

基于激光等离子体产生的轫致辐射源实现 同核异能素 ^{152m}Eu 的高效激发

罗凯军¹ 樊文茹¹ 袁 贇¹ 齐 伟² 张景丽¹ 张晓辉² 邓志刚² 罗 文¹

1(南华大学 核科学技术学院 衡阳 421001)

2(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心 绵阳 621900)

摘要 同核异能素在宇宙元素合成中发挥着重要作用,并且在控制核能释放方面有潜在的应用。其中,铕(Eu)在现实中有重要的研究意义,例如 ^{152}Eu 被用来做放射性实验的标准源,并且其同核异能态 $^{152m1}\text{Eu}$ 有73%的概率发生 β^- 衰变产生天体p核素钆(^{152}Gd),因此 $^{152m1}\text{Eu}$ 是产生天体p核素 ^{152}Gd 过程中的重要核素。在本工作中,基于激光等离子体产生的轫致辐射源,我们在实验上实现了 $^{152m1}\text{Eu}$ (45.6 keV, $T_{1/2}=9.31\text{ h}$)的高效激发,其产额能达到 8×10^4 个粒子/发。此外,进一步通过Geant4-GENBOD程序数值模拟了 $^{152m1,m2}\text{Eu}$ 的产额、产生时间以及峰值激发效率随电子温度的演化情况。研究发现,在入射电子电荷量固定为17.6 nC,且当电子温度达到15 MeV时, $^{152m1}\text{Eu}$ 和 $^{152m2}\text{Eu}$ 的产额趋于饱和,分别为 8×10^6 和 2×10^5 个粒子/发; $^{152m1}\text{Eu}$ 和 $^{152m2}\text{Eu}$ 的峰值激发效率分别有望达到约 10^{17} 和 10^{16} 个粒子/s,其中 $^{152m1}\text{Eu}$ 和 $^{152m2}\text{Eu}$ 的脉宽几乎不变,均为32 ps。超短超强激光技术能够极大提高同核异能素的激发效率,这将为研究宇宙元素合成问题以及控制核能释放应用研究提供一个重要的研究途径。

关键词 同核异能素 ^{152m}Eu , 激光等离子体, 轫致辐射源, (γ, n)反应, 峰值激发效率

中图分类号 TL92, TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.030501

Efficient excitation of nuclear isomer ^{152m}Eu using a bremsstrahlung radiation source generated by laser plasma

LUO Kaijun¹ FAN Wenru¹ YUAN Yun¹ QI Wei² ZHANG Jingli¹ ZHANG Xiaohui² DENG Zhigang²
LUO Wen¹

1(College of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

2(Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract [Background] Nuclear isomers are crucial in cosmic element synthesis and have potential applications in controlling nuclear energy release. Specifically, Europium (Eu) is significant in fundamental studies. For instance,

国家重点研发项目(No. 2022YFA1603300)、国家自然科学基金(No. U2230133, No. U2241281, No. 12305270)、衡阳市科技项目(No. 202150054076)、湖南省教育厅项目(No. 22B0453)、湖南省自然科学基金项目(No. 2023JJ40525)资助

共同第一作者: 罗凯军, 男, 1987年出生, 2020年于南华大学核科学技术学院获硕士学位, 现为博士研究生, 核科学与技术专业

樊文茹, 女, 1998年出生, 2020年毕业于成都理工大学工程技术学院, 现为硕士研究生, 核技术与应用专业

通信作者: 袁贇, E-mail: yuanyun_usc@qq.com; 齐伟, E-mail: bosqw7@163.com

收稿日期: 2023-09-27, 修回日期: 2024-01-19

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2022YFA1603300), National Natural Science Foundation of China (No. U2230133, No. U2241281, No. 12305270), Hengyang Municipal Science and Technology Project (No. 202150054076), the Research Foundation of Education Bureau of Hunan Province of China (No. 22B0453) and the Hunan Provincial Natural Science Foundation of China (No. 2023JJ40525)

Co-first author: LUO Kaijun, male, born in 1987, graduated from the School of Nuclear Science and Technology, University of South China with a master's degree in 2020, doctoral student, major in nuclear science and technology

FAN Wenru, female, born in 1998, graduated from the School of Nuclear Science and Technology, Chengdu University of Technology in 2020, master student, major in nuclear science and nuclear technology and applications

Corresponding author: YUAN Yun, E-mail: yuanyun_usc@qq.com; QI Wei, E-mail: bosqw7@163.com

Received date: 2023-09-27, revised date: 2024-01-19

^{152}Eu is used as a reference source for radioactive experiments, and its isomeric state $^{152\text{m}1}\text{Eu}$ has a probability of 73% to produce cosmological p-nuclei ^{152}Gd with β^- decay. Therefore, $^{152\text{m}1}\text{Eu}$ is a crucial nuclide in the nucleosynthesis of p-nuclei ^{152}Gd . **[Purpose]** This study aims to realize the efficient excitation of $^{152\text{m}1}\text{Eu}$ with a bremsstrahlung source generated by laser plasma. **[Methods]** Firstly, the laser-plasma bremsstrahlung source was utilized to achieve the efficient excitation of $^{152\text{m}1}\text{Eu}$ (45.6 keV, $T_{1/2}=9.31$ h) in the experiment with yields of 8×10^4 particles/shot by this isotope. Then, numerical simulations of the yield of $^{152\text{m}1, \text{m}2}\text{Eu}$ were performed using the Geant4-GENBOD program to get generation time, and peak excitation efficiency evolution with electron temperature. **[Results]** The results demonstrate that when the electron temperature reaches 15 MeV, the yield of $^{152\text{m}1, \text{m}2}\text{Eu}$ approaches saturation. When the incident electron charge is 17.6 nC, the yield of $^{152\text{m}1}\text{Eu}$ is approximately 8×10^6 particles/shot, and that of $^{152\text{m}2}\text{Eu}$ is approximately 2×10^5 particles/shot. The generation time of $^{152\text{m}1, \text{m}2}\text{Eu}$ in the target is approximately 32 ps. When the electron temperature reaches 15 MeV, the peak excitation efficiency of $^{152\text{m}1}\text{Eu}$ is expected to be $\sim 10^{17}$ particles/s, and that of $^{152\text{m}2}\text{Eu}$ is expected to be $\sim 10^{16}$ particles/s. **[Conclusions]** The ultrashort ultrahigh intensity laser technology can significantly enhance the excitation efficiency of isotopes of the same nucleus, and this will provide an important research avenue for the study of cosmic element synthesis and nuclear energy release control applications.

