مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۷، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۸۶

توزیع بار الکتریکی محصولات شکافت حاصل از واکنش شکافت اورانیم ۲۳۸ با پروتونهای MeV ۶۹ – ۴۵

هوشیار نوشاد

پژوهشکدهٔ علوم هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی ۸۳۶ – ۱۴۳۹۵، تهران

پست الکترونیکی: hnoshad@aeoi.org.ir

(دریافت مقاله: ۸۶/۵/۱۳ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۸۶/۱۱/۹)

چکیده

واکنش شکافت اورانیم ۲۳۸ با پروتونهای MeV ۶۹ – ۴۵ در مرکز سیکلوترون و رادیوایزوتوپ دانشگاه توهوکوی ژاپن انجام شد. محصولات شکافت حاصل از این واکنش با روش طیف نگاری پرتوهای گاما شناسایی شدند. داده‌های تجربی نشان می‌دهند که توزیع بار الکتریکی محصولات شکافتِ با عدد جرمی یکسان (ایزوبار) از یک تابع گاوسی با انحراف استاندارد ثابت پیروی می‌کند و بستگی به عدد جرمی ایزوبار انتخاب شده ندارد. این انحراف استاندارد در واکنش $^{238}U(p, f)$ با پروتونهای ۴۵، ۵۵، ۶۵ و MeV ۶۹ اندازه‌گیری شده است. برای شکافت با پروتونهای MeV ۴۵، این کمیت با مقدار ارائه شده در آزمایشهای دیگر به خوبی سازگار است و با پیش‌بینی مدل هاوزِر–فِشبَک نیز مطابقت دارد. برای انرژیهای دیگر نیز اندازه‌گیری این انحراف استاندارد تاکنون در مقاله‌ها گزارش نشده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش انرژی برانگیختگی هستهٔ شکافنده، توزیع بار الکتریکی محصولات شکافتِ ایزوبار پهن‌تر می‌شود. در این آزمایش، محتمل‌ترین بار الکتریکی محصولات شکافتِ ایزوبار نیز به دست آمد. این نتایج با پیش‌بینی مدل " انرژی پتانسیل کمینه (MPE)" سازگاری خوبی دارد. به علاوه، داده‌های تجربی، قطبش بار الکتریکی را نیز در فرایند شکافت هسته‌ای نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: توزیع بار الکتریکی، محصولات شکافت، اورانیم ۲۳۸، طیف‌نگاری پرتوهای گاما، پروتونهای MeV ۶۹– ۴۵، بهرهٔ شکافت

۱. مقدمه

فرایند تقسیم بار الکتریکی هستهٔ شکافنده بین محصولات شکافت یکی از موضوعات مهم در بحث شکافت هسته‌ای است. متاسفانه داده‌های تجربی زیادی برای توزیع بار الکتریکی پاره‌های شکافت در دسترس نیست. علت آن را می‌توان در مشکل بودن شناسایی دقیق محصولات شکافت جست و جو نمود. برای این منظور باید داده‌های مربوط به بهرهٔ شکافت در دسترس باشد. بهرهٔ شکافت به دو صورتِ مستقل و انباشته اندازه‌گیری می‌شود. بهرهٔ شکافتِ مستقل متناظر است با بهرهٔ محصولات شکافت پس از گسیل نوترونهای آنی. این نوع بهرهٔ شکافت برای یک ایزوبار خاص، بدون دخالت واپاشی بتای ایزوبارهای مجاور اندازه گرفته می‌شود [۱]. بیشتر اطلاعات تجربی مربوط به تقسیم بار الکتریکی هستهٔ شکافنده از بهره شکافت مستقل به دست آمده است. از طرف دیگر، برای یک پاره شکافت خاص، بیشتر بهرهٔ شکافت معمولاً ناشی از واپاشی بتای ایزوبارهایی است که دارای نوترونهای بیشتری هستند و بهره شکافت زیادتری دارند. چنین بهره‌هایی را بهرهٔ شکافت انباشته می‌نامند [۱]. اینها اطلاعاتی در باره توزیع جرم پاره‌های شکافت ارائه می‌دهند. خوشبختانه برای محصولات شکافتی که به اندازهٔ کافی از خط پایداری بتا دور هستند، می‌توان از بهرهٔ شکافت انباشته نیز اطلاعاتی در بارهٔ تقسیم بار الکتریکی هستهٔ شکافنده به دست آورد. زیرا برای

Archive of SID

www.SID.ir

این دسته از محصولات شکافت، بهرهٔ انباشته به میزان قابل توجهی از بهرهٔ کل کمتر خواهد بود.

