

核物理主题数据: 实验、理论与应用专题

探测器高能伽马效率刻度用放射性 核素 ^{56}Co 的衰变数据*

田榕赫¹⁾ 杨东^{2)†} 于伟翔¹⁾ 黄小龙¹⁾ 李小安³⁾ 石明松³⁾

1) (中国原子能科学研究院, 中国核数据中心, 北京 102413)

2) (吉林大学物理学院, 长春 130012)

3) (国家卫生健康委核技术医学转化重点实验室 (绵阳市中心医院), 绵阳 621099)

(2025年6月9日收到; 2025年7月23日收到修改稿)

^{56}Co 衰变释放的 γ 射线能量范围为 0.84—3.55 MeV, 其衰变数据是探测器效率刻度的重要依据. 早期针对 ^{56}Co γ 相对强度测量数据在 $E_\gamma > 2.5$ MeV 的高能区存在系统性偏差. 针对此问题, 本研究基于核科学参考文献库 (Nuclear Science References, NSR) 中的实验测量数据, 重点综合了 2000 年后的 5 项高精度实验测量结果, 对半衰期及 γ 发射几率等关键衰变数据进行系统分析, 给出了一套可用于探测器效率刻度的 ^{56}Co 衰变推荐数据. 在 高能区段, 本工作所给出结果低于 ENSDF 现有评价数据约 2%. 该推荐数据适用于高能伽马探测器的效率刻度, 可为 $E_\gamma > 2.5$ MeV 能区提供更准确的参考依据. 本文数据集可在科学数据银行数据库 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00169> 中访问获取.

关键词: 效率刻度, 高能伽马, 衰变数据**PACS:** 06.20.fb, 23.50.+z, 29.87.+g**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250743**DOI:** 10.7498/aps.74.20250743

1 引言

探测器效率校准是核能谱学中每项测量中不可或缺的一部分, 它们需要一组覆盖了足够宽的能量范围校准源的可靠数据. 这些数据通常分散在许多出版物中, 难以系统获取, 高能区 γ 数据尤其如此. 该能区效率校准精度长期提升缓慢, 其主要原因在于早期 γ 相对强度评价数据过度依赖 Phelps 等^[1] 和 Camp 等^[2] 的测量结果. 1975 年 McCallum 和 Goote^[3] 指出 ^{56}Co γ 射线相对强度在 高能区存在系统偏差, 当 $E_\gamma > 2.5$ MeV 时须进行修正.

最新的探测器效率刻度用衰变数据可查阅

1991 年发表的总结报告 (IAEA-TECDOC-619)^[4], 在该报告中已经注意到高能区标准源数据存在分歧, 并指出 ^{56}Co 早期研究中对 2 MeV 以上能区, γ 测量主要依赖于将低能的探测效率外推至高能区, 由此导致了误差. 但由于缺少比较精密的测量数据, 因而只在原推荐数据的基础上把高能区的不确定度扩大, 以便包括所有测量数据, 如把 $E_\gamma = 4.8$ MeV 点不确定度可扩大到约 27%. 最新的评价核结构数据库数据可参阅霍俊德等^[5] 评价工作, 但其与近年来的高精度实验测量结果^[6,7] 之间仍存在较大分歧.

为了得到更好的评价衰变数据, 需要准确、严格评价实验数据. 本文利用核科学参考文献库 (Nuclear Science References, NSR) 中的实验测量

* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFA1602000) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dyang@jlu.edu.cn

数据, 对半衰期、 γ 发射几率等主要衰变数据进行重点分析, 特别考虑了近期完成精密测量的数据, 包括 Yu 等 [6], Raman 等 [8], Molnar 和 Belgya [9], Baglin 等 [10], 以及 Dryak 和 Kovar [7] 的工作. 在此基础上, 进行了更新评价, 总结给出了重新评价的重要推荐结果. 本文在评价核衰变数据时, 不仅选取最好的测量数据, 而且若有必要还将这些数据作重新分析与计算, 以提供更精确的推荐数据, 来推动高能伽马效率刻度用衰变数据的深入与发展.