Key words Isomer $^{152\text{m}1}\text{Eu}$, Bremsstrahlung source, Laser plasma, (γ, n) reaction, Peak excitation efficiency

1960年,美国科学家西奥多·梅曼(Theodore Maiman)在加利福尼亚休斯实验室设计并建造了人类历史上首台红宝石激光器,自此激光技术得到了高速发展^[1]。基于超短超强激光脉冲在等离子体中诱发的激光尾波场加速带电粒子,可以获得高于传统加速器上千倍的加速度。尤其近几十年来,超强超短脉冲激光器技术有了显著进展^[2],可获得的激光强度已突破了 $10^{22} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 水平,其产生的静电场强度高达 $3.8\times 10^{12} \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$,激光的脉冲宽度短至飞秒量级。在这种高功率的超强超短激光脉冲照射下,在极短的时间内受辐照的原子都会被电离,通过不同的机制产生 MeV 到 100 MeV 量级的高能量质子、MeV 到 GeV 量级的高能量电子或者其他带电粒子以及中子和韧致辐射 γ 光子等不带电粒子,这些被电离并加速的次级粒子均可进一步与原子核发生反应。相较于自由带电粒子,光子不受核介质的影响,是核反应早期良好的探针^[3],因此,超强超短激光驱动的光核反应也为核物理的研究开辟了新的赛道^[4]。

同核异能素(isomer)是具有相同质量数和原子序数而且处于较长寿命激发态的核素,它们的半衰期从纳秒到年不等。同核异能素在生活中具有广泛的应用,如医用同位素^[5-7]。另外在核电池^[8-10]、核时钟^[11-12]和核激光^[13]等方面也具有潜在应用价值。核反应是合成宇宙中除氢以外所有化学元素的唯一机制^[14],部分放射性核参与的核反应在元素核合成过程中非常重要^[15],对寿命较长的同核异能素进行研究可为探索极端天体物理环境中核素的合成问题提供新的解决思路^[16-17]。在天体核合成过程中,p核素位于质子捕获路径的一侧,因此它们不能通过快中

子捕获(r-)或慢中子(s-)捕获过程形成,目前还没有一个被普遍接受的解决方案。铕(Eu)也是核天体物理s-过程的关键核之一。在天文观测数据中,铕的元素丰度值与理论计算值有很大的差异,其产生过程和产生场所还存在疑问^[18]。近几年来,研究学者发现这些p核素可以在宇宙大爆炸条件下,通过一系列光分解反应产生^[19],在这些反应过程中常常伴随同核异能素的产生,因此同核异能素极有可能是这些天体p核素的产生源。

^{152}Eu 作为校准锗锂(Ge(Li))探测器的常用 γ 射线源^[20],其物理性质一直被关注。 ^{152}Eu 有两个同核异能态,即 ^{152}Eu 第一激发态 $^{152\text{m}1}\text{Eu}$ (45.6 keV, $T_{1/2}=9.31$ h)和 ^{152}Eu 第二激发态 $^{152\text{m}2}\text{Eu}$ (147.9 keV, $T_{1/2}=96$ min)。其中, $^{152\text{m}1}\text{Eu}$ 有73%的概率发生 β^- 反应产生天体p核素 ^{152}Gd ,而 $^{152\text{m}2}\text{Eu}$ 则100%退激至 ^{152}Eu 基态。目前,人们对Eu的研究越来越多。尽管已经有许多实验室对 ^{152}Eu 进行了研究^[21-28],但这些大多仅限于测量其衰变性质。例如,Sharma等^[22]发表了关于 ^{152}Eu 完整的衰变能量和强度;Yoshizawa等^[23]考虑了 ^{152}Eu 在270~1 528 keV之间的衰变;Baker等^[28]发表了关于 ^{152}Eu 的14个新的跃迁,但是与Sharma等的研究结果存在一些差异。除此之外,Danilenko等^[29]用热中子辐照98.9%的 $^{151}\text{Eu}_2\text{O}_3/^{151}\text{EuCl}_3$ 产生了 ^{152}Eu 。

在本次工作中,我们在实验上基于激光等离子体产生的韧致辐射源,通过 $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)$ 反应实现了 $^{152\text{m}1}\text{Eu}$ (45.6 keV, $T_{1/2}=9.31$ h)的高效激发,其产额能达到 8×10^4 个粒子/发。此外,进一步使用Geant4-GENBOD程序,对 $^{152\text{m}1, \text{m}2}\text{Eu}$ 的产额、产生时间及峰值激发效率随电子温度的变化关系进行了数值模拟研

究。研究发现,在入射电子电荷量固定为 17.6 nC,且当电子温度达到 15 MeV 时, $^{152m1}\text{Eu}$ 和 $^{152m2}\text{Eu}$ 的产额趋于饱和,分别为 8×10^6 和 2×10^5 个粒子/发; $^{152m1}\text{Eu}$ 和 $^{152m2}\text{Eu}$ 的峰值激发效率分别有望达到约 10^{17} 和 10^{16} 个粒子/s,其中 $^{152m1}\text{Eu}$ 和 $^{152m2}\text{Eu}$ 的脉宽几乎不变,均约为 32 ps。

1 实验布局

本次 ^{152m}Eu 的产生实验在中国工程物理研究院激光聚变研究中心的星光 III 激光装置上开展,实验布局如图 1 所示。首先通过采用脉宽为 0.774 ps,能量为 114.8 J 的高功率激光脉冲辐照 N_2 气体靶产生 MeV 量级的高能电子束。其次,将产生的高能电子束进一步轰击金属堆栈靶(共 6 层,由一层 2 mm 厚的钽靶(Ta)加上 5 层 2 mm 厚的氧化铕靶(Eu_2O_3)构成),电子源距离 Ta 靶前表面的距离为 12 mm。其中,高能电子束先与 Ta 靶作用产生高能韧致辐射,进而与 Eu_2O_3 靶发生 (γ, n) 反应产生 ^{152m}Eu 。在无金属堆栈的电子加速实验中,首先使用电子磁谱仪(Electron Magnetic Spectrometer, EMS)诊断电子束能量。同时,将中心开孔的 IP 堆叠(7 张 IP,每张 IP 粘附有 0.5 mm 厚的 Ta 箔)放置在 EMS 前面,用于测量电子束的空间分布。在进行金属堆栈打靶实验时,则在气体靶后 42 cm 处放置 6 层金属堆栈靶。打靶结束后,从星光 III 激光设备的靶室中取出堆叠的 Eu_2O_3 靶,接着用校准过的高纯锗(HPGe)探测器对这些 Eu_2O_3 靶的特征 γ 射线进行离线探测。