توزیع بار الکتریکی محصولات شکافتِ ایزوبار را می‌توان با یک تابع گاوسی توصیف نمود [۲]. برخی آزمایشها نشان می‌دهند که در واکنشهای شکافت القایی با نوترونهای گرمایی و شکافت خود به خودی، عرض نیم ارتفاع (FWHM) این توزیع مستقل از انرژی برانگیختگی هسته شکافنده است و به نوع هسته شکافنده نیز بستگی ندارد [۳ و ۲]. در واکنشهای شکافت القایی ^{۲۳۵}U با نوترونهای گرمایی و شکافت ^{۲۳۲}Th و ^{۲۳۵}U با پرتوهای آلفا، در محدودهٔ انرژی برانگیختگی تا ۵۷ MeV، پراکندگی توزیع بار الکتریکی مقداری ثابت و برابر $۲\sigma^۲ = ۰/۹۵ \pm ۰/۰۵$ است [۴و۳]. این توزیع بار الکتریکی به صورت زیر نوشته می‌شود [۴]:

$$p(Z) = \frac{۱}{\sqrt{۰/۹۵\pi}} \exp\left\{-\frac{(Z-\bar{Z})^۲}{۰/۹۵}\right\}, \qquad (۱)$$

که در آن $\bar{Z}$ محتمل‌ترین بار الکتریکی برای محصولات شکافت ایزوبار است. پراکندگی توزیع بار در واکنش شکافت القایی هسته‌های ^{۱۹۷}Au با یونهای ^{۱۲}C با انرژی ۱۱۲ MeV نیز برابر $۲\sigma^۲ = ۰/۹ \pm ۰/۱$ گزارش شده است [۵].

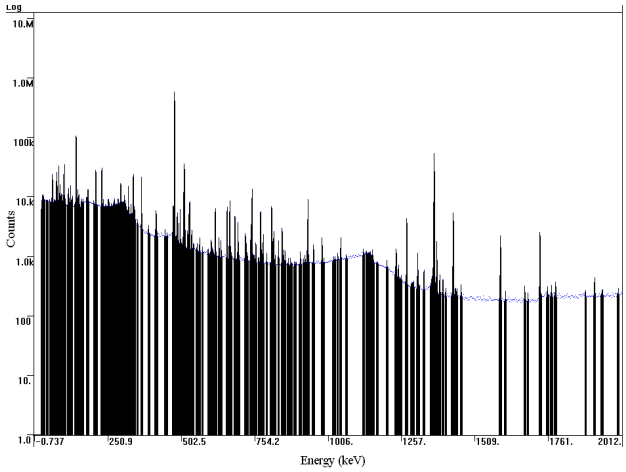
برای برآورد تئوری $\bar{Z}$ نیز مدلهایی ارائه شده است. هر چند که هیچ یک از این مدلها قادر نیستند توصیف کاملی از چگونگی تقسیم بار الکتریکی هستهٔ شکافنده بین محصولات شکافت را ارائه دهند. در یکی از این مدلها که "توزیع بار تغییر نیافته (UCD)" نامیده می‌شود، نسبت بار به جرم برای پاره‌های شکافتِ اولیه (قبل از گسیل نوترونهای آنی) و هستهٔ شکافنده، یکسان در نظر گرفته می‌شود [۶]. به عبارت دیگر، چگالی بار الکتریکی پاره‌های شکافت اولیه و هستهٔ شکافنده با یکدیگر برابرند. این مدل روشی ساده برای برآورد محتمل‌ترین بار الکتریکی ارائه می‌دهد. در اغلب موارد، پیش‌بینی این مدل تفاوت نسبتاً زیادی با نتایج تجربی دارد. انحراف بار الکتریکی هر پاره شکافت اولیه از مقدار پیش بینی شده توسط مدل UCD اغلب سودمند است و قطبش بار در فرآیند شکافت نامیده می‌شود [۷]. در مدل دیگر که به مدل "جابه‌جایی یکسان بار (ECD)" معروف است، فرض می‌شود که محتمل‌ترین بار الکتریکی برای یک زوج پارهٔ شکافت به گونه‌ای باشد که به فاصلهٔ یکسان از خط پایداری بتا قرار بگیرند. این مدل برای هسته‌های شکافنده با انرژی برانگیختگی پایین کارایی خوبی دارد [۸ و ۳]. در مدل دیگر که مدل "انرژی پتانسیل کمینه (MPE)" نامیده می‌شود، فرض بر این است که توزیع بار الکتریکی به گونه‌ای تغییر می‌کند که مجموع انرژی پتانسیل هسته و انرژی دافعهٔ کولنی آن کمینه شود [۹]. این مدل قادر است توزیع بار الکتریکی محصولات شکافت در واکنشهای شکافت با انرژی برانگیختگیِ متوسط را به خوبی پیش‌بینی کند. به عنوان نمونه‌ای از کاربرد موفقیت‌آمیز این مدل می‌توان واکنش $^{۱۹۷}Au(^{۱۲}C, f)$ با یونهای کربن ۱۱۲ MeV را نام برد [۵]. در این آزمایش، در واکنش $^{۲۳۸}U(p, f)$ با پروتونهای ۶۹– ۴۵ MeV، تعدادی از محصولات شکافت شناسایی شدند. سپس توزیع بار الکتریکی برای پاره‌های شکافتِ ایزوبار و از آن‌جا بهره شکافت آنها در هر انرژی به دست آمد. نتایج تجربی با پیش‌بینی مدل آماری هاوزر– فشبک و مدل انرژی پتانسیل کمینه MPE، سازگار است. به علاوه نشان داده شد که در مورد شکافت، قطبش بار الکتریکی محصولات شکافت رخ می‌دهد.

