

اندازه‌گیری نسبت بهره ایزومری  $^{115m}\text{gCd}$  در واکنش  $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)$  با

## استفاده از فوتون‌های تابش ترمزی با بیشینه انرژی ۷۵-۴۰ MeV

منصوره تاتاری\*

دانشکده فیزیک، پردیس علوم، دانشگاه یزد، یزد، ایران

دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۸ ویرایش نهائی: ۱۳۹۵/۱۲/۱۲ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۰۴

## چکیده

نسبت بهره ایزومری  $^{115m}\text{gCd}$  با انجام واکنش در کادمیوم طبیعی با استفاده از فوتون‌های تابش ترمزی با بیشینه انرژی ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵، ۷۰ و ۷۵ MeV برای اولین بار اندازه‌گیری شده است. آزمایش‌ها با روش طیف‌سنجی غیر بر خط پرتو گاما<sup>۱</sup> با استفاده از شتاب‌دهنده خطی الکترون ۱۰۰ MeV در آزمایشگاه شتاب‌دهنده شهر پوهانگ (PAL) در کشور کره جنوبی انجام گردید. همچنین نسبت بهره ایزومری  $^{115m}\text{gCd}$  با استفاده از کد TALYS 1.6 محاسبه گردید. نتایج تجربی نسبت بهره ایزومری  $^{115m}\text{gCd}$  در واکنش  $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)$  حاصل از این آزمایش و آزمایش‌های دیگران، با مقادیر نظری حاصل از کد TALYS مقایسه شده و نتایج آزمایش توافق خوبی با نتایج حاصل از کد دارند. با افزایش انرژی بیشینه فوتون‌های تابش ترمزی، مقادیر نظری و تجربی نسبت بهره ایزومری  $^{115m}\text{gCd}$  افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده اثر انرژی برانگیختگی است. همچنین نسبت بهره ایزومری  $^{115m}\text{gCd}$  از انرژی آستانه واکنش تا انرژی ۱۸ MeV به سرعت افزایش می‌یابد و در انرژی‌های بالاتر روند افزایشی کندی دارد. این رفتار نشان‌دهنده نقش تشدید بزرگ دوقطبی به همراه اثر انرژی برانگیختگی است.

**کلیدواژگان:** نسبت بهره ایزومری، واکنش فوتوهسته‌ای  $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m}\text{gCd}$ ، روش طیف‌سنجی غیر بر خط پرتو گاما، کد 1.6 TALYS.

## مقدمه

تشکیل حالت شبه پایدار و حالت پایه ناپایدار هستند. به دلیل پیوستگی طیف انرژی باریکه تابش ترمزی می‌توان آن را به صورت نسبت تولید این دو حالت بیان کرد  $IR = \frac{Y_{high-spin}}{Y_{low-spin}}$  [۱]. نسبت بهره ایزومری<sup>۲</sup> در مطالعه اثر تکانه زاویه‌ای در واکنش‌های هسته‌ای، وابستگی اسپینی چگالی تراز هسته‌ای، آزمایش مدل‌های هسته‌ای دارای اهمیت است [۴-۲].

هسته‌هایی که دارای حالت ایزومری و حالت پایه ناپایدار هستند، برای مطالعه ساختار و خواص هسته مرکب و ساز و کار واکنش هسته‌ای استفاده می‌شوند. جمعیت نسبی این دو حالت را نسبت سطح مقطع ایزومری هسته‌ها می‌نامند و به صورت  $IR = \frac{\sigma_m}{\sigma_g}$  تعریف می‌شود که  $\sigma_m$  و  $\sigma_g$  به ترتیب سطح مقطع

\* نویسنده مسئول: mtatari@yazd.ac.ir

<sup>۱</sup> Off-line  $\gamma$ -ray spectrometric technique<sup>۲</sup> Isomeric cross section Ratio

مقطع ایزومری واکنش  $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m}\text{Cd}$  مورد توجه قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از فوتون‌های تابش ترمزی با انرژی‌های بیشینه ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵، ۷۰ و ۷۵ MeV در کشور کره جنوبی توسط نویسنده مقاله انجام شده است.

