

واکنش تبدیل ^{93}Zr و ^{96}Zr به ایزوتوپ‌های دیگر با استفاده از پرتوهای گاما

سمیه زارع^{*۱}

پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران ایران

چکیده:

در این مقاله واکنش تبدیل دو ایزوتوپ زیرکونیوم، ^{93}Zr و ^{96}Zr ، توسط پرتوهای گامای حاصل از تابش ترمزی و پراکندگی معکوس کامپتون به صورت عددی محاسبه خواهد شد. در مکانیزم تابش ترمزی به منظور تولید پرتوی گاما، یک باریکه لیزر با شدت زیاد به هدف تانتولوم با ضخامت $1/88 \text{ mm}$ تابش می‌شود و بلافاصله بعد از آن، زیرکونیوم قرار داده شده است. مشاهده می‌شود که تعداد واکنش‌ها به شدت لیزر بستگی دارد، بعلاوه شدت بهینه‌ای برای لیزر با هدف داشتن بیشترین تعداد واکنش تبدیل، تعریف خواهد شد. همچنین اکتیوتیبه به صورت تابعی از دمای مشخصه فوتون‌های گاما بررسی می‌شود. در ادامه بر اساس داده‌های گزارش شده مربوط به باریکه الکترونی SLEGS، تولید فوتون‌های گاما توسط پراکندگی معکوس کامپتون با استفاده از لیزر CO_2 با توان 100 W مطالعه می‌شود. از مقایسه تعداد واکنش‌ها در دو روش، مشاهده می‌شود که تعداد واکنش‌ها در تابش معکوس کامپتون $5/5$ برابر تعداد واکنش‌های حاصل از یک ساعت تاباندن لیزر به هدف تانتولوم است.

کلیدواژه‌ها: زیرکونیوم، پرتوی گاما، تابش ترمزی، پراکندگی معکوس کامپتون

Transmutation of ^{93}Zr and ^{96}Zr by gamma-ray into other isotopes

Somaye Zare*

Photonics and Quantum Technology Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.BOX:836-14395, Tehran, Iran.

Abstract:

In this Article, transmutation of ^{93}Zr and ^{96}Zr by gamma-ray produced by bremsstrahlung and Compton scattering is analytically calculated. For producing gamma photons in the bremsstrahlung method, a high-intensity laser beam is focused onto a 1.88 mm tantalum target, and a Zirconium target placed directly behind it. It is found that the laser intensity has robust effects on the number of reactions, as an optimal laser intensity is estimated to produce the maximum number of reactions. Also, the dependency of activity on the characteristic temperature of the gamma photons is studied. Furthermore, based on the reported data of SLEGS, generation of the gamma photons by the inverse Compton scatterings of a 100W, CO_2 laser is investigated. It is seen that the number of reactions in the Compton backscattering method is about 5.5 orders of magnitude greater than the one in the bremsstrahlung method. For producing gamma-ray of the bremsstrahlung method, a laser with the optimal intensity and the repetition rate of 10 Hz is radiated to the target for an hour.