۲. آزمایش

در این آزمایش، یک هدف مرکب شامل چهار هدف نازک اورانیم ۲۳۸ و تعدادی پولک مسی و آلومینیمی با باریکهٔ پروتون ۷۰ MeV حاصل از سیکلوترون دانشگاه توهوکوی ژاپن بمباران شد. از پولکهای نازک مسی و آلومینیمی به منظور کاهش انرژی باریکهٔ پروتون به مقدار مورد نظر و همین‌طور برای اندازه‌گیری شدت باریکه پروتون در مدت زمان آزمایش استفاده شد. بنابراین انرژی باریکهٔ پروتون در هر یک از هدفهای اورانیم به ۶۹، ۶۵، ۵۵ و ۴۵ MeV می‌رسید. برای ثبت طیفهای گامای گسیل شده از محصولات شکافت و پولکهای مسی و آلومینیمی از دو دستگاه آشکارساز ژرمانیم فوق خالص و دو تحلیل‌گر چند

Archive of SID

www.SID.ir

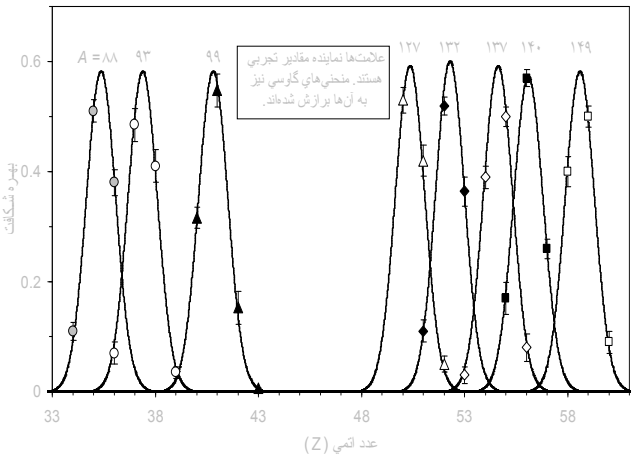


شکل ۱. طیف گامای گسیل شده از محصولات شکافت حاصل از واکنش شکافت القایی اورانیم ۲۳۸ با پروتونهای ۶۹ MeV.

کاناله هر یک با ۴۰۹۶ کانال استفاده شد. بدین ترتیب تعداد قابل توجهی طیف گامای گسیل شده از محصولات شکافت در پولکهای مسی و آلومینیمی در فواصل متفاوت و در زمانهای مختلف جمع‌آوری شد. در این آزمایش، قطر باریکهٔ پروتون ۷ mm – ۶، زمان بمباران ۳۰ دقیقه، میانگین جریان باریکه ۰/۷۲ μA و کل بار الکتریکی جمع شده در فنجان فارادی تقریباً ۱۲۰۰ μC بود. شرح مفصل‌تری از آزمایش را می‌توان در مرجع [۱۰] یافت.