2 方法

数据评价最重要的基础是实验测量数据. 核衰变数据多分散发表在各种杂志、期刊、会议录、年报、内部报告、私人通讯及博士论文等资料中, 为保证评价数据的有效性, 通常通过 NSR, Google, Sci-hub 等数据库, 收集整理测量数据, 以保证实验信息收集的完整. 在搜集所有实验数据特别是新实验数据的基础上, 从相关文章中了解其测量方法技术及数据特点, 分析、比较所有数据, 经筛选、适当取舍或用新标准重新归一后, 重新推荐“最佳”实验数据.

如果只有一家测量, 直接推荐这家实验测量数据作为最终推荐数据; 若有多家测量, 则需要对这些实验数据进行加权平均处理, 该加权平均值将作为最终推荐数据. 假定对某一衰变数据, 有 n 家测量, 相应的测量可记为 x_i ($i = 1, 2, \dots, N$), σ_i 为其不确定度, 相应权重 $w_i = 1/\sigma_i^2$, N 为总的测量次数. 若部分测量没有给出测量误差, 例如早期的测量大多都是如此, 则可用算术平均作为评价数据. 算术平均只与测量值本身有关. 算术平均值 x_u 及其标准偏差 σ_u 可表述为

$$x_u = \frac{1}{N} \sum x_i, \quad (1)$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_u)^2}{N(N-1)}}. \quad (2)$$

算术平均法是最早使用的数学处理方法, 它直接取测量数据的算术平均值, 不考虑测量数据的不确定度.

若每个测量都给出了测量误差, 原则上采用平均值作为最终评价数据. 加权平均法以测量数据的不确定度作权, 其加权平均值 x_w 为

$$x_w = \frac{\sum x_i w_i}{\sum w_i}. \quad (3)$$

相应的不确定度取二者之较大值:

$$\sigma_{\text{inn}} = \sqrt{1/\sum w_i}, \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{ext}} = \sqrt{\sum_i \frac{(x_i - x_w)^2}{\sigma_i^2 \times (n-1)}} \times \sqrt{\frac{1}{\sum_i w_i}}. \quad (5)$$

3 数据内容

^{56}Co 通过正电子发射和电子俘获衰变为 ^{56}Fe , 主要通过 $^{56}\text{Fe}(p, n)$ 核反应产生, 其衰变纲图可直接采用霍俊德等 [5] 的评价结果, 该评价对先前已知所有实验测量数据作了仔细分析, 评价给出了 ^{56}Fe 的 15 条核能级, 同时包括 46 条 γ 射线, 相关的 $J\pi$ 值和 γ 射线多极性也取自霍俊德等的评价结果.

3.1 半衰期

^{56}Co 衰变 Q 值 (4566.6(4) keV) 取自王猛等 [11] (2021 年) 的 AME 2020 原子质量评估. 图 1 给出了 ^{56}Co 半衰期实验测量数据. 其中 Emery 等 [12] (1972) 和 Cressy [13] (1974) 两家测量根据 Chauvenet 统计标准 [14] 而作的统计检验出界, 本评价不予采用. 其余 10 家实验测量数据根据加权平均法进行处理, 本评价推荐的半衰期 $T_{1/2} = 77.245(28)$ d. 图中具体数据详见补充材料表 A1 (online).

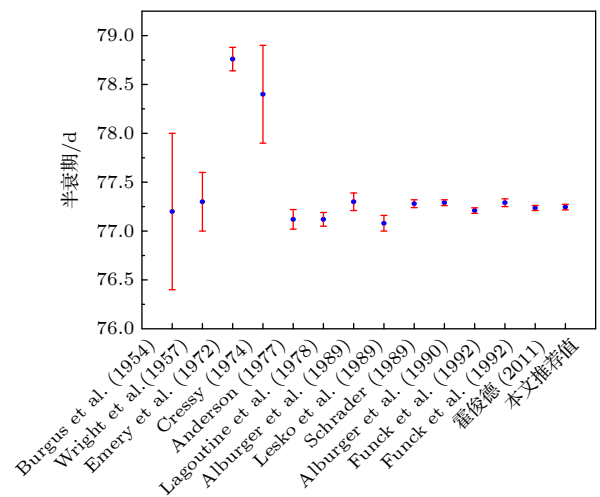


图 1 不同文献测量与本工作 ^{56}Co 半衰期评价推荐结果对比

Fig. 1. Comparison of ^{56}Co half-life measurements from different literature and the recommended results of this work.