2 实验结果及数值模拟分析

2.1 激光加速电子束及 ^{152m}Eu 的产生

在本次实验中,高能电子主要通过激光有质动力和激光尾波场混合加速机制获得^[4]。由于等离子体密度可以影响电子产率和电荷,因此可以通过改变气体射流的背压来优化电子束的产生。图 2(a)显示了 EMS 在 2.0 MPa 下记录的电子的能量分布。它的谱线趋势在 高能部分 (>8 MeV) 呈现类玻尔兹曼分布,谱线的斜率为电子温度,采用的玻尔兹曼拟合公式如下:

$$f(E) = N_0 \exp\left(-\frac{E}{T}\right) \quad (1)$$

式中: N_0 为初始电子数目; E 为电子能量; T 为电子温度。通过实验数据分析,结合式(1)拟合结果表明,当气体背压为 2.0 MPa 时,电子温度值为 7.8 MeV,电子电荷量为 17.6 nC,如图 2(b)所示。此外,能量

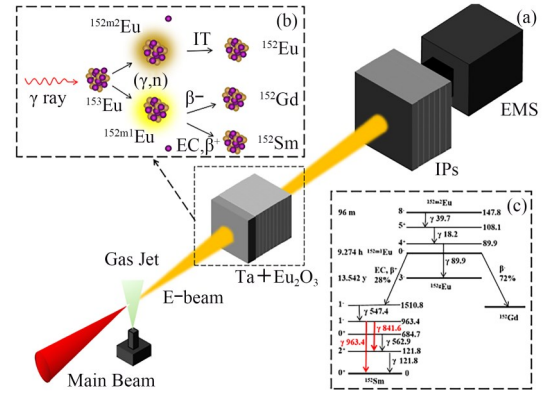


图 1 (a) 星光 III 装置产生 ^{152m}Eu 的实验布局示意图, (b) 光核反应产生 ^{152m}Eu 示意图, (c) ^{152m}Eu 的能级跃迁图(图右侧给出了能级能量,左侧给出了半衰期和价态)

Fig.1 (a) Schematic of the experimental setup for nuclear isomer ^{152m}Eu production at the XingGuangIII laser facility, (b) Schematic of the ^{152m}Eu production of photo-nuclear reaction, (c) Partial energy level transition scheme for the ^{152m}Eu nucleus (right side of the panel shows the level energies, and the left side shows the half-lives and valence state)

在 1 MeV 以上的电子束的电荷量 Q_e 约为 42 nC,电子束发散角约为 200 mrad。

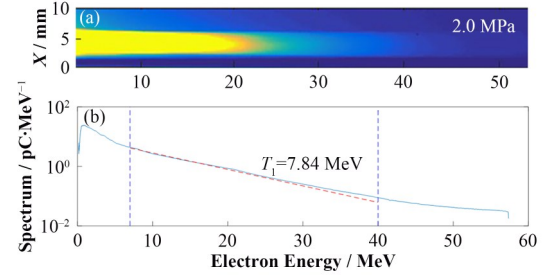


图 2 (a) IP 板记录的电子能量分布图, (b) 电子谱仪探测到的电子能谱

Fig.2 (a) Electron energy distribution map recorded by the IP plate, (b) Electron energy spectrum detected by the electron spectrometer

产生的高能电子束与金属堆栈靶前面的 Ta 靶相互作用,产生高能韧致辐射(γ 射线)。这些 γ 射线进一步与 Eu_2O_3 靶相互作用诱发光核反应,产生 ^{152m}Eu 。由于韧致辐射谱在实验中没有给出,这里我们通过采用 Geant4-GENBOD^[30-32]程序,对 Ta 靶中产生的 γ 辐射谱进行了数值模拟,其中光核反应截面数据由 Talys 程序^[33]给出,如图 3(a)所示。在数值模拟中仅采用了实验电子束的高能部分(8 MeV 以上),因为 ^{152m}Eu 的光核产生峰值截面位于 8~25 MeV 能量范围区间。图 3(b)显示了电子束与钽靶相互作用产生的韧致辐射能谱。其中,在 高能端由于电子截止能量的影响,韧致辐射谱强度发生了急剧下降。

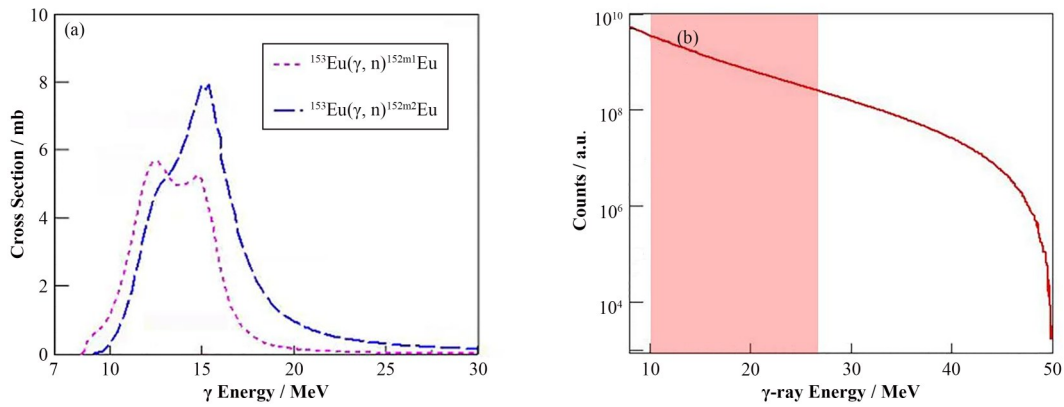


图3 (a) $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)^{152m1,m2}\text{Eu}$ 的光核反应截面图, (b) Eu_2O_3 靶前表面的韧致辐射模拟光谱, 其中 $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)^{152m1,m2}\text{Eu}$ 核反应主要发生在粉色阴影区域(彩图见网络版)