۳. آنالیز داده‌های تجربی

شکل ۱ نمونه‌ای از طیف گامای گسیلی از هدف اورانیم ۲۳۸ را برای باریکهٔ پروتون ۶۹ MeV نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن قلهٔ فوتوالکتریک مناسب، نیمه عمر، نسبت شاخه‌ای، زمان سرد شدن نمونه و زمان اندازه‌گیری طیف، برخی از محصولات شکافت ایجاد شده در آزمایش شناسایی شدند [۱۰]. تعدادی از محصولات شکافت نیز از روی اطلاعات مربوط به پارهٔ شکافت همزاد آن به دست آمدند. سطح مقطع تشکیل هر یک از این محصولات شکافت نیز در مرجع [۱۰] اندازه‌گیری شده است. سپس بهرهٔ شکافت برای پاره‌های شکافت با عدد جرمی یکسان به دست آمد. شکل ۲ بهرهٔ شکافت تجربی را بر حسب عدد اتمی محصولات شکافت ایجاد شده در واکنش شکافت اورانیم



شکل ۲. توزیع بار الکتریکی محصولات شکافت ایزوبار با عددهای جرمی ۸۸، ۹۳، ۹۹، ۱۲۷، ۱۳۲، ۱۳۷، ۱۴۰ و ۱۴۹ در واکنش شکافت اورانیم ۲۳۸ با پروتونهای ۴۵ MeV به همراه منحنیهای گاوسی برازش شده به آنها.

۲۳۸ با پروتونهای ۴۵ MeV و برای ایزوبارهای ۱۴۹و۱۴۰، ۱۳۷، ۱۳۲، ۱۲۷، ۹۹، ۹۳، ۸۸ = A نشان می‌دهد. منحنیهای گاوسیِ برازش شده به این نقاط نیز در شکلها نمایش داده شده‌اند. پهنای نیم ارتفاع (FWHM) برای این منحنیهای گاوسی بر حسب عدد جرمی محصولات شکافتِ ایزوبار در شکل ۳ نشان داده شده است. محتمل‌ترین بار الکتریکی ($\bar{Z}$) و ضریب نیم ارتفاع محصولات شکافت ایزوبار را نیز می‌توان از روی تابع گاوسیِ برازش شده به دست آورد. این کمیتها برای شکافت اورانیم ۲۳۸ با پروتونهای ۴۵، ۵۵، ۶۵ و ۶۹ MeV در جدول ۱ ارائه داده شده‌اند. شکل ۴ مقادیر پهناهای نیم ارتفاع (FWHM) را به صورت تابعی از انرژی برانگیختگی هسته مرکب شکافته نپتونیم ۲۳۹ نشان می‌دهد.

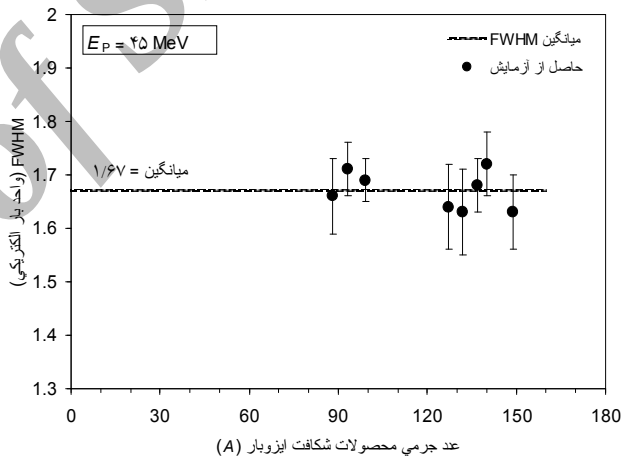
برای محاسبهٔ قطبش بار الکتریکی محصولات شکافت باید تعداد نوترونهای آنی گسیل شده از هر پاره شکافت (ν_A) در دسترس باشد تا بتوان جرم محصولات شکافت اولیه (قبل از گسیل نوترونهای آنی) را به دست آورد. ν_A به صورت تابعی از عدد جرمیِ پارهٔ شکافت برای واکنش شکافت اورانیم ۲۳۸ با پروتونهای ۵۵ MeV را می‌توان در مرجع [۱۱] یافت. عدد اتمی به دست آمده از مدل "توزیع بار تغییر نیافته" یعنی Z_{UCD} از