3.2 γ 射线能量和强度

关于 γ 射线的能量,共有3家比较精确的实验测量:1980 St20^[15],1989 Al25^[16]和1990 Me15^[17].2000 He14^[18]利用 γ 射线的测量数据进行最小二乘法拟合,以此得到⁵⁶Fe激发能级的能量,然后用激发能级的能量计算在其2条能级间的 γ 跃迁能量,此计算值就作为评价推荐能量.本评价直接取2000 He14的评价数据作为 γ 射线能量的评价推荐数据.关于 γ 射线的强度,所收集到的测量数据详见补充材料表A2(online),同时该表也给出了这些测量数据加权平均处理得到的评价数据及说明.

1975年,McCallum和Coote^[3]指出⁵⁶Co γ 射线相对强度在 高能区存在系统偏差,当 $E_\gamma > 2.5$ MeV时须进行修正.为了得到更好的评价数据,2000年后国际上出现了几家非常重要的实验测量,如Yu等^[6],Raman等^[8],Molnar和Belgya^[9],Baglin等^[10]和Dryak和Kovar^[7]的工作.本文更新评价时重点考虑了这些新的高精度测量数据.

首先用Chauvenet法剔除数据中异常(又称过界数据)部分,即偏离大多数数据(约占全部实验数据约11%),余下的数据用多种数据处理方法(加权平均WM和Rajebal法RA^[19])分别处理,然后评价者根据个人判断选择其中之一作为最终推荐值.例如从推荐值选取来源可以发现 $E_\gamma \leq 2598$ keV是来自全部数据,而对 γ 2598 keV和 γ 3253 keV两条射线,只取2000年以后三家测量数据的加权平均.

γ 射线发射几率是根据补充材料表A2(online)中采用的 γ 射线相对强度和归一化系数 N 计算得出的. N 由以下公式得出:

$$N = 100 / [I(\gamma 847)(1 + \alpha T(\gamma 847)) + I(\gamma 2657) + I(\gamma 3370)] = 0.999417. \quad (6)$$

特别地,湮灭辐射发射概率 $I_{\gamma_\pm} = 2 \times P_{\beta^+} = 40.1 > (8)\%$.

4 结 果

表1给出了探测器效率刻度用的⁵⁶Co衰变的主要核数据,包括半衰期、 γ 射线能量及其绝对强度,同时也给出了ENSDF数据库^[5]和IAEA 1991年发表的探测器效率刻度推荐用数据^[4],方便用户参阅.

表1 评价推荐⁵⁶Co衰变数据(半衰期:77.245(28) d)
Table 1. Evaluated and recommended decay data for ⁵⁶Co (half-life: 77.245(28) d).