### کارهای آزمایشگاهی

الکترون‌هایی با انرژی ۷۵-۴۰ MeV که با استفاده از شتاب‌دهنده خطی الکترون پوهانگ تولید شده‌اند، بر یک قطعه تنگستن به ابعاد  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  و ضخامت  $0.1 \text{ mm}$  فرود می‌آیند و فوتون‌های تابش ترمزی تولید می‌شوند. تنگستن در فاصله  $18 \text{ cm}$  از پنجره خروجی و عمود بر جهت باریکه الکترون قرار دارد. نمونه‌های کادمیوم با فوتون‌های تابش ترمزی با انرژی بیشینه ۷۵-۴۰ MeV پرتودهی می‌شوند. نمونه‌ها در هوا و در فاصله  $12 \text{ cm}$  از ورقه تنگستن و عمود بر باریکه الکترون قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها شامل  $^{nat}\text{Cd}$  با خلوص ۹۹/۹۹٪ تولید شده از شرکت Alfa Aesar است و ضخامت نمونه‌ها  $0.5 \text{ mm}$  و ابعاد آنها  $\text{cm}^2$   $1 \times 1$  است. نمونه‌ها به مدت ۴۵ دقیقه پرتودهی می‌شوند. در طول پرتودهی نمونه‌ها، شتاب‌دهنده خطی الکترونی تپ‌هایی<sup>۳</sup> با فرکانس ۱۵ Hz و پهنای  $1.6 \mu\text{s}$  تولید می‌کند. پس از پرتودهی نمونه‌ها به‌طور جداگانه بر روی صفحات پرسپکس (شیشه اکریلی با ضخامت  $1.5 \text{ mm}$ ) قرار گرفته و آماده شمارش می‌شوند. فعالیت نمونه‌های فعال شده با استفاده از آشکارساز محوری ژرمانیوم با خلوص بالا ساخت شرکت ORTEC در آزمایشگاه شتاب‌دهنده خطی پوهانگ اندازه‌گیری شده است. قطر و طول بلور آن به ترتیب برابر با  $60.5 \text{ mm}$  و  $31 \text{ mm}$  و از نوع p می‌باشد.

اندازه‌گیری نسبت بهره ایزومری با استفاده از فوتون دارای مزایایی در مطالعه ساختار هسته‌ای و ساز و کار واکنش‌های هسته‌ای است، زیرا فوتون‌ها نمی‌توانند تکانه زاویه‌ای بزرگی را به هسته مرکب بدهند. خصوصیات واکنش‌های هسته‌ای در ناحیه انرژی شدید بزرگ دوقطبی ( $GDR^1$ ) و در ناحیه انرژی‌های بیشتر از انرژی آستانه فوتوپایون، به‌خوبی مورد مطالعه قرار گرفته است. در نواحی انرژی متوسط MeV ۱۵۰-۳۰ از لحاظ نظری و تجربی زیاد مورد مطالعه قرار نگرفته است. دلیل این امر وجود مشکلاتی در انجام آزمایش و به‌طور عمده کمبود چشمه فوتونی با شدت زیاد است [۵]. چون سطح مقطع برهم‌کنش الکترومغناطیسی کوچک است، روش فعال‌سازی با استفاده از فوتون‌های تابش ترمزی تولید شده از شتاب‌دهنده الکترون دارای مزایایی است، زیرا فوتون‌های تابش ترمزی، چشمه فوتونی شدیدی هستند که سطح مقطع انتگرال‌گیری شده آن بزرگ‌تر از سطح مقطع فوتون‌های تک انرژی است. بنابراین می‌توان نتایج دقیق‌تری را به‌دست آورد [۶]. با استفاده از نسبت سطح مقطع‌های حالات شبه‌پایدار (حالات ایزومری) می‌توان پارامتر قطع اسپین<sup>۲</sup> را به‌دست آورد که ممان اینرسی هسته با استفاده از این پارامتر به‌دست می‌آید. همچنین این پارامتر نشان‌دهنده وابستگی چگالی تراز هسته‌ای به تکانه زاویه‌ای است. بنابراین در فهم نظری واکنش‌های هسته‌ای و ساختار هسته‌ای اهمیت دارد [۷-۹]. با توجه به اهمیت اندازه‌گیری سطح مقطع واکنش‌های فوتوهسته‌ای و امکانات موجود، کادمیوم طبیعی برای انجام آزمایش انتخاب شد. دلیل انتخاب کادمیوم کاربرد آن در میله‌های کنترل در ساختار راکتورها است. بنابراین اندازه‌گیری سطح

<sup>3</sup> Pulse

<sup>1</sup> Giant Dipole Resonance

<sup>2</sup> Spin cut-off parameter

حالت پایه ناپایدار به دو طریق تولید می‌شود: به‌طور مستقیم از هسته هدف و به‌طور غیرمستقیم از طریق واپاشی هسته رادیواکتیو حالت شبه‌پایدار. تولید یک جفت ایزومری و واپاشی آن در طول زمان تابش، با معادلات زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{dN_m}{dt} = Y_m - \lambda_m N_m \quad ۲$$

$$\frac{dN_g}{dt} = Y_g - \lambda_g N_g + P\lambda_m N_m \quad ۳$$

که  $N_i$  ( $i=m, g$ ) تعداد هسته‌ها برای این دو حالت،  $\lambda_m$  و  $\lambda_g$  ثابت‌های واپاشی این حالات و  $P$  نسبت شاخه‌ای برای واپاشی حالت شبه‌پایدار  $m$  به حالت پایه ناپایدار  $g$  است. با حل این معادلات در ۳ بازه زمانی تابش، انتظار و شمارش، می‌توان با استفاده از فعالیت گامای اندازه‌گیری شده، نسبت بهره ایزومری را با استفاده از رابطه ۴ محاسبه کرد که  $S_m$  و  $S_g$  مساحت زیر قله‌های اصلی برای پرتوهای گامای آشکار شده از حالت‌های  $m$  و  $g$  هستند،  $\epsilon_i$  بازه آشکارسازی برای پرتو گامای مورد نظر،  $I_\gamma$  شدت پرتو گاما،  $t_i$  زمان تابش،  $t_w$  زمان انتظار (یعنی زمان بین پایان پرتو دهی و شروع شمارش)،  $t_c$  زمان شمارش یا اندازه‌گیری است [۱۳-۱۱].