Keywords: Zirconium, Gamma Ray, Bremsstrahlung Radiation, Compton Backscattering

¹ Email: sozare@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

با رشد روز افزون لیزرهای پرتوان با نرخ تکرار زیاد توسط روش‌های CPA و OPCPA، دریچه جدیدی در زمینه تولید الکترون‌های نسبیتی و واکنش‌های هسته‌ای گشوده شد. زباله‌های هسته‌ای اغلب عناصر پرتوزا با نیم‌عمر طولانی هستند که با تابش‌های الفا، بتا و گاما واپاشی می‌کنند. یکی از روش‌های دفع این زباله‌ها، مدفون کردن آن‌ها در استخرهای آب با حفاظ بتنی است. اما با روی کار آمدن لیزرهای پرشدت، روش‌های جدیدی برای تبدیل زباله‌های هسته‌ای پرتوزا به ایزوتوپ‌های پایدار پیشنهاد شد. یکی از روش‌های تبدیل این زباله‌ها به رادیوایزوتوپ‌های پایدار یا ایزوتوپ‌های ناپایدار با طول عمر کوتاه، تاباندن پرتوی گاما به زباله است. دو روش تولید پرتوی گامای لازم جهت این واکنش‌ها، تابش ترمزی و پراکندگی معکوس کامپتون هستند. در پراکندگی معکوس کامپتون، الکترون‌های پرنرژی توسط فوتون‌های لیزر پراکنده می‌شوند و تابش گاما تولید می‌کنند. مزیت تابش گامای حاصل از این روش، انرژی قابل تنظیم آن است. HIγS، ERL-LCS و MEGa-ray، ELI-NP، NewSUBARU جز سیستم‌های در دسترس جهت انجام واکنش‌های هسته‌ای هستند، برای مثال در NewSUBARU اندازه‌گیری سطح مقطع واکنش ^{129}I انجام شده است [۱-۳]. اولین آزمایش‌ها نیز در سال ۱۹۷۸ انجام شد که تابش‌های گاما حاصل برهمکنش لیزر با الکترون‌های $1/5 \text{ GeV}$ در سنکروترون Adone بود [۴]. در مکانیزم تابش ترمزی، با برخورد پالس لیزر پرشدت با هدف، الکترون‌های نسبیتی تولید خواهند شد و این الکترون‌ها با نفوذ در هدف طی مکانیزم تابش ترمزی، پرتوهای گاما تولید خواهند کرد. این پرتوها با برخورد به هدف دوم که زباله هسته‌ای است، واکنش تبدیل را انجام می‌دهند.

زیرکونیوم طبیعی دارای پنج ایزوتوپ ($A=90, 91, 92, 94, 96$) است. ^{90}Zr به سبب سختی و مقاومت در برابر حرارت و پوسیدگی و همچنین میل ترکیبی کم با نوترون، به عنوان غلاف و پوشش سوخت هسته‌ای در راکتورها مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوترون‌های حاصل از شکاف هسته‌ای در راکتور باعث رادیواکتیو شدن زیرکونیوم و تبدیل آن به ^{93}Zr می‌شوند. این زباله با نیمه عمر $1/53$ میلیون سال، با گسیل تابش‌های گامای کم انرژی به ^{93}Nb با نیمه عمر ۱۴ سال تبدیل خواهد شد. ^{93}Zr با نفوذ به آب‌های زیرزمینی یا پراکندگی در هوا باعث ایجاد آلودگی می‌شود، آنچنانکه با ورود به بدن انسان و تابش بتا، خطر ابتلا به سرطان را افزایش می‌دهد. نیمه عمر طولانی این زباله، از خطرهای مهم آن محسوب می‌شود. همچنین ^{93}Zr با برخورد نوترون‌ها می‌تواند به ^{96}Zr تبدیل شود، پس ^{93}Zr و ^{96}Zr از محصولات راکتورهای هسته‌ای هستند.

در این مقاله تبدیل دو ایزوتوپ زیرکونیوم، ^{93}Zr و ^{96}Zr به ایزوتوپ‌های دیگر توسط پرتوهای گامای حاصل از دو مکانیزم تابش ترمزی و پراکندگی معکوس کامپتون بررسی و مقایسه خواهند شد. با توجه به طیف فوتون‌های گامای تولیدی و سطح مقطع واکنش، تعداد واکنش و اکتیوتیه محصول محاسبه می‌شوند.

۲. مدل سازی

طیف فوتون‌های گامای حاصل از تابش ترمزی الکترون‌ها، به صورت زیر است،

$$n_{\gamma} = \frac{N_0}{kT_{\gamma}} \exp\left(\frac{-E_{\gamma}}{kT_{\gamma}}\right) \quad (1)$$

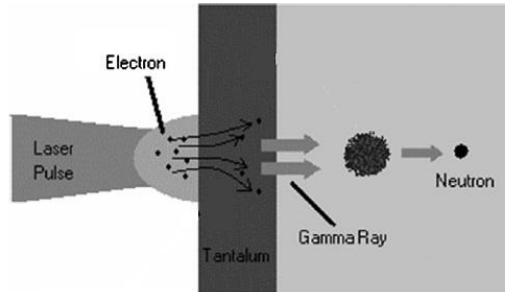
E_{γ} و kT_{γ} به ترتیب انرژی و دمای مشخصه تابش گاما هستند و N_0 ثابت نرمالیزاسیونی که توسط داده‌های آزمایشگاهی محاسبه می‌شود. این ثابت برای تانتولوم $6/88 \times 10^7$ است. سطح مقطع واکنش، $\sigma(E_{\gamma})$ زباله هسته‌ای به صورت ذیل تعریف می‌شود،

$$\sigma(E_\gamma) = \sigma_{Max} \left(4 \left(\frac{E_{Max} - E_\gamma}{\Gamma} \right)^2 + 1 \right)^{-1} \quad (2)$$