Fig.3 (a) Cross section of $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)^{152m1,m2}\text{Eu}$ photo-nuclear reaction, (b) Simulated bremsstrahlung spectra of the anterior surface of the Eu_2O_3 target, among them, $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)^{152m1,m2}\text{Eu}$ nuclear reaction mainly occurs in the pink region (color online)

2.2 $^{152m1}\text{Eu}$ 的探测

在实验中,堆栈靶被放置在真空靶室内,其中 Eu_2O_3 靶用来产生目标核素 $^{152m1,m2}\text{Eu}$ 。经过辐照后,大约需要 30 min 用来降低腔室的真空度,然后再取出目标靶进行离线检测。目标核素 $^{152m1}\text{Eu}$ 的半衰期为 9.31 h, $^{152m2}\text{Eu}$ 的半衰期为 96 min, 其中 $^{152m1}\text{Eu}$ 在退激过程中有 28% 的概率发生 β^+ 生成 ^{152}Sm 的激发态,进而退激释放出能量值分别为 121.8 keV、841.6 keV 和 963.4 keV 的三个主要特征 γ 射线,其 γ 射线强度分别为 $I_\gamma=7.0\%$ 、14.2% 和 11.6%; $^{152m2}\text{Eu}$ 在退激过程中会释放出能量值分别为 18.2 keV 和 89.9 keV 的两个主要特征 γ 射线,其 γ 射线强度分别为 $I_\gamma=1.2\%$ 和 69.7%。在离线测量过程中,使用 HPGe 探测器进行探测,5 片靶被平铺在 HPGe 探测器端盖表面。结果显示,我们清晰地探测到了 $^{152m1}\text{Eu}$ 释放出的 841.6 keV 和 963.4 keV 两条特征 γ 射线,如图 4(a) 所

示。但是由于探测器无法兼顾低能区的探测效率,无法对 $^{152m2}\text{Eu}$ 的两条特征 γ 射线以及 $^{152m1}\text{Eu}$ 的 121.8 keV 进行探测。图 4(b) 显示了 $^{152m1}\text{Eu}$ 两条特征 γ 射线的累积峰值计数与测量时间之间的函数关系。拟合函数遵循核衰变的典型公式:

$$N_{\text{det}} = N_0 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right) \right\} \quad (2)$$

式中: N_{det} 是在 t 时刻累积的峰值计数; N_0 是所有 $^{152m1}\text{Eu}$ 完成衰变时的总峰值计数。根据式(2),两条 γ 射线在 841.6 keV 和 963.4 keV 能量下的半衰期分别为 (10.02 ± 1.01) h 和 (8.58 ± 1.43) h。这些结果,在误差允许范围内,与 NNDC 数据库^[34] 提供的 $^{152m1}\text{Eu}$ 半衰期 $T_{1/2}=9.3$ h 基本吻合。

通过特征 γ 射线的峰值计数,可以得到实验中 $^{152m1}\text{Eu}$ 的产额。其表达式可以写成:

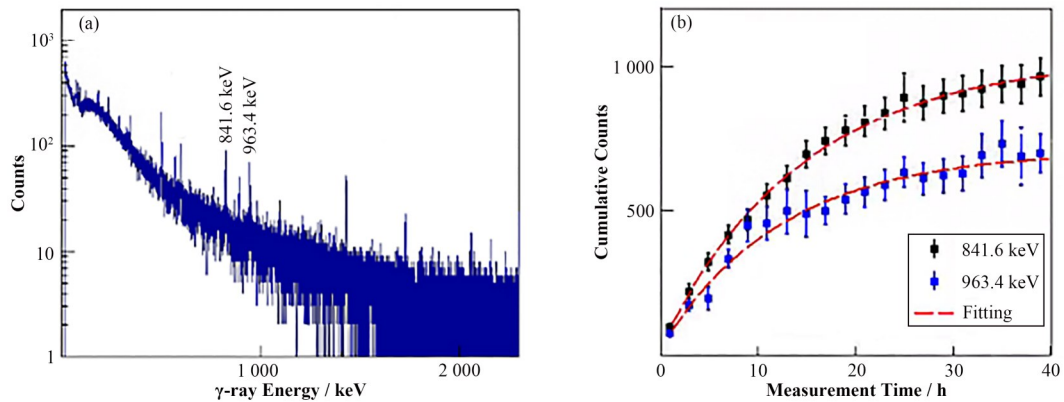


图4 (a) Eu_2O_3 靶的总 γ 能谱,探测时间为 40 h, (b) 能量为 841.6 keV 和 963.4 keV 的两条特征 γ 射线的累积峰值计数
Fig.4 (a) Total gamma spectrum of the Eu_2O_3 target with a detection time of 40 h, (b) Peak counts accumulated for three characteristic γ -ray lines at energies of 841.6 keV and 963.4 keV

$$Y_{\text{exp}} = \frac{N_{\text{det}}}{I_{\gamma}\varepsilon\{\exp(-\lambda t_{\text{d}}) - \exp(-\lambda t)\}} \quad (3)$$

其中： I_{γ} 为特征 γ 射线的衰变强度； t 是实际测量时间； t_{d} 是目标靶结束照射与开始检测之间的时间； λ 为 $^{152m1}\text{Eu}$ 的衰变常数； ε 表示HPGe探测器的源峰探

测效率。 $t=40$ h时，在841.6 keV和963.4 keV处的两种特征 γ 射线的 N_{det} 值分别为 977 ± 66 和 673 ± 66 。根据式(3)可以得到 $^{152m1}\text{Eu}$ 的产额 Y_{exp} 分别为 $(8.5\pm 0.06)\times 10^4$ 和 $(7.9\pm 0.08)\times 10^4$ 。表1总结了两个主要特征 γ 射线的基本参数以及 $^{152m1}\text{Eu}$ 的产额。

表1 $^{152m1}\text{Eu}$ 用于产额计算的关键参数
Table 1 Production yields of $^{152m1}\text{Eu}$ and the key parameters used for yield calculation