### کد تالیس

کد کامپیوتری تالیس، برای پیش‌بینی و تحلیل واکنش‌های هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ورودی این کد، پرتابهایی مانند نوترون، پرتو گاما، پروتون، دوترون، تریتون و ذرات آلفا برای راه‌اندازی

قدرت تفکیک سیستم آشکارسازی دارای پهنایی در نصف بیشینه (FWHM) برابر با  $1/8$  keV در قله  $1332.5$  keV از  $^{60}\text{Co}$  است. از چشمه استاندارد  $^{152}\text{Eu}$  برای مدرج کردن انرژی و بازده آشکارسازی استفاده می‌شود که دارای پرتوهای گاما در گستره انرژی  $140.8-121.8$  keV است. بازده آشکارسازی در قله  $1332.5$  keV برابر با ۲۰٪ و بازده آشکارسازی NaI(Tl) با طول  $7.62$  cm و قطر  $7.62$  cm است. در طول شمارش، زمان مرده سیستم آشکارسازی کمتر از ۱۰٪ است. مساحت قله اصلی<sup>۲</sup> با استفاده از برنامه کامپیوتری Gamma Vision تولید شرکت ORTEC تعیین می‌شود.

### محاسبه نسبت بهره ایزومری

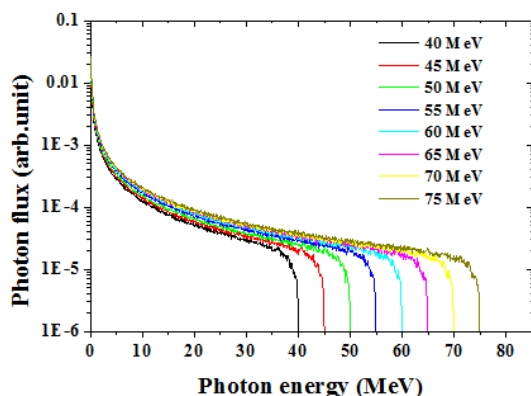
سطح مقطع تشکیل یک حالت ایزومری نسبت به حالت ایزومری پایه ناپایدار، نسبت سطح مقطع ایزومری نامیده می‌شود. در مورد تابش ترمزی، به‌دلیل پیوستگی طیف انرژی، به‌جای نسبت سطح مقطع ایزومری، نسبت بهره ایزومری محاسبه می‌شود که به‌صورت نسبت بهره تشکیل این دو حالت ایزومری تعریف می‌شود. تولید حالات ایزومری به‌صورت

$$Y_i = N_0 \int_{E_{th}}^{E_{\gamma max}} \sigma_i(E) \phi(E) dE \quad ۱$$

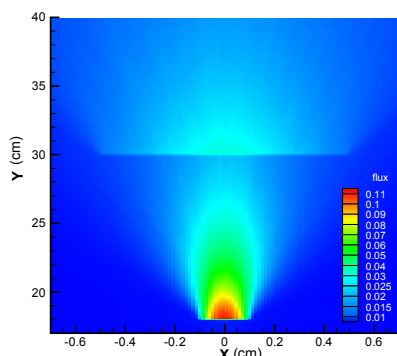
قابل محاسبه بوده [۱۰] که  $i$  نشان‌دهنده حالت شبه‌پایدار ( $m$ ) یا حالت پایه ناپایدار ( $g$ ) یک جفت ایزومری،  $N_0$  تعداد هسته‌های هدف،  $\sigma_i(E)$  سطح مقطع واکنش و  $\phi(E)$  شار تابش ترمزی است.  $E_{\gamma max}$  و  $E_{th}$  به‌ترتیب بیشینه انرژی فوتون‌های تابش ترمزی و انرژی آستانه واکنش هستند. هسته رادیواکتیو در

<sup>2</sup> Photopeak

<sup>1</sup> Calibration



شکل ۱. طیف تابش ترمزی ایجاد شده از الکترون‌های با انرژی ۷۵-۴۰ MeV.



شکل ۲. توزیع فضایی شار فوتون‌های تولید شده در گستره مکانی آزمایش.