σ_{Max} سطح مقطع در E_{Max} و Γ پهنا را نشان می‌دهند. در نتیجه تعداد واکنش‌های (γ, n) برابر است با،

$$N = n_{tar} d_{tar} \int_{E_{thr}}^{E_{up}} \sigma(E_\gamma) n_\gamma dE_\gamma \quad (3)$$

n_{tar} و d_{tar} به ترتیب چگالی و ضخامت زیرکونیوم هستند و E_{up} حد بالای انرژی در واکنش و E_{thr} انرژی آستانه برای شروع واکنش را نشان می‌دهند. شکل ۱ واکنش تبدیل با استفاده از مکانیزم تابش ترمزی را نشان می‌دهد.



شکل ۱: انجام واکنش با استفاده از پرتوهای گامای حاصل از تابش ترمزی

در پراکندگی معکوس کامپتون، لیزر با الکترون‌های پراثری برخورد می‌کند و تابش گاما تولید می‌شود. با فرض گستردگی طیف انرژی باریکه الکترون، طیف فوتون‌های گامای حاصل از پراکندگی معکوس کامپتون برابر است با،

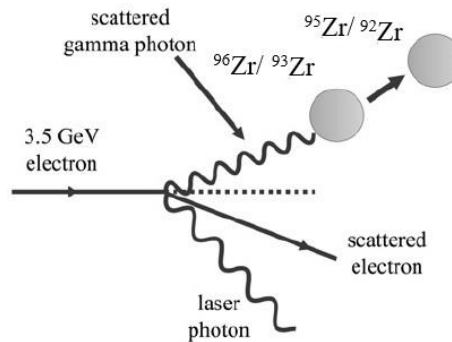
$$n_\gamma = \frac{N_\gamma}{\sigma_t} \int \frac{d\sigma}{dE_\gamma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_E} \exp\left(-\frac{(E_e - E_0)^2}{2\delta_E^2}\right) dE_e \quad (4)$$

N_γ تعداد کل فوتون‌های گامای تولیدی در هر ثانیه است که به صورت $N_\gamma = P I_e L$ تعریف می‌شود. جایی که P ، I_e و L به ترتیب توان لیزر، جریان باریکه الکترونی و درخشندگی پرتوی گامای تولیدی است. E_0 و δ_E به ترتیب نشان دهنده انرژی مرکزی و پهناهای انرژی باریکه الکترونی هستند. σ_t سطح مقطع کل برای پراکندگی کامپتون است که با کمک روابط (۵) و (۶) به دست خواهد آمد،

$$\sigma_t = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \quad (5)$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\alpha^2 r_c^2 P(E_\gamma, \theta)^2}{2} \left[P(E_\gamma, \theta) + \frac{1}{P(E_\gamma, \theta)} - 1 + \cos^2 \theta \right] \quad (6)$$

θ ، α ، r_c و $P(E_\gamma, \theta)$ به ترتیب زاویه پراکندگی، ثابت ساختار ریز، طول موج کامپتون کاهش یافته و نسبت انرژی فوتون‌ها قبل و بعد از برخورد را نشان می‌دهد. در ادامه با جایگذاری معادله (۴) در معادلات (۲) و (۳) تعداد واکنش‌های (γ, n) حاصل می‌شود. مکانیزم پراکندگی معکوس کامپتون در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: انجام واکنش با استفاده از پرتوهای گامای حاصل از پراکندگی معکوس کامپتون