Archive of SID

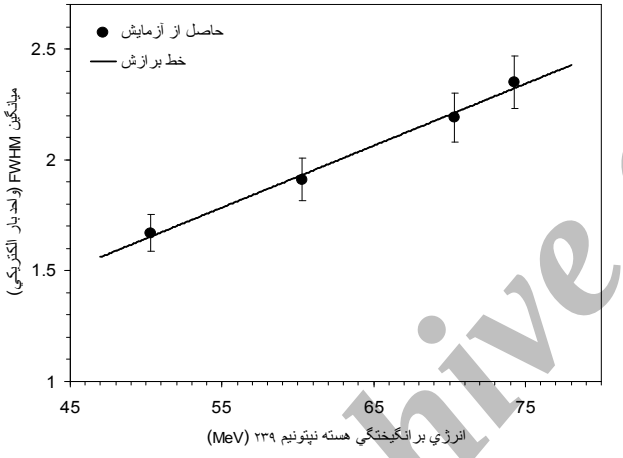
www.SID.ir

جدول ۱. محتمل‌ترین بار الکتریکی ($\overline{Z}$) و پهنای نیم ارتفاع (FWHM) برای محصولات شکافت ایزوبار آشکار شده در آزمایش شکافت ^{238}U با پروتونهای ۴۵ MeV. مقادیر FWHM برای توزیع بار محصولات شکافت ایزوبار در واکنش شکافت ^{238}U با پروتونهای ۵۵، ۶۵ و ۶۹ MeV نیز مشاهده می‌شوند.

عدد جرمی (A) (E_P = ۴۵ MeV)	($\overline{Z}$) (E_P = ۴۵ MeV)	FWHM (E_P = ۴۵ MeV)	FWHM (E_P = ۵۵ MeV)	FWHM (E_P = ۶۵ MeV)	FWHM (E_P = ۶۹ MeV)
۸۸	۳۵/۳۷	۱/۶۸ ± ۰/۰۶	۱/۹۳ ± ۰/۰۷	۲/۱۶ ± ۰/۰۶	۲/۳۰ ± ۰/۰۲
۹۳	۳۷/۳۹	۱/۶۷ ± ۰/۰۵	۱/۹۵ ± ۰/۰۹	۲/۲۷ ± ۰/۰۵	۲/۳۸ ± ۰/۰۷
۹۹	۴۰/۸۱	۱/۶۷ ± ۰/۰۷	۱/۹۱ ± ۰/۰۸	۲/۲۰ ± ۰/۰۷	۲/۴۰ ± ۰/۰۵
۱۲۷	۵۰/۳۶	۱/۶۵ ± ۰/۰۶	۱/۸۶ ± ۰/۰۵	۲/۱۸ ± ۰/۰۷	۲/۲۸ ± ۰/۱۰
۱۳۲	۵۲/۳۰	۱/۶۶ ± ۰/۰۵	۱/۸۷ ± ۰/۰۷	۲/۱۹ ± ۰/۰۸	۲/۳۹ ± ۰/۰۹
۱۳۷	۵۱	۱/۶۴ ± ۰/۰۶	۱/۹۱ ± ۰/۰۵	۲/۱۴ ± ۰/۰۵	۲/۳۲ ± ۰/۰۶
۱۴۰	۵۶/۱	۱/۶۹ ± ۰/۰۵	۱/۸۹ ± ۰/۰۷	۲/۱۷ ± ۰/۰۸	۲/۳۱ ± ۰/۰۶
۱۴۹	۵	۱/۶۸ ± ۰/۰۷	۱/۹۶ ± ۰/۰۶	۲/۲۱ ± ۰/۰۷	۲/۴۲ ± ۰/۰۸



شکل ۳. پهنای نیم ارتفاع (FWHM) توزیع بار الکتریکی محصولات شکافتِ ایزوبار بر حسب عدد جرمی در واکنش شکافت اورانیم ۲۳۸ با پروتونهای ۴۵ MeV. میانگین FWHM در این انرژی برابر ۰/۰۶ ± ۱/۶۷ است.



شکل ۴. میانگینِ FWHM توزیع بار الکتریکی محصولات شکافتِ ایزوبار بر حسب انرژی برانگیختگی هستهٔ شکافنده نپتونیم ۲۳۹ ایجاد شده در واکنش $^{238}U(p, f)$.

رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_{UCD} = (Z_F / A_F)(A + \nu_A), \qquad (۲)$$

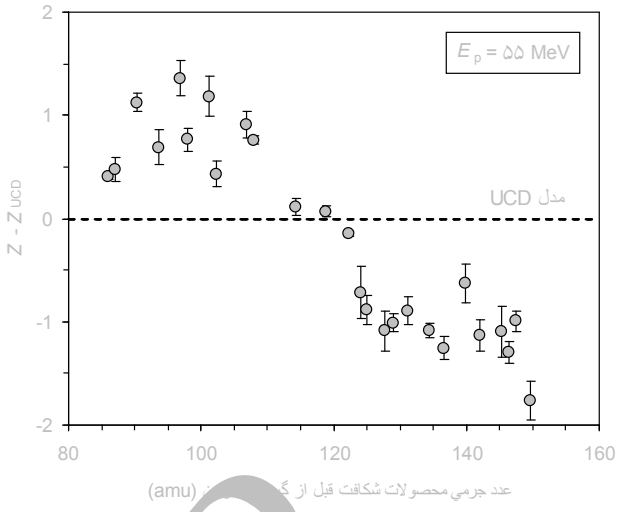
که در آن Z_F و A_F به ترتیب بار و جرم هستهٔ شکافنده و A عدد جرمی پارهٔ شکافت است [۷]. اختلاف بار الکتریکی هر یک از محصولات شکافت با Z_{UCD} یعنی $\Delta Z = Z - Z_{UCD}$ قطبش بار نامیده می‌شود. شکل ۵ این کمیت را بر حسب عدد جرمی محصولات شکافت قبل از گسیل نوترون در واکنش شکافت اورانیم ۲۳۸ با پروتونهای ۵۵ MeV نشان می‌دهد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

از شکل ۳ می‌توان دید که میانگین FWHM برای تمام محصولات شکافتِ ایزوبار آشکار شده در واکنش با پروتونهای ۴۵ MeV، مقدار ۰/۰۶ ± ۱/۶۷ را اختیار می‌کند.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۵. قطبش بار الکتریکی ($Z - Z_{UCD}$) بر حسب عدد جرمی محصولات شکافت قبل از گسیل نوترون برای واکنش شکافت اورانیم ۲۳۸ با پروتونهای ۵۵ MeV. انرژی برانگیختگی هسته شکافندهٔ نپتونیم ۲۳۹ برابر ۶۰/۳ MeV است.

این مقدار متناظر با انحراف استاندارد ۰/۰۴ ± ۰/۷۱ است. به عبارت دیگر در واکنش $^{238}U(p, f)$ با پروتونهای ۴۰ MeV (هسته شکافنده ^{239}Np با انرژی برانگیختگی ۵۰/۳ MeV) عرض نیم ارتفاع توزیع بار الکتریکی محصولات شکافت ایزوبار مقداری ثابت و برابر با ۰/۰۶ ± ۱/۶۷ است. این مقدار بستگی به عدد جرمی ایزوبار انتخاب شده ندارد و با مقدار گزارش شدهٔ ۱/۶۲ در مرجع [۴] به خوبی سازگار است. به علاوه در واکنش شکافت القایی ^{238}U با پروتونهای ۵۵، ۶۵ و ۶۹ MeV نیز میانگین FWHM برای محصولات شکافت ایزوبار به ترتیب برابر با ۰/۰۸ ± ۱/۹۱، ۰/۰۷ ± ۲/۱۹ و ۰/۰۸ ± ۲/۳۵ به دست آمد. این کمیتها تاکنون در مقاله‌ها گزارش نشده‌اند. انحراف استاندارد توزیع بار الکتریکی محصولات شکافت ایزوبار (σ) را می‌توان با استفاده از مدل آماری هاوزر- فشبک نیز پیش‌بینی نمود. در این مدل، ابتدا سطح مقطع تشکیل محصولات شکافت به دست می‌آید [۱۲]. سپس می‌توان با در نظر گرفتن مواردی از قبیل حالتهای ممکن شکافت و اثرات پوسته‌ای در فرایند گسیل نوترون، اصلاحاتی را در این مدل وارد نمود [۱۳] و توزیع جرم و بار الکتریکی پاره‌های شکافت را به دست آورد. این مدل می‌تواند توصیف نسبتاً خوبی از واکنشهای شکافت القایی هسته‌های سنگین با ذرات باردار سبک ارائه دهد. بر اساس این مدل، توزیع بار الکتریکی محصولات شکافت ایزوبار، قبل از گسیل نوترون، دارای شکل گاوسی با انحراف استاندارد زیر است [۱۳]:

$$\sigma_Z(A, E_{ex}) = \sqrt{0/10 + 0/025 E_{ex}^{1/2} + \delta}\,, \qquad (3)$$