در شکل ۲، شار فوتون‌های حاصل از برهم‌کنش الکترون‌ها با تنگستن که با استفاده از کارت مش‌تالی به‌دست آمده است، نشان داده شده است. به‌وضوح مشاهده می‌شود که فوتون‌های تابش ترمزی در محل قرارگیری تنگستن تولید شده‌اند. هم‌چنین تجمع توزیع درون هدف کادمیوم ( $Y=30\text{ cm}$ ) قابل مشاهده است. نمونه‌های کادمیوم با خلوص بالا و ترکیب ایزوتوپی طبیعی ( $^{116}\text{Cd}:7,49\%$ ،  $^{114}\text{Cd}:28,73\%$ ،

واکنش، قابل تعریف هستند. در خروجی این کد، سطح مقطع‌های مسیرهای مختلف واکنش، سطح مقطع تولید حالات ایزومری و پایه، توزیع زاویه‌ای محصولات واکنش و غیره قابل محاسبه هستند [۱۴]:

$$IR =$$

$$\left[ \frac{S_g \varepsilon_m I_m}{S_m \varepsilon_g I_g} \times \Lambda_3 \Lambda_6 \Lambda_9 - \Lambda_1 \Lambda_5 \Lambda_8 - \Lambda_3 \Lambda_5 \Lambda_8 - \Lambda_3 \Lambda_6 \Lambda_7 \right]^{-1} \xi$$

$$\Lambda_1 = \frac{P}{\lambda_g} \left[ (1 - e^{-\lambda_g t_i}) - \frac{\lambda_g}{\lambda_m - \lambda_g} (e^{-\lambda_g t_i} - e^{-\lambda_m t_i}) \right] \quad 5$$

$$\Lambda_2 = \frac{1}{\lambda_g} (1 - e^{-\lambda_g t_i}) \quad , \quad \Lambda_3 = \frac{1}{\lambda_m} (1 - e^{-\lambda_m t_i}) \quad 6$$

$$\Lambda_4 = \frac{P \lambda_m}{\lambda_m - \lambda_g} (e^{-\lambda_g t_w} - e^{-\lambda_m t_w}) \quad , \quad \Lambda_5 = e^{-\lambda_g t_w} \quad , \quad \Lambda_6 = e^{-\lambda_m t_w} \quad 7$$

$$\Lambda_7 = P \left[ 1 - \frac{\lambda_m \lambda_g}{\lambda_m - \lambda_g} \left( \frac{e^{-\lambda_g t_c}}{\lambda_g} - \frac{e^{-\lambda_m t_c}}{\lambda_m} \right) \right] \quad 8$$

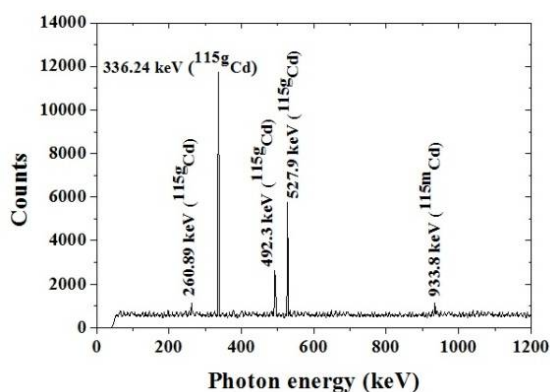
$$\Lambda_8 = (1 - e^{-\lambda_g t_c}) \quad , \quad \Lambda_9 = (1 - e^{-\lambda_m t_c}) \quad 9$$

## بحث و نتیجه‌گیری

طیف انرژی فوتون‌های تابش ترمزی با پیشینه انرژی ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵، ۷۰ و ۷۵ MeV که با استفاده از شبیه‌سازی با کد MCNPX به‌دست آمده، در شکل ۱ نشان داده شده است.

به‌حالت برانگیخته  $^{115}\text{In}$  با اسپین-پاریته  $1/2^+$  و انرژی  $864/13 \text{ keV}$  واپاشی می‌کند که این حالت نیز با گسیل پرتو گاما با انرژی  $527/90 \text{ keV}$  به  $^{115}\text{In}$  با اسپین-پاریته  $1/2^-$  واپاشی می‌کند.

هسته‌های رادیواکتیو  $^{115\text{m}}\text{Cd}$  از طریق واکنش‌های  $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115\text{m}}\text{Cd}$  تولید می‌شوند. نسبت بهره ایزومری واکنش  $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115\text{m}}\text{Cd}$  با اندازه‌گیری فعالیت حالت ایزومری  $^{115\text{m}}\text{Cd}$  (با اسپین-پاریته  $1/2^-$ ) با نیمه‌عمر  $44/6$  روز و حالت ناپایدار پایه  $^{115}\text{Cd}$  (با اسپین-پاریته  $1/2^+$ ) با نیمه‌عمر  $53/46$  ساعت تعیین می‌شود. قله‌های اصلی  $527/90 \text{ keV}$  و  $933/80 \text{ keV}$  به ترتیب برای محاسبه فعالیت  $^{115\text{g}}\text{Cd}$  و  $^{115\text{m}}\text{Cd}$  استفاده می‌شوند. نمونه‌ای از طیف به‌دست آمده از کادمیوم فعال شده با فوتون‌های تابش ترمزی با بیشینه انرژی  $65 \text{ MeV}$  در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. طیف پرتو گامای یک نمونه کادمیوم پرتودهی شده با فوتون‌های تابش ترمزی با بیشینه انرژی  $65 \text{ MeV}$ .