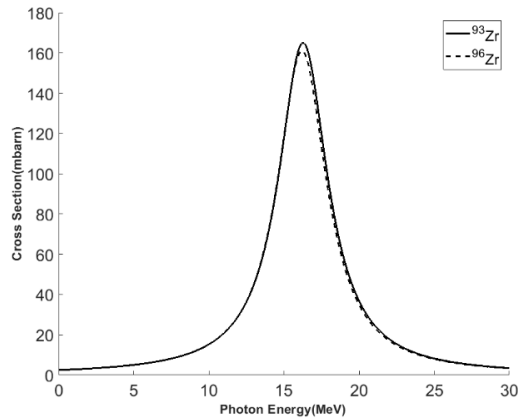
۳. نتایج عددی

در مکانیزم تابش ترمزی، انرژی تابش گاما باید مساوی یا بزرگتر از انرژی پیوند نوترون به هسته باشد تا نوترون پس از جذب تابش گاما، از هسته جدا شود، پس باید الکترون‌های نسبیتی در برهمکنش لیزر با ماده تولید شوند. برای تولید الکترون‌های نسبیتی، باید شرط $I\lambda^2 \geq 10^{18} Wcm^{-2} \mu m^2$ برقرار باشد. به همین علت در این مقاله، پالس لیزری با طول $80 fs$ ، نرخ تکرار $10 Hz$ ، طول موج $800 nm$ و شدت‌های زیاد به هدف اول، تانتولوم، با چگالی اتمی $5/54 \times 10^{22} cm^{-3}$ تابش می‌شود. ضخامت هدف اول، $1/11 mm$ انتخاب می‌شود، زیرا طبق نتایجی که قبلاً گزارش شده است، در این ضخامت واکنش بهینه خواهد بود [5]. بلافاصله پس از هدف اول، زیرکونیوم با ضخامت $1 cm$ قرار می‌گیرد. معادلات با استفاده از نرم افزار متلب حل و رسم شده‌اند. در جدول ۱ تعدادی از داده‌های لازم برای محاسبات بیان شده است.

جدول ۱. داده‌های دو ایزوتوپ زیرکونیوم

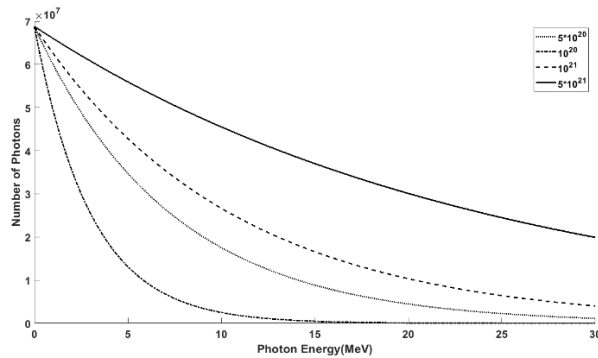
	$t_{1/2}$	E_{thr}	R.I	$t_{1/2}$
^{93}Zr	$1.61 \times 10^6 y$	6.734(n)	^{92}Zr	-
^{96}Zr	-	7.854(n)	^{95}Zr	64d

شکل ۳ سطح مقطع واکنش $^{93}Zr(\gamma, n)^{92}Zr$ و $^{96}Zr(\gamma, n)^{95}Zr$ را نشان می‌دهد. از شکل دیده می‌شود که سطح مقطع واکنش تبدیل ^{93}Zr و ^{96}Zr به ترتیب توسط پرتوهای گامایی با انرژی $16/27 MeV$ و $16/20 MeV$ بیشینه خواهد شد.



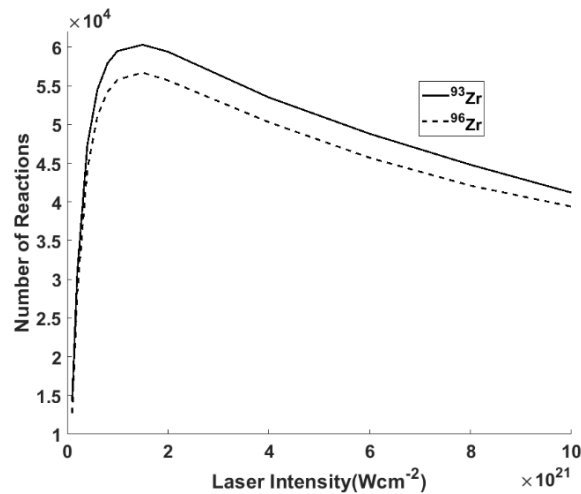
شکل ۳: سطح مقطع واکنش تبدیل ^{96}Zr و ^{93}Zr به صورت تابعی از انرژی تابش گاما