核素 Isomer	γ 射线能量 E_{γ}/keV	射线强度 Branching intensity $I_{\gamma}/\%$	半衰期 Half life $T_{1/2,\text{theo}}/\text{h}$	半衰期 Half life $T_{1/2,\text{exp}}/\text{h}$	探测效率 Detector efficiency ε	峰计数 Peak count N_{det}	产额 Yield Y_{exp} $/10^4$
$^{152m1}\text{Eu}$	841.6	14.2	9.3	10.02 ± 1.01	0.09	977 ± 66	8.5 ± 0.06
	963.4	11.6		8.58 ± 1.43	0.08	673 ± 66	7.9 ± 0.08

2.3 讨论

为了直观清晰地了解产物在目标靶内的产生，我们研究了 $^{152m1,m2}\text{Eu}$ 在靶内的产生位置分布，使用Geant4-GENBOD工具包模拟 γ 射线与 Eu_2O_3 靶之间的相互作用。在该工具包中，需要使用来自理论计算或实验数据库的光核截面数据作为输入，因此，模

拟采用了 $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)$ 反应的Talys模拟截面曲线。目标靶 Eu_2O_3 的布局为5片 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 紧密排列。模拟中选择7.8 MeV的电子束和2 mm厚度的Ta转换靶，并且整体布局完全参照实验布局设置。结果如图5所示，从图5可以看出，当入射的 γ 射线束发散角度较小时，光核反应产生的 $^{152m1,m2}\text{Eu}$ 与入射的 γ 射线束在传播方向呈相同的

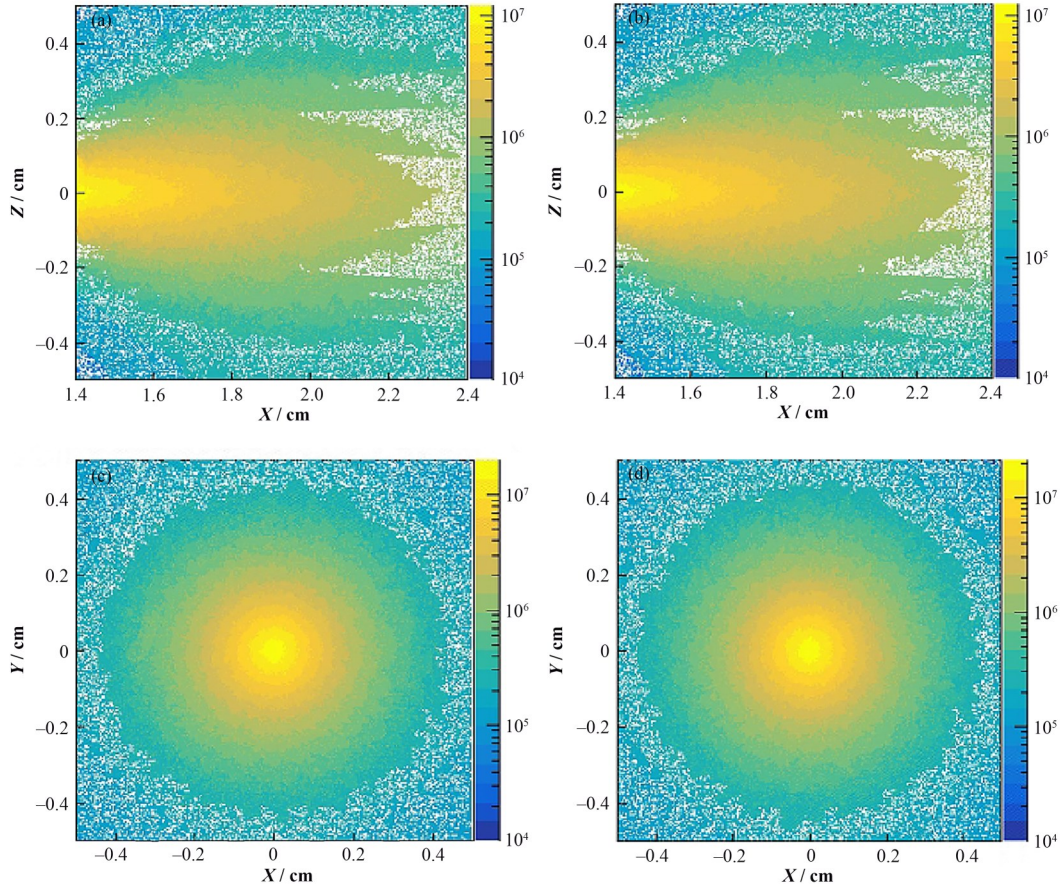


图5 $^{152m1}\text{Eu}$ (a)和 $^{152m2}\text{Eu}$ (b)在靶内X-Z平面内的分布图， $^{152m1}\text{Eu}$ (c)和 $^{152m2}\text{Eu}$ (d)在靶内X-Y平面内的分布图
Fig.5 Distribution of $^{152m1}\text{Eu}$ (a) and $^{152m2}\text{Eu}$ (b) in the X-Z plane within the target zone, and that of $^{152m1}\text{Eu}$ (c) and $^{152m2}\text{Eu}$ (d) in the X-Y plane within the target zone

空间分布, $^{152m1,m2}\text{Eu}$ 的空间分布沿径向和纵向均减小。模拟获得的反应产物 $^{152m1,m2}\text{Eu}$ 在目标靶中的空间分布信息, 在实验上可以帮助选择目标靶的几何参数。例如, 由图5反应产物的空间分布可知, 基于激光加速电子产生的韧致辐射源的发散角很小, 因此边长为 1 cm 的目标靶足够满足光核反应实验需求。

当目标靶大小固定后, 为得到更高产额的 ^{152m}Eu , 进一步模拟了核反应产物产额随 Eu_2O_3 靶厚度的变化关系(固定 Ta 靶厚度为 2 mm)。如图6所示(以 $^{152m1}\text{Eu}$ 为例), 从图中可以看出 $^{152m1}\text{Eu}$ 产额随 Eu_2O_3 靶厚度增大而升高, 当 Eu_2O_3 靶的厚度达到 18 mm 时, $^{152m1}\text{Eu}$ 的产额趋于饱和, 达到约 4.2×10^6 。