که در آن A و Z به ترتیب عدد جرمی محصولات شکافت ایزوبار و عدد بار الکتریکی، و E_{ex} انرژی برانگیختگی هستهٔ شکافنده است. پارامتر δ نیز در این رابطه به صورت زیر است:

$$\delta = \begin{cases} -0/08 & A\text{زوج}، N\text{زوج} \\ +0/08 & A\text{زوج}، N\text{فرد} \\ -0/04 & A\text{فرد}، N\text{فرد} \\ +0/04 & A\text{فرد}، N\text{زوج} \end{cases} \qquad (4)$$

انحراف استاندارد برآورد شده توسط این مدل، حدود ۲۰٪ کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده در این آزمایش یعنی ۰/۰۴ ± ۰/۷۱ است. بخشی از این اختلاف را می‌توان به گسیل نوترونها از محصولات شکافت نسبت داد، به ویژه آن دسته از محصولات شکافتی که بهرهٔ شکافت انباشته برای آنها مقدار قابل توجهی است.

برای برآورد نظری محتمل‌ترین بار الکتریکی در فرایند تقسیم بار هستهٔ شکافنده ($\bar{Z}$)، مدل MPE نتیجهٔ نسبتاً رضایت بخشی ارائه می‌دهد [۹]. در این مدل، مسئلهٔ تعیین $\bar{Z}$ به محاسبهٔ کمینهٔ انرژی پتانسیل هستهٔ شکافنده در لحظهٔ انقطاع (Scission) منجر می‌شود. بدین منظور باید جرم پاره‌های شکافت سبک و سنگین در هنگام تولد در دسترس باشد. با به کار بردن فرمول گرین [۱۴] برای جرم هسته و محاسبهٔ انرژی پتانسیل کمینهٔ هستهٔ شکافنده می‌توان محتمل‌ترین بار الکتریکی پارهٔ شکافت سبک ($\bar{Z}_L$) را به صورت زیر به دست آورد [۱۵]:

$$\bar{Z}_L = Z_T \frac{A_L}{A_H}\left[1 + \gamma\left(1 - 2\frac{A_L}{A_T}\right)\right], \qquad (5)$$

که در آن اندیسهای L و H به ترتیب متناظرند با پاره‌های شکافت سبک و سنگین، و Z_T به صورت زیر تعریف می‌شود:

Archive of SID

$$Z_T = \overline{Z}_L + \overline{Z}_H \qquad (۶)$$

پارامتر γ برای تمام واکنشهای شکافت تقریباً مقداری ثابت و برابر با ۰/۰۶۸۵ است. این مقدار برای کلیهٔ هسته‌های شکافنده در گسترهٔ Fm تا Ra، یعنی $۸۸ \leq Z \leq ۱۰۰$، فقط به اندازهٔ ۷٪ تغییر می‌کند. اختلاف $\overline{Z}_L$ با مقادیر تجربیِ متناظر ارائه شده در جدول ۱ کمتر از ۲٪ است. به علاوه می‌توان محتمل‌ترین بار الکتریکی برای پاره‌های شکافت سبک و سنگین را از روی روابط تجربی زیر محاسبه نمود [۱۶]:

$$\overline{Z}_L = ۵/۹۰ + ۰/۳۱ A_L + ۰/۰۲۱۴ A_L^۲ , \qquad (۷)$$

$$\overline{Z}_H = ۰/۴۱۹ A_H - ۰/۰۲۱۴ A_H^۲ . \qquad (۸)$$

به طوری که از شکل ۴ دیده می‌شود، با افزایش انرژی برانگیختگی هستهٔ شکافنده از ۵۰/۳ MeV به ۷۴/۳ MeV، مقدار FWHM از ۱/۶۷ به ۲/۳۵ افزایش می‌یابد. پهن‌تر شدن این توزیع در انرژیهای برانگیختگی بالاتر را می‌توان به افزایش تعداد نوترونهای گسیل شده در فرایند شکافت نسبت داد. زیرا تعداد نوترونهای پیش‌شکافت (Prescission) با افزایش انرژی برانگیختگی هستهٔ شکافنده به طور خطی زیاد می‌شود، در حالی‌که تعداد نوترونهای پس‌شکافت (Postscission) عملاً مستقل از انرژی برانگیختگی است [۴]. در نتیجه همان‌گونه که انتظار می‌رود با افزایش انرژی برانگیختگی هستهٔ شکافنده، توزیع بار الکتریکی محصولات شکافت با عدد جرمیِ یکسان پهنتر می‌شود.