سطح مقطع تشکیل هسته‌های  $^{115\text{m}}\text{Cd}$  در واکنش  $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)$  که با استفاده از کد تالیس محاسبه شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

$^{111}\text{Cd}$ :  $12/80\%$ ،  $^{112}\text{Cd}$ :  $24/13\%$ ،  $^{113}\text{Cd}$ :  $12/22\%$ ،  $^{110}\text{Cd}$ :  $12/49\%$ ،  $^{108}\text{Cd}$ :  $0/89\%$  و  $^{106}\text{Cd}$ :  $1/25\%$  برای به‌دست آوردن نسبت بهره ایزومری واکنش‌های  $^{115\text{m}}\text{Cd}(\gamma, n)^{115\text{g}}\text{Cd}$  پرتودهی می‌شوند. داده‌های معلوم واپاشی  $^{115\text{m}}\text{Cd}$  از جدول ایزوتوپ‌ها مورد استفاده قرار گرفته و در جدول ۱ نشان داده شده اند [۱۶ و ۱۵].

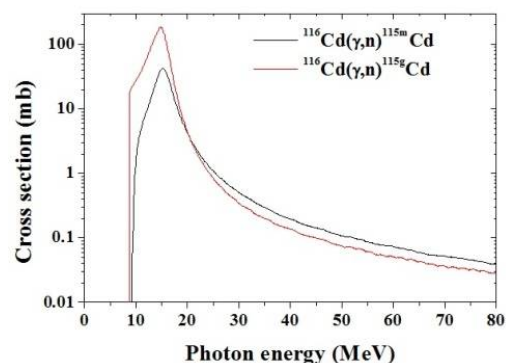
جدول ۱. داده‌های مربوط به واکنش‌های هسته‌ای و واپاشی جفت ایزومری  $^{115\text{m}}\text{Cd}$  [۱۶ و ۱۵].

انرژی پرتو گاما (keV)	اسپین-پاریته	نیمه‌عمر	انرژی هسته‌ای (MeV)	واکنش
158,03 484,47 933,80 1290,58	$1/2^-$	44,6 روز	8,81	$^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115\text{m}}\text{Cd}$
260,89 336,24 492,30 527,90	$1/2^+$	53,46 ساعت	8,70	$^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115\text{g}}\text{Cd}$

حالت ایزومری  $^{115\text{m}}\text{Cd}$  با اسپین-پاریته  $1/2^-$  و نیمه‌عمر  $44/6$  روز با واپاشی  $\beta^-$  به حالت پایه  $^{115}\text{In}$  با اسپین-پاریته  $9/2^+$  واپاشی می‌کند. همچنین با نسبت شاخه‌ای  $1/7\%$  به حالت برانگیخته  $^{115}\text{In}$  واپاشی می‌کند که این حالت ناپایدار بوده و با گسیل پرتو گاما با انرژی  $933/80 \text{ keV}$  به حالت پایه  $^{115}\text{In}$  واپاشی می‌کند. حالت پایه ناپایدار  $^{115\text{g}}\text{Cd}$  با اسپین-پاریته  $1/2^+$  از طریق گذار M4 و با گسیل پرتو گاما با انرژی  $336/24 \text{ keV}$  به حالت پایه  $^{115}\text{In}$  واپاشی می‌کند. همچنین با نسبت شاخه‌ای  $33/1\%$  با واپاشی  $\beta^-$

تعیین نسبت بهره ایزومری بر اساس اندازه‌گیری فعالیت حالت اسپین بالا به‌حالت اسپین پایین است و با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شده است. نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است.

نسبت بهره ایزومری  $^{115m}\text{gCd}$  در سایر انرژی‌ها که از منابع گرفته شده نیز برای مقایسه در این جدول آورده شده است [۱۷-۲۰]. نتایج به‌دست آمده در این آزمایش به‌همراه نتایج آزمایش‌های دیگران در شکل ۵ نشان داده شده است. از این شکل دیده می‌شود که با افزایش انرژی فوتون‌های تابش ترمزی، نسبت بهره ایزومری هسته‌های رادیواکتیو  $^{115m}\text{gCd}$  افزایش می‌یابد که این نشان‌دهنده اثر انرژی برانگیختگی در واکنش‌های  $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m}\text{gCd}$  است. در انرژی‌های بالاتر از ناحیه GDR، ذرات گسیل شده از واکنش‌ها، انرژی و تکانه زاویه‌ای زیادی را حمل می‌کنند و بنابراین نسبت بهره ایزومری به آرامی افزایش می‌یابد. در یک واکنش، سطح مقطع از انرژی آستانه واکنش تا مقدار انرژی خاصی به‌سرعت افزایش پیدا می‌کند. در انرژی‌های بالاتر سطح مقطع تقریباً ثابت است، زیرا سطح مقطع مسیره‌های واکنش‌های دیگر شروع به افزایش می‌کنند. پس از آن، کاهش در سطح مقطع دیده می‌شود، زیرا سطح مقطع کانال‌های واکنش‌های دیگر به مقدار ثابتی می‌رسند. این افزایش سریع از انرژی آستانه تا حدود ۱۷-۲۲ MeV (که ناحیه تشدید بزرگ دوقطبی (GDR) است) به‌دلیل انرژی برانگیختگی است. بنابراین نسبت بهره ایزومری نیز از چنین رفتاری برخوردار است.



