$ و $p = 1.12$ است. برای پارامتر شکافت پذیری هسته‌های مرکبی که از مقدار 0.396 کوچکتر باشد ضریب بوزینارو-گالن صفر است.

مراجع

1. R F Reising, G L Bate, and J R Huizenga, *Phys. Rev.* **141**, 1164 (1966).
2. S A Karamyran, I V Kuznetsov, Yu A Muzychka et al., *Sov. J. Nucl. Phys.* **6**, 360 (1968).
3. K G Kuvatov, V N Okolovich, and G N Smirenkin, *JETP Lett.* **8**, 171 (1968); K G Kuvatov, V N Okolovich, L A Smirina et al., *Sov. J. Nucl. Phys.* **14**, 45 (1972).
4. A V Ignatyuk, M G Itkis, S I Mul'gin et al., *JETP Lett.* **25**, 58 (1977).
5. A V Ignatyuk, M G Itkis, V N Okolovich et al., *Sov. J. Nucl. Phys.* **25**, 13 (1977).
6. H Block, and B D Pate, *Z Phys. A* **281**, 255 (1977).
7. S D Beizin, M G Itkis, Yu A Muzychka et al., *Sov. J. Nucl. Phys.* **37**, 482 (1983).
8. A V Ignatyuk, G N Smirenkin, M G Itkis et al., *Sov. J. Part. Nucl.* **16**, 307 (1985).
9. S D Beizin, M G Itkis, I A Kamenev et al., *Sov. J. Nucl. Phys.* **43**, 883 (1983).
10. A V Ignatyuk, M G Itkis, I A Kamenev, S I Mul'gin, V N Okolovich, and G N Smirenkin, *Sov. J. Nucl. Phys.* **40(3)**, 400 (1983).
11. H Zhang, Z Liu, J Xu, X Qian, Y Qiao, C Lin, and K Xu, *Phys. Rev. C* **49**, (2), 926 (1994).
12. I Halpern, and V M Strutinsky, *Proc int Conf Peaceful Uses of Atomic Energy*, Geneva, **15**, 408 (1958).
13. A W Fairhall, *Phys. Rev.*, **5(102)**, 1335 (1956).
14. A Khodai-Joopari, Ph.D. Thesis, University of California Lawrence Radiation Laboratory Report, No. UCRL-16489, 1966.
15. O A Zhukova, A B Ignatyuk, M G Itkis, S I Mul'gin, V N Okolovich, G N Smirenkin, and A S Tishin, *Sov. J. Nucl. Phys.*, **26(3)**, 251 (1977).
16. A V Ignatyuk, M G Itkis, I A Kamenev, S I Mul'gin, V N Okolovich, and G N Smirenkin, *Sov. J. Nucl. Phys.*, **40(3)**, 400 (1984).
17. K E Flynn, L E Glendenin, and J R Huizenga, *Nucl. Phys.* **58**, 321 (1964).
18. J A Wheeler, in *Fast Neutron Physics*, eds. J B Marion and J L Fowler, Wiley-Inter Science, New York, 1963.
19. R Vandenbosch, and J R Huizenga, *Nuclear Fission* (Academic Press, New York), 1973.
20. L C Vazand, and J M Alexander, *Phys. Rep.* **97**, 1 (1983).
21. A Bohr, *Proc. Int. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy*, New York, **2**, 151 (1956).
22. R Freifelder, M Prakash, and J M Alexander, *Phys. Rep.*, **133**, 315 (1986).
23. J M Alexander, *Ann Phys. (Paris)* **12**, 603 (1987).
24. J O Newton, *Sov. J. Nucl. Phys.* **21**, 349 (1990).
25. S Kailas, *Phys. Rep.* **284**, 381 (1997).
26. R Vandenbosch, J R Bierman, J P Lestone, J F Liang, D J Prindle, A A Sonzogni, S Kailas, D M Nadkarni, and S S Kapoor, *Phys. Rev. C* **45**, R977 (1996).
27. C R Morton, D J Hinde, J R Leigh, J P Lestone, M Dasgupta, J C Mein, J O Newton, and H Timmers, *Phys. Rev. C* **52**, 243 (1995).
28. Luciano G Moretto, *Nucl. Phys. A* **47**, 211 (1975).
29. J D Becchetti, and G W Greenlees, *Phys. Rev.* **182**, 1180 (1969).
30. J R Huizenga, and G Igo, *Nucl. Phys.* **29**, 462 (1962).
31. A S Tishin, K K Istekov, S B Ermagambetov, and G N Smirenkin, *Sov. J. Nucl. Phys.* **25**, 147 (1976).
32. K T R Davies, and A J Sierk, *Phys. Rev. C* **31**, 915 (1985).
33. B B ack, R R Betts, J E Gindler, B D Wilkins, S Saini, M B Tsang, C K Gelbke, W G Lynch, M A McMahan, and P A Baisden, *Phys. Rev. C* **33**, 385 (1986).