此外, 为了研究 $^{152m1,m2}\text{Eu}$ 的产额与激发效率对电子温度的依赖关系, 进一步模拟了 $^{152m1,m2}\text{Eu}$ 产额、脉宽以及峰值激发效率随电子温度的变化关系, 模拟采用的入射电子电荷量为 17.6 nC, 目标靶为 5 片 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的 Eu_2O_3 靶紧密排列。由于不同温度下的电子束对应的高能份额不同, 故在 $^{153}\text{Eu}(\gamma, n)$ 的核反应截面下光核反应产物 $^{152m1,m2}\text{Eu}$ 的产率存在明显的差异。从图7(a)和(b)可以看出, $^{152m1,m2}\text{Eu}$ 的产额随着电子温度的升高而增加, 当电子温度在 12 MeV 附近时, $^{152m1,m2}\text{Eu}$ 的产额预期分别达到约 10^7 与 10^5 个粒子/发, 并且脉宽稳定在 32 ps 左

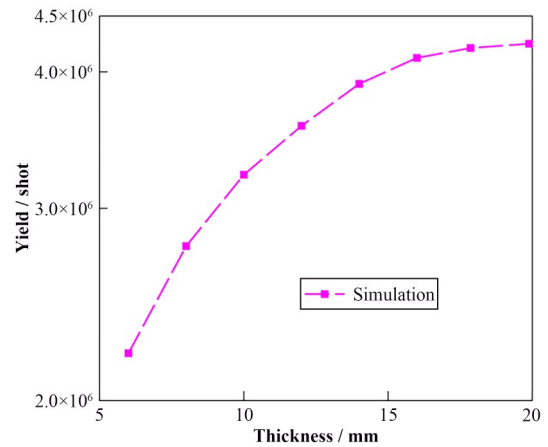


图6 固定 Ta 靶厚度为 2 mm 时, $^{152m1}\text{Eu}$ 的产额随目标靶 (Eu_2O_3) 厚度的变化关系

Fig.6 Yield of $^{152m1}\text{Eu}$ varies with the thickness of the target (Eu_2O_3) at the fixed Ta target thickness of 2 mm

右。图7(c)描述了 $^{152m1,m2}\text{Eu}$ 的峰值激发效率随电子温度的变化情况, 如图所示, 当电子温度达到 15 MeV 时, $^{152m1,m2}\text{Eu}$ 的峰值激发效率分别有望达到约 10^{17} 个粒/s 和 10^{16} 个粒子/s, 比传统加速器高出 5~6 个数量级^[26]。Günther 等^[35]近期通过中等相对论强度的激光脉冲与亚毫米厚度的近临界密度泡沫靶相互作用, 实验获得了温度约为 15 MeV 的大电量电子束, 进一步表明了基于激光加速电子高效激发同核异能素的实验可行性。

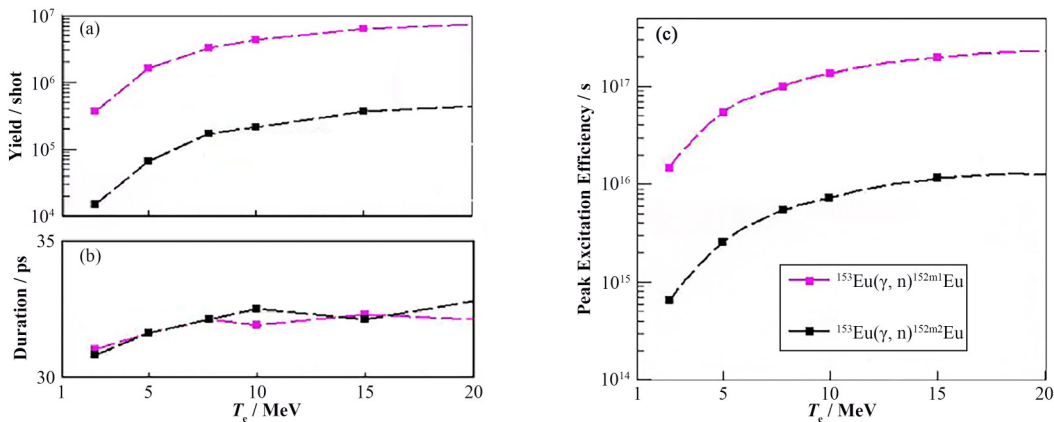


图7 $^{152m1,m2}\text{Eu}$ 的产额(a)、产生时间(b)以及峰值激发效率(c)随电子温度的变化关系

Fig.7 Variations of the yield (a), production time (b), and peak excitation efficiency (c) of $^{152m1,m2}\text{Eu}$ with electron temperature

3 结语

本工作在百焦耳皮秒激光器上通过激光加速的高能电子实现 $^{152m1}\text{Eu}$ 的高效产生, 实验产生了约 17.6 nC 的高能电子 (>8 MeV), $^{152m1}\text{Eu}$ 的产额达到 8×10^4 个粒子/发。其次, 我们通过 Geant4-GENBOD 程序模拟了 $^{152m1,m2}\text{Eu}$ 在目标 Eu_2O_3 靶内的分布情况, 研

究发现产物的空间分布沿径向和纵向均减小, 并且峰值位于靶中心。该结果可以有效地帮助确定目标靶的大小。当把 Eu_2O_3 靶大小固定后, 我们进一步模拟了产物产额随 Eu_2O_3 靶厚度的变化关系, 当 Eu_2O_3 靶的厚度达到 18 mm 时, $^{152m1}\text{Eu}$ 的产额趋于饱和, 达到约 4.2×10^6 。最后模拟了电子温度对 $^{152m1}\text{Eu}$ 的产额、脉宽以及峰值激发效率的影响, 结果表明: 当电