شکل ۴. سطح مقطع تولید هسته‌های  $^{115m}\text{gCd}$  در واکنش  $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)$ .

جدول ۲. نسبت بهره ایزومری  $^{115m}\text{gCd}$  در واکنش  $^{116}\text{Cd}(\gamma, n)$ .

واکنش هسته‌ای	انرژی بیشینه فوتون‌ها (MeV)	نسبت بهره ایزومری	
		تجربی (حاصل از این پژوهش و آزمایش‌های دیگران)	نظری (محاسبه شده در این پژوهش)
$^{116}\text{Cd}(\gamma, n)^{115m}\text{gCd}$	۹٫۴۳	$۰٫۱۸۰ \pm ۰٫۰۲۰ [۱۷]$	۰٫۰۱۵۰
	۲۰	$۰٫۱۱۷ \pm ۰٫۰۱۲ [۱۹]$	۰٫۲۱۸۵
	۲۰	$۰٫۱۴۸ \pm ۰٫۰۲۰ [۱۸]$	---
	۲۲	$۰٫۱۲۰ \pm ۰٫۰۲۰ [۲۰]$	۰٫۲۲۱۵
	۲۳٫۵	$۰٫۱۵۸ \pm ۰٫۰۱۶ [۱۹]$	۰٫۲۲۴۶
	۳۰	---	۰٫۲۲۷۰
	۴۰	$۰٫۱۹۰ \pm ۰٫۰۱۸$	۰٫۲۲۸۳
	۴۵	$۰٫۱۹۵ \pm ۰٫۰۱۸$	۰٫۲۲۸۵
	۵۰	$۰٫۱۸۶ \pm ۰٫۰۲۰ [۲۱]$	۰٫۲۲۸۷
	۵۰	$۰٫۲۰۱ \pm ۰٫۰۱۹$	---
	۵۵	$۰٫۲۰۷ \pm ۰٫۰۱۹$	۰٫۲۲۸۸
	۶۰	$۰٫۲۰۲ \pm ۰٫۰۲۰ [۲۱]$	۰٫۲۲۸۹
	۶۰	$۰٫۲۱۲ \pm ۰٫۰۱۹$	---
	۶۵	$۰٫۲۱۹ \pm ۰٫۰۱۹$	۰٫۲۲۸۹
	۷۰	$۰٫۲۰۹ \pm ۰٫۰۱۹ [۲۱]$	۰٫۲۲۹۰
۷۰	$۰٫۲۲۵ \pm ۰٫۰۱۹$	---	
۷۵	$۰٫۲۲۸ \pm ۰٫۰۱۸$	۰٫۲۲۹۰	

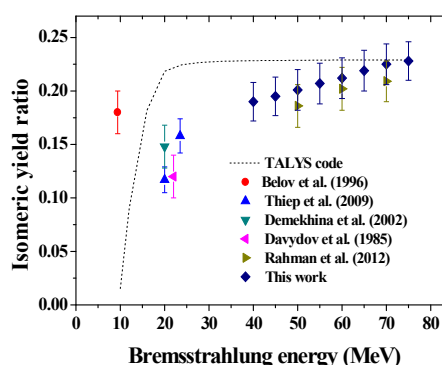
$^{116}\text{Cd}(\gamma n)^{115\text{m}}\text{Cd}$  اندازه‌گیری شده است. نتایج به‌دست آمده از این آزمایش‌ها و نتایج تحقیقات دیگران نشان می‌دهند که نسبت بهره ایزومری به انرژی فوتون‌های تابش ترمزی وابسته است. برای هسته رادیواکتیو  $^{115\text{m}}\text{Cd}$  از انرژی آستانه تا انرژی ۱۸ MeV افزایش سریع در نسبت بهره ایزومری مشاهده می‌شود و با افزایش انرژی بیشینه فوتون‌های تابش ترمزی، نسبت بهره ایزومری به آرامی افزایش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده تأثیر انرژی برانگیختگی است.