در شکل ۵ می‌توان دید که Z برای ناحیهٔ پاره‌های شکافتِ سبکتر ($A < ۱۲۰$) در طرفی قرار می‌گیرد که فزونی پروتون دارد یعنی $\Delta Z = Z - Z_{UCD} > ۰$. از طرف دیگر، در ناحیهٔ پاره‌های شکافتِ سنگین‌تر ($A > ۱۲۰$) داریم $\Delta Z = Z - Z_{UCD} < ۰$، یعنی Z در طرفی قرار می‌گیرد که کاستی پروتون دارد. به عبارت دیگر در فرآیند شکافت، محصولات شکافتِ سبکتر، با چگالی بارِ بیشتر به وجود می‌آیند، در حالی که محصولات شکافتِ سنگین‌تر، با چگالی بارِ کمتر خلق می‌شوند. این بدان معناست که در فرآیند شکافت هسته‌ای، قطبش بار الکتریکی اتفاق می‌افتد. اگر توزیع بار در فرایند شکافت تغییر نمی‌کرد، کمیت Z برای محصولات شکافت با مقدار به دست آمده از مدل UCD یکسان می‌بود. این وضعیت در شکل ۵ با خط چین نمایش داده شده است. میانگین قطبش بار الکتریکی (ΔZ_{ave}) در این آزمایش برابر ۰/۰۹ ± ۰/۶۹ به دست آمد. این کمیت با مقدار متناظر با ۰/۶۶ حاصل از مدل پیشنهاد شده به وسیله نتایج سازگار است [۱۷]. تقسیم بار الکتریکی هسته‌های [illegible] بین محصولات شکافت بستگی به اثرات پوسته‌ای نیز دارد. این امر مربوط می‌شود به پاره‌های شکافتِ تغییر شکل یافته که دارای پوسته‌های نوترونیِ بسته هستند [۱۸].

مراجع

1. R Vandenbosch and J R Huizenga, *Nuclear Fission*, Academic Press, New York (1973).
2. A C Wahl, R L Ferguson, D R Nethaway, D E Troutter and K Wolfsberg, *Phys. Rev*. **126** (1962) 1112.
3. J A McHugh and M C Michel, *Phys. Rev*. **172** (1968) 1160.
4. H Umezawa, S Baba and H Baba, *Nucl. Phys*. A **160** (1971) 65.
5. H M Blann, *Phys. Rev*. **123** (1961) 1356.
6. G Friedlander, L Friedman, B Gordon and L Yaffe, *Phys. Rev*. **129** (1963) 1809.
7. H Naik, S P Dange and A V R Reddy, *Nucl. Phys*. A **781** (2007) 1.
8. A C Pappas, paper P/881, Proceedings of the *International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, Geneva (1955).
9. R D Present, *Phys. Rev*. 72 (1947) 7.
10. هوشیار نوشاد، *مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران*، ۷، شماره ۱، ۷ – ۱۳ (۱۳۸۶).
11. S Shirato, S Kubota, H Takahashi, T Doke, I Ogawa, M Tsukuda and E Tajima, *J. Phys. Soc. Jpn*. **19** (1964) 1809.
12. 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.
13. P P Jauho, A Jokinen, M Leino, J M Parmonen, H Penttilä, J Äystö, K Eskola and V A Rubchenya, *Phys. Rev*. C **49** (1994) 2036.

Archive of SID

www.SID.ir

14. A E S Green, *Revs. Modern Phys*. **30** (1958) 569.
15. J C D Milton, *Report UCRL-9883-Rev*. (1962).
16. C D Coryell, M Kaplan and R D Fink, *Can. J. Chem*. **39** (1961) 646.
17. D R Nethaway, *Report No. UCRL-51538*, Lawrence Livermore Lab. (1974).
18. B D Wilkins, E P Steinberg and R R Chasman, *Phys. Rev*. C 14 (1976) 1832.

Archive of SID

www.SID.ir