子温度达到 15 MeV 时, ^{152m1,m2}Eu 的产额分别约为 8×10^6 和 2×10^5 个粒子/发; ^{152m1,m2}Eu 的峰值激发效率分别有望达到约 10^{17} 和 10^{16} 个粒子/s。脉宽基本维持在 32 ps 左右。因此, 激光等离子体加速方案有望获得比传统加速器方案更高峰值的核激发效率, 这将为同核异能素比、宇宙元素合成问题以及控制核能释放应用研究提供一个重要的研究途径^[36]。已有研究表明, 同核异能素比(IR)在核结构、核反应机制和核天体物理中起着重要作用, 是检验核结构理论和核反应模型的有效工具^[37-38]。IR 通常定义为 σ_h/σ_l , 其中 σ_h 和 σ_l 分别表示高、低自旋态的产生截面。实验上, IR 又可以表示为产额比 Y_h/Y_l , 其中 Y_h 和 Y_l 分别表示高、低自旋态的产物产额^[39]。由于本次实验是单发激光, 用于辐照的激光加速电子流强有限, 并且所采用的探测器无法兼顾低能区的探测效率, 因此未能测到 ^{152m2}Eu 退激的 18.20 keV 和 89.85 keV 两个主要特征 γ 射线, 无法进一步开展 ^{152m1,m2}Eu 的同核异能素比研究。未来, 可以通过优化实验方案, 例如, 可通过高重频激光装置设计高流强、大电量的电子加速方案进一步开展 ^{152m1,m2}Eu 的高效产生实验, 测到 ^{152m2}Eu 退激的特征峰, 得到 ^{152m1,m2}Eu 的产额比, 进而获得 ^{152m1,m2}Eu 的同核异能素比。

致谢 感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心周维民老师给予的指导和帮助。

作者贡献声明 罗凯军、樊文茹负责论文构思、调查研究、数据处理、分析和写作; 袁赞帮助和指导论文构思和文章写作; 齐伟、张晓辉、邓志刚负责指导实验、数据处理和提供电子能谱诊断数据; 张景丽负责程序模拟; 罗文指导实验数据以及相关知识。

参考文献

- Maiman T H. Stimulated optical radiation in ruby[J]. Nature, 1960, **187**: 493 - 494. DOI: 10.1038/187493a0.
- Mourou G A, Tajima T, Bulanov S V. Optics in the relativistic regime[J]. Reviews of Modern Physics, 2006, **78**(2): 309 - 371. DOI: 10.1103/revmodphys.78.309.
- 马余刚. 原子核中的 α 团簇对核反应与相对论重离子碰撞的影响[J]. 核技术, 2023, **46**(8): 080001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080001.
MA Yugang. Effects of α -clustering structure on nuclear reaction and relativistic heavy-ion collisions[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(8): 080001. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080001.
- 王乃彦. 激光核物理[J]. 物理, 2008, **37**(9): 621 - 624. DOI: 10.3321/j.issn:0379-4148.2008.09.001.
WANG Naiyan. Nuclear laser physics[J]. Physics, 2008, **37**(9): 621 - 624. DOI: 10.3321/j.issn:0379-4148.2008.09.001.
- Filippi L, Chiaravalloti A, Schillaci O, et al. Theranostic approaches in nuclear medicine: current status and future prospects[J]. Expert Review of Medical Devices, 2020, **17**(4): 331 - 343. DOI: 10.1080/17434440.2020.1741348.
- Lindenberg L, Choyke P, Dahut W. Prostate cancer imaging with novel PET tracers[J]. Current Urology Reports, 2016, **17**(3): 18. DOI: 10.1007/s11934-016-0575-5.
- Pan W T, Song T, Lan H Y, et al. Photo-excitation production of medically interesting isomers using intense γ -ray source[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2021, **168**: 109534. DOI: 10.1016/j.apradiso.2020.109534.
- Xu Z H, Jin Z G, Tang X B, et al. Designing performance enhanced nuclear battery based on the Cd-109 radioactive source[J]. International Journal of Energy Research, 2020, **44**(1): 508 - 517. DOI: 10.1002/er.4958.
- Prelas M A, Weaver C L, Watermann M L, et al. A review of nuclear batteries[J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, **75**: 117 - 148. DOI: 10.1016/j.pnucene.2014.04.007.
- Ulmen B, Desai P D, Moghaddam S, et al. Development of diode junction nuclear battery using ⁶³Ni[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2009, **282**(2): 601 - 604. DOI: 10.1007/s10967-009-0320-3.
- Masuda T, Yoshimi A, Fujieda A, et al. X-ray pumping of the ²²⁹Th nuclear clock isomer[J]. Nature, 2019, **573**(7773): 238 - 242. DOI: 10.1038/s41586-019-1542-3.
- Seiferle B, von der Wense L, Bilous P V, et al. Energy of the ²²⁹Th nuclear clock transition[J]. Nature, 2019, **573**(7773): 243 - 246. DOI: 10.1038/s41586-019-1533-4.
- 陈银吉, 张立勇. 锦屏深地核天体实验探究 AGB 星氟超丰问题[J]. 核技术, 2023, **46**(11): 110501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.110501.
CHEN Yinji, ZHANG Liyong. Examining the fluorine overabundance problem by conducting Jinping deep underground experiment[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(11): 110501. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.110501.
- 李家英豪, 李云居, 李志宏, 等. 基于 HI-13 串列加速器的核天体物理研究[J]. 核技术, 2023, **46**(8): 080002. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080002.
LI Jiyinghao, LI Yunju, LI Zhihong, et al. Nuclear astrophysics research based on HI-13 tandem accelerator [J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(8): 080002. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080002.