### سپاس‌گزاری

نویسنده از مساعدت‌های بی‌دریغ پروفسور گویی‌نیون کیم استاد دانشگاه ملی کیانگ‌پوک و دکتر هالادهارا نایک عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات انرژی اتمی هند به خاطر راهنمایی‌ها و همکاری‌های صمیمانه‌شان در فراهم آوردن شرایط مناسب برای سفر به کشور کره جنوبی و انجام آزمایش کمال تشکر را دارد.

### مرجع‌ها

- [1] I.B. Haller, G. Rudstam, Relative yields of the isomeric pairs  $^{69\text{g}}\text{Zn}$ - $^{69\text{m}}\text{Zn}$  and  $^{52\text{g}}\text{Mn}$ - $^{52\text{m}}\text{Mn}$  in some spallation reactions induced by 20-153 MeV protons, *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry* **19** (1961) 1-8.
- [2] J.R. Huizenga, R. Vandenbosch, Interpretation of isomeric cross-section ratios for (n, $\gamma$ ) and ( $\gamma$ ,n) reactions, *Physical Review* **120** (1960) 1305-1312.
- [3] C.T. Bishop, J.R. Huizenga, J.P. Hummel, Isomer ratios from ( $\alpha$ , xn) reactions on silver, *Physical Review* **135** (1964) B401-B411.



شکل ۵. وابستگی نسبت بهره ایزومری به انرژی فوتون‌های تابش ترمزی فرودی برای تولید جفت‌های ایزومری  $^{115\text{m}}\text{Cd}$ .

### نتیجه‌گیری

در این آزمایش، نسبت سطح مقطع ایزومری در کادمیوم طبیعی برای اولین بار با استفاده از فوتون‌های تابش ترمزی با بیشینه انرژی ۴۰، ۴۵، ۵۰، ۵۵، ۶۰، ۶۵ و ۷۰ MeV اندازه‌گیری شده است. این آزمایش‌ها با استفاده از شتابدهنده خطی الکترون در آزمایشگاه شتابدهنده شهر پوهانگ (PAL) و با روش فعال‌سازی و روش طیف‌سنجی غیر بر خط پرتو گاما انجام شده است. فوتون‌های تابش ترمزی با بیشینه انرژی ۴۰-۷۵ MeV از پرتو دهی یک قطعه تنگستن به ضخامت ۰/۱ mm با الکترون‌ها تولید می‌شوند. فوتون‌ها به نمونه مورد نظر برخورد می‌کنند و واکنش فوتو هسته‌ای انجام می‌شود. در آزمایش‌های انجام شده بر روی کادمیوم طبیعی، ایزومرهای  $^{115\text{m}}\text{Cd}$  تشکیل می‌شوند. نسبت سطح مقطع تشکیل حالت ایزومری با اسپین بالا به حالت با اسپین پایین را نسبت سطح مقطع ایزومری و در حالتی که از فوتون‌های تابش ترمزی استفاده می‌شود، نسبت بهره ایزومری می‌گویند. در این مقاله نسبت بهره ایزومری در واکنش