شکل ۴ طیف پرتوهای گامای حاصل را برای چهار شدت لیزر، 10^{21}Wcm^{-2} ، $5 \times 10^{21}\text{Wcm}^{-2}$ ، 10^{22}Wcm^{-2} ، $5 \times 10^{22}\text{Wcm}^{-2}$ نشان می‌دهد. دیده می‌شود که با افزایش شدت لیزر، تعداد فوتون‌های گاما کاهش می‌یابد. در نتیجه در شدت‌های بسیار زیاد، تعداد فوتون‌ها کاهش زیادی خواهد داشت و تعداد واکنش‌ها با وجود افزایش شدت لیزر، کاهش می‌یابد. بنابراین یک شدت بهینه برای انجام بیشترین تعداد واکنش وجود دارد، آنچنانکه برای شدت‌های بزرگتر از شدت بهینه، تعداد واکنش‌ها کاهش خواهد یافت.

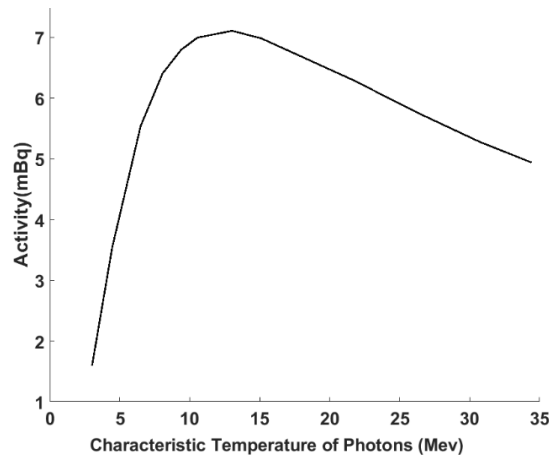


شکل ۴: طیف پرتوی گامای حاصل از باریکه لیزرها با شدت‌های مختلف، 10^{21}Wcm^{-2} (نقطه‌خط‌چین)، $5 \times 10^{21}\text{Wcm}^{-2}$ (نقطه‌چین)، 10^{22}Wcm^{-2} (خط‌چین)، $5 \times 10^{22}\text{Wcm}^{-2}$ (خط‌ممتد).

شکل ۵ تعداد واکنش‌های تبدیل ^{96}Zr و ^{93}Zr را برای هر شات لیزر به صورت تابعی از شدت لیزر نشان می‌دهد. از شکل دیده می‌شود که تعداد واکنش‌های $^{96}\text{Zr}(\gamma, n)^{95}\text{Zr}$ نسبت به واکنش تبدیل ^{93}Zr کمتر است، اما شدت لیزر بهینه برای تعداد واکنش‌ها یکسان و برابر با $1/5 \times 10^{21}\text{Wcm}^{-2}$ است و برای شدت‌های بزرگتر از شدت بهینه تعداد واکنش‌ها کاهش یافته است.



شکل ۵: تعداد واکنش‌های $^{93}\text{Zr}(\gamma, n)^{92}\text{Zr}$ و $^{96}\text{Zr}(\gamma, n)^{95}\text{Zr}$ به صورت تابعی از انرژی تابش گاما برای هر شات لیزر



شکل ۶: اکتیویته ^{95}Zr به صورت تابعی از دمای مشخصه گاما برای یک ساعت تابش لیزر

حاصل واکنش $^{93}\text{Zr}(\gamma, n)^{92}\text{Zr}$ یک رادیوایزوتوپ پایدار است، اما ^{95}Zr نیمه عمر ۶۴ روز دارد. شکل ۶ اکتیویته محصول واکنش را برای تابش لیزر ۱۰ Hz به مدت یک ساعت به هدف تانتولوم نشان می‌دهد که بیشترین اکتیویته ۷/۱۰ mBq مربوط به گاماها با دمای مشخصه ۱۳/۰۳ MeV است.