- 15 Rivlin L A, Zadernovsky A A. Nuclear gamma-ray laser: a comparative analysis of various schemes[J]. *Laser Physics*, 2010, **20**(5): 971 - 976. DOI: [10.1134/S1054660X10090082](https://doi.org/10.1134/S1054660X10090082).
- 16 Misch G W, Sprouse T M, Mumpower M R. Astromers in the radioactive decay of r-process nuclei[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2021, **913**(1): L2. DOI: [10.3847/2041-8213/abfb74](https://doi.org/10.3847/2041-8213/abfb74).
- 17 Misch G W, Ghorui S K, Banerjee P, *et al.* Astromers: nuclear isomers in astrophysics[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2020, **252**(1): 2. DOI: [10.3847/1538-4365/abc41d](https://doi.org/10.3847/1538-4365/abc41d).
- 18 薛韩, 马余刚, 王宏伟, 等. ^{151}Eu 中子俘获截面中 ^{152}Eu 同质异能态贡献的模型检验和分析[J]. *核技术*, 2018, **41**(11): 110503. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.110503](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.110503).
XUE Han, MA Yugang, WANG Hongwei, *et al.* Model calculation and analysis of ^{151}Eu neutron capture cross section contributed by isomeric state of ^{152}Eu [J]. *Nuclear Techniques*, 2018, **41**(11): 110503. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.110503](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.110503).
- 19 Lambert D L. The p-nuclei: abundances and origins[J]. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 1992, **3**(3): 201 - 256. DOI: [10.1007/BF00872527](https://doi.org/10.1007/BF00872527).
- 20 Stewart N M, Eid E, El-Daghmah M S S, *et al.* Levels in ^{152}Gd and ^{152}Sm populated by the decay of ^{152}Eu [J]. *Zeitschrift Für Physik A Atomic Nuclei*, 1990, **335**(1): 13 - 23. DOI: [10.1007/BF01289342](https://doi.org/10.1007/BF01289342).
- 21 Riedinger L L, Johnson N R, Hamilton J H. Studies of the radioactive decays of ^{152}Eu and ^{154}Eu [J]. *Physical Review C*, 1970, **2**(6): 2358 - 2379. DOI: [10.1103/physrevc.2.2358](https://doi.org/10.1103/physrevc.2.2358).
- 22 Sharma A K, Kaur R, Verma H R, *et al.* Precision energy and intensity measurements in ^{152}Sm , ^{152}Gd and ^{154}Gd [J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1980, **48**(5): 1407 - 1414. DOI: [10.1143/jpsj.48.1407](https://doi.org/10.1143/jpsj.48.1407).
- 23 Yoshizawa Y, Iwata Y, Iinuma Y. Precision measurements of gamma-ray intensities. II. ^{152}Eu , ^{154}Eu and ^{192}Ir [J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1980, **174**(1 - 2): 133 - 139. DOI: [10.1016/0029-554x\(80\)90421-8](https://doi.org/10.1016/0029-554x(80)90421-8).
- 24 Debertain K. International intercomparison of gamma-ray emission-rate measurements by means of germanium spectrometers and ^{152}Eu sources[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1979, **158**: 479 - 486. DOI: [10.1016/s0029-554x\(79\)94930-9](https://doi.org/10.1016/s0029-554x(79)94930-9).
- 25 Meyer R A. Lawrence Livermore Laboratory[J]. M-100, 1978. DOI: [10.2172/7334917](https://doi.org/10.2172/7334917).
- 26 Gehrke R J, Helmer R G, Greenwood R C. Precise relative γ -ray intensities for calibration of Ge semiconductor detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1977, **147**(2): 405 - 423. DOI: [10.1016/0029-554x\(77\)90276-2](https://doi.org/10.1016/0029-554x(77)90276-2).
- 27 Debertain K, Schötzig U, Weiss H M. Calibration of the gamma ray efficiency of Ge(Li) spectrometers with ^{152}Eu [J]. *PTB Mitteilungen*, 1975, **85**(3): 187 - 195. DOI: [10.1007/978-1-4684-2682-3_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-2682-3_3).
- 28 Baker K R, Hamilton J H, Ramayya A V. Detailed Ge(Li)-Ge(Li) coincidence studies of levels in ^{152}Sm and ^{152}Gd [J]. *Zeitschrift Für Physik*, 1972, **256**(5): 387 - 415. DOI: [10.1007/BF01386987](https://doi.org/10.1007/BF01386987).
- 29 Danilenko V N, Gromova N P, Konstantinov A A, *et al.* Methods of producing radionuclides for spectrometric gamma-ray sources and their standardization: 2. Europium-152[J]. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation Part A, Applied Radiation and Isotopes*, 1989, **40**(8): 711 - 713. DOI: [10.1016/0883-2889\(89\)90083-x](https://doi.org/10.1016/0883-2889(89)90083-x).
- 30 Allison J, Amako K, Apostolakis J, *et al.* Recent developments in GEANT4[J]. *Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section A*, 2016, **835**: 186 - 225. DOI: [10.1016/j.nima.2016.06.125](https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125).
- 31 Agostinelli S, Allison J, Amako K, *et al.* GEANT4—a simulation toolkit[J]. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, **506**(3): 250 - 303. DOI: [10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8).
- 32 Luo W, Lan H Y, Xu Y, *et al.* Implementation of the n-body Monte-Carlo event generator into the Geant4 toolkit for photonuclear studies[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2017, **849**: 49 - 54. DOI: [10.1016/j.nima.2017.01.010](https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.01.010).
- 33 Koning A J, Rochman D, Sublet J C, *et al.* TENDL: complete nuclear data library for innovative nuclear science and technology[J]. *Nuclear Data Sheets*, 2019, **155**: 1 - 55. DOI: [10.1016/j.nds.2019.01.002](https://doi.org/10.1016/j.nds.2019.01.002).
- 34 National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. NuDat 3.0[EB/OL]. 2022. <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>.
- 35 Günther M M, Rosmej O N, Tavana P, *et al.* Forward-looking insights in laser-generated ultra-intense γ -ray and neutron sources for nuclear application and science[J].

- Nature Communications, 2022, **13**(1): 170. DOI: [10.1038/s41467-021-27694-7](https://doi.org/10.1038/s41467-021-27694-7).
- 36 Fan W R, Qi W, Zhang J L, *et al.* Efficient production of the nuclear isomer ^{93m}Mo with laser-accelerated proton beam and its astrophysical implication on ^{92}Mo production [J]. Physical Review Research, 2023, **5**(4): 043120. DOI: [10.1103/physrevresearch.5.043120](https://doi.org/10.1103/physrevresearch.5.043120).
- 37 Vandenbosch R, Huizenga J. Isomeric cross-section ratios for reactions producing the isomeric pair $\text{Hg}^{197, 197m}$ [J]. Physical Review, 1960, **120**(4): 1313 - 1318. DOI: [10.1103/PhysRev.120.1313](https://doi.org/10.1103/PhysRev.120.1313).
- 38 Huizenga J R, Vandenbosch R. Interpretation of isomeric cross-section ratios for (n, γ) and (γ , n) reactions[J]. Physical Review, 1960, **120**(4): 1305 - 1312. DOI: [10.1103/PhysRev.120.1305](https://doi.org/10.1103/PhysRev.120.1305).
- 39 Zhang J L, Qi W, Fan W R, *et al.* Study of the isomeric yield ratio in the photoneutron reaction of natural holmium induced by laser-accelerated electron beams[J]. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2023, **10**: 1265919. DOI: [10.3389/fspas.2023.1265919](https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1265919).