- measured by the activation technique, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **356** (1995) 390-396.
- [12] T.D. Thiep, T.T. An, N.T. Khai, P.V. Cuong, N.T. Vinh, A.G. Belov, O.D. Maslov, Study of the isomeric ratios in photonuclear reactions of natural Selenium induced by bremsstrahlungs with end-point energies in the giant dipole resonance region, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* **292** (2012) 1035-1042.
- [13] R. Vanska, R. Rieppo, The experimental isomeric cross-section ratio in the nuclear activation technique, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **179** (1981) 525-532.
- [14] A.J. Koning, S. Hilaire, S. Goriely, *TALYS 1.6*, A nuclear reaction program, User manual, 2013, <<http://www.talys.eu/download-talys/>>.
- [15] R.B. Firestone, C.M. Baglin, F.S.Y. Chu, *Table of isotopes*, 8<sup>th</sup> Edition, Update on CD-ROM, John Wiley, New York, (1998).
- [16] CDFE, On-line nuclear reaction threshold and energy values calculator, <<http://cdfe.sinp.msu.ru/>>
- [17] A.G. Belov, Yu.P. Gangrsky, A.P. Tonchev, N.P. Balabanov, Excitation of Isomeric States 1h-11/2 in (g,n) reactions, *Physics of Atomic Nuclei* **59** (1996) 553-560.
- [18] N.A. Demekhina, A.S. Danagulyan, G.S. Karapetyan, Isomeric ratio analysis in (gamma,n) and (gamma,p) reactions at giant resonance energy range, *Physics of Atomic Nuclei* **65** (2002) 390-395.
- [19] T.D. Thiep, T.T. An, N.T. Khai, N.T. Vinh, P.V. Cuong, A.G. Belov, O.D. Maslov, The isomeric ratios in some photonuclear reactions (gamma,n), (gamma,p), (gamma,2n), and (gamma,np) induced by bremsstrahlung with end-point energies in the giant dipole resonance region, *Physics of*
- [4] R. Vandenbosch, L. Haskin, J.C. Norman, Isomer ratios for  $\text{Y}^{87,87m}$  and the spin dependence of the nuclear level density, *Physical Review* **137** (1965) B1134-B1144.
- [5] M. Tatari, G.N. Kim, H. Naik, K.S. Kim, S.C. Yang, M. Zaman, S.G. Shin, Y-U. Kye, M-H. Cho, Measurement of Isomeric yield ratios of  $^{86m}\text{gY}$ ,  $^{87m}\text{gY}$  and  $^{89m}\text{gZr}$  in the photonuclear reactions of  $^{89}\text{Y}$  and  $^{\text{nat}}\text{Zr}$  at the end-point bremsstrahlung energies of 45 and 55 MeV, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **344** (2015) 76–82.
- [6] H. Naik, S. Singh, A. Goswami, V.K. Manchanda, G.N. Kim, K.S. Kim, M. W. Lee, Md. S. Rahman, D. Raj, S. Ganesan, S.V. Suryanarayana, M.H. Cho, W. Namkung, Measurement of photo-neutron cross-sections in  $^{208}\text{Pb}$  and  $^{209}\text{Bi}$  with 50–70 MeV bremsstrahlung, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **269** (2011) 1417-1424.
- [7] W.B. Walters, J.P. Hummel, Studies of isomeric yield ratios in the production of  $\text{Sc}^{44}$ ,  $\text{Mn}^{52}$ , and  $\text{Y}^{87}$  by photonuclear reactions, *Physical Review* **150** (1966) 867-876.
- [8] M. Gholami, M. Kildir, A.N. Behkami, Microscopic study of spin cut-off factors of nuclear level densities, *Physical Review C* **75** (2007) 044308-044314.
- [9] J.C. Krupa, Isomeric ratios for  $^{134m}\text{gCs}$  and  $^{135m}\text{gCs}$  produced by (p,3pxn) reactions on  $^{139}\text{La}$  from 40 to 150 MeV, *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry* **38** (1976) 965-968.
- [10] D. Kolev, Studies of some isomeric yield ratios produced with bremsstrahlung, *Applied Radiation and Isotopes* **49** (1998) 989-995.
- [11] D. Kolev, E. Dobрева, N. Nenov, V. Todorov, A convenient method for experimental determination of yields and isomeric ratios in photonuclear reactions



[21] Md. S. Rahman, M. Lee, K-S. Kim, G.N. Kim, E. Kim, M-H. Cho, V. Shvetshov, P.D. Khue, N. Van Do, Measurement of Isomeric-yield ratios of  $^{109m}\text{gPd}$  and  $^{115m}\text{gCd}$  with 50-, 60-, and 70-MeV bremsstrahlung, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* **276** (2012) 44–50.

*Particles and Nuclei Letters* **6** (2009) 126-133.

[20] M.G. Davydov, V.G. Magera, A.V. Trukhov, E. M. Shomurodov, Isomeric ratios of the photonuclear reactions yields for gamma-activation analysis, *Soviet Atomic Energy* **58** (1985) 56-59.

# Measurement of isomeric yield ratio of $^{115m,g}\text{Cd}$ in the $^{116}\text{Cd}(\gamma,n)$ reaction at the end-point bremsstrahlung energies of 40-75 MeV

Mansoureh Tatari\*

Department of Physics, Faculty of Science, Yazd University, Yazd, Iran

Received: 08.08.2016    Final revised: 02.03.2017    Accepted: 24.04.2017

## Abstract

The Isomeric Yield Ratio (IYR) of  $^{115m,g}\text{Cd}$  in the 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70 and 75 MeV bremsstrahlung induced reaction of  $^{nat}\text{Cd}$  has been determined for the first time by off-line gamma ray spectrometric technique using 100 MeV electron linac at Pohang Accelerator Laboratory (PAL), Pohang, Korea. The IYR of  $^{115m,g}\text{Cd}$  as a function of bremsstrahlung energy was also calculated theoretically using computer code TALYS 1.6. The experimental IYR in the  $^{116}\text{Cd}(\gamma,n)^{115m,g}\text{Cd}$  reaction obtained in the present work along with literature data at lower energies are compared with the theoretical value from TALYS and found to be in general agreement. It was observed that the experimental and theoretical IYR of  $^{115m,g}\text{Cd}$  increases with the increase of end-point bremsstrahlung energy, which shows the effect of excitation energy. It was also seen that the IYR of  $^{115m,g}\text{Cd}$  increases sharply from the reaction threshold value to end-point bremsstrahlung energy of 18 MeV and thereafter increase slowly. This indicates the role of Giant Dipole Resonance (GDR) besides the effect of excitation energy.

**Key words:** Isomeric Yield Ratio (IYR),  $^{116}\text{Cd}(\gamma,n)^{115m,g}\text{Cd}$  photo-nuclear reaction, off-line  $\gamma$ -ray spectrometric technique, TALYS 1.6

---

\*Corresponding Author: mtatari@yazd.ac.ir