حال تعداد واکنش‌های تبدیل زباله زیرکونیوم با استفاده از تابش گامای حاصل از معکوس کامپتون محاسبه می‌شود. فرض می‌شود که لیزر CO_2 با توان ۱۰۰ W به باریکه الکترونی سنکروترون SLEGS با انرژی ۳/۵ GeV، جریان ۰/۳ A و درخشندگی $6/5 \times 10^9 \text{ A}^{-1} \text{ W}^{-1} \text{ s}^{-1}$ بتابد. بنابراین تعداد فوتون‌های گاما در هر ثانیه برابر با $1/95 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ است که تا انرژی گامای حدود ۲۱/۷۵ MeV تعداد فوتون‌ها ثابت است، این در حالی است که در تابش ترمزی تعداد فوتون‌ها با افزایش انرژی فوتون، کاهش چشم‌گیری دارند. با توجه به معادله‌های (۵) و (۶) و مقادیر $\alpha \cong 1/137.04$ و $r_c \cong 0.38616 \text{ pm}$ ، سطح مقطع کل $660/58 \text{ mb}$ خواهد شد و با توجه به معادله (۳)، تعداد واکنش‌های $^{93}\text{Zr}(\gamma, n)^{92}\text{Zr}$ و $^{96}\text{Zr}(\gamma, n)^{95}\text{Zr}$ به ترتیب $1/2 \times 10^{10}$ و $1/0.7 \times 10^{10}$ بدست می‌آیند. اگر در روش قبل، لیزر با شدت بهینه و فرکانس ۱۰ Hz به مدت یک ساعت به هدف تابیده شود، $2/17 \times 10^9$ و $2/10 \times 10^9$ واکنش نتیجه خواهند شد. زیرا طیف گامای حاصل از پراکندگی معکوس کامپتون تا انرژی ۲۷ MeV مقدار تقریباً ثابتی است، اما طیف گامای

تابش ترمزی در فوتون‌های گاما با انرژی کم، بیشینه است و با افزایش انرژی فوتون‌ها، تعداد فوتون‌ها به سرعت کاهش می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله واکنش‌های تبدیل دو ایزوتوپ زیرکونیوم، ^{93}Zr و ^{96}Zr ، با استفاده از تابش‌های گامای حاصل از تابش ترمزی الکترون‌ها و پراکندگی معکوس کامپتون محاسبه و مقایسه شدند. تعداد واکنش‌ها در مکانیزم تابش ترمزی، به شدت و مدت زمان تابش لیزر بستگی دارد. بعلاوه شدت بهینه‌ای برای داشتن بیشترین تعداد واکنش‌ها به دست آمد. در ادامه با توجه به اینکه نیمه عمر ایزوتوپ ^{95}Zr کوتاه است، اکتیوتیه این ایزوتوپ به صورت تابعی از دمای مشخصه گاما بررسی شد. همچنین با انتخاب چیدمان SLEGS با تولید بیشترین شار گاما، تعداد واکنش‌ها توسط مکانیزم پراکندگی معکوس کامپتون نیز محاسبه شد. مشاهده شد که تعداد واکنش‌ها در روش کامپتون ۵/۵ برابر تابش ترمزی است و برای رسیدن به این تعداد واکنش در روش تابش ترمزی باید مدت زمان تابش لیزر به هدف را افزایش داد.

۶. مراجع

- [1] D. Li et al., *Iodine transmutation through laser Compton scattering gamma rays*, J. Nucl. Sci. Technol. **46**, 831(2009).
- [2] H. Ejiri et al., *Resonant photonuclear reactions for isotope transmutation*, J. Phys. Soc. Japan. **80**, 0942021 (2011).
- [3] K. Horikawa et al., *Photonuclear reaction of iodine-129 with laser-compton scattering gamma-rays using Nd:Y VO 4 laser and electron storage ring*, Rev. Laser Eng. **39**, 445 (2011).
- [4] L. Casano et al., *Production of a beam of polarized and monochromatic rays by compton scattering of laser light against high energy electrons*, Laser Unconventional Optic. J. **3**, 55 (1975).
- [5] KM. Eshwarappa et al., *Estimation of photo neutron yield from beryllium target irradiated by variable energy microtron based bremsstrahlung radiation*, Nucl. InstrumMethods Phys. Res. A. **540**, 412 (2005).