辐射类型	能量/keV	绝对强度/% (本工作)	绝对强度/% (ENSDF)	绝对强度/% (IAEA)
半衰期		77.245(28) d	77.236(26) d	77.236(26) d
γ_1	263.41(10)	0.023(2)	0.0220(3)	
γ_2	411.38(8)	0.0254(25)	0.024(3)	
γ_3	486.54(11)	0.057(5)	0.0540(20)	
γ_4	655.0(8)	0.043(5)	0.043(4)	
γ_5	674.7(8)	0.031(5)	0.024(3)	
γ_6	733.5085(23)	0.191(4)	0.191(3)	
γ_7	787.7391(23)	0.310(5)	0.311(3)	
γ_8	846.7638(19)	99.9417(32)	99.9399(23)	99.9399(23)
γ_9	852.78(5)	0.049(3)	0.049(3)	
γ_{10}	896.503(7)	0.071(4)	0.073(3)	
γ_{11}	977.363(4)	1.422(7)	1.421(6)	1.422(7)
γ_{12}	996.939(5)	0.113(4)	0.111(4)	
γ_{13}	1037.8333(24)	14.06(5)	14.05(4)	14.03(5)
γ_{14}	1089.03(24)	0.054(7)	0.055(4)	
γ_{15}	1140.356(7)	0.1329(30)	0.132(3)	
γ_{16}	1159.933(8)	0.091(5)	0.094(6)	
γ_{17}	1175.0878(22)	2.254(7)	2.252(6)	2.249(9)
γ_{18}	1198.78(20)	0.047(5)	0.049(5)	
γ_{19}	1238.2736(22)	66.41(17)	66.46(12)	66.41(16)
γ_{20}	1272.2(6)	0.0195(10)	0.0200(7)	
γ_{21}	1335.380(29)	0.1219(30)	0.1224(12)	
γ_{22}	1360.196(4)	4.280(21)	4.283(12)	4.280(13)
γ_{23}	1442.75(8)	0.180(4)	0.180(4)	
γ_{24}	1462.34(12)	0.0777(11)	0.074(4)	
γ_{25}	1640.450(5)	0.0616(30)	0.0616(19)	
γ_{26}	1771.327(3)	15.43(4)	15.41(6)	15.45(4)
γ_{27}	1810.726(4)	0.640(5)	0.640(3)	
γ_{28}	1963.703(11)	0.7036(30)	0.707(4)	
γ_{29}	2015.176(5)	3.018(15)	3.016(12)	3.017(14)
γ_{30}	2034.752(5)	7.749(20)	7.77(3)	7.741(13)
γ_{31}	2113.092(6)	0.376(4)	0.377(3)	
γ_{32}	2212.898(3)	0.388(4)	0.388(4)	
γ_{33}	2276.36(16)	0.119(5)	0.118(4)	
γ_{34}	2373.7(4)	0.081(6)	0.080(4)	
γ_{35}	2523.0(8)	0.061(5)	0.059(4)	
γ_{36}	2598.438(4)	16.76(8)	16.97(4)	16.96(4)
γ_{37}	2657.4(8)	0.019(3)	0.0190(17)	
γ_{38}	3009.559(4)	1.027(12)	1.036(13)	1.038(19)
γ_{39}	3201.930(11)	3.176(18)	3.209(12)	3.203(13)
γ_{40}	3253.402(5)	7.656(30)	7.923(21)	7.87(3)
γ_{41}	3272.978(6)	1.810(14)	1.8759(20)	1.855(9)
γ_{42}	3369.69(30)	0.0097(10)	0.0101(7)	
γ_{43}	3451.119(4)	0.926(9)	0.949(5)	0.942(6)
γ_{44}	3547.93(6)	0.1939(20)	0.1955(15)	
γ_{45}	3600.7(4)	0.0163(7)	0.0167(5)	
γ_{46}	3611.8(8)	0.0084(4)	0.0086(3)	
γ^\pm	511.0	40.1(8)	39(3)	

为更直观地展示本工作推荐数据与 ENSDF 评价数据在 高能区的差异, 图 2 绘制了二者 γ 射线绝对强度的比值, 可以看出, 在 $E_\gamma < 2.5$ MeV 能区, 数据点密集分布于 1.0 附近, 表明两者高度一致; 然而, 随着能量升高, 特别是当 $E_\gamma > 2.5$ MeV 时, 比值系统地低于 1.0, 印证了本工作在引言及前文所述的观点: 现有 ENSDF 评价在 高能区存在约 2% 的系统性高估。

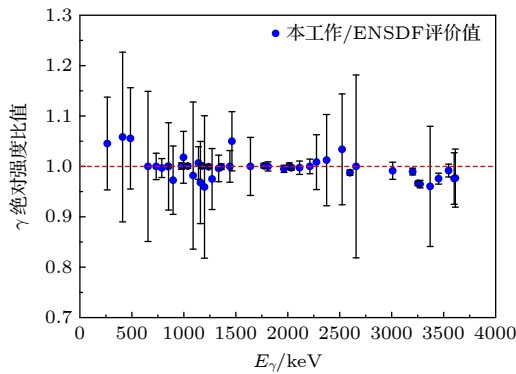


图 2 ^{60}Co γ 射线绝对强度比值 (本工作与 ENSDF 评价值对比)

Fig. 2. Comparison of absolute γ -ray intensity ratios for ^{60}Co : Present work vs. ENSDF evaluated data.

5 结 论

本工作利用核科学参考文献库中的实验测量数据, 对半衰期、 γ 发射几率等主要衰变数据进行了重点分析, 总结给出了用于探测器高能伽马效率刻度用的评价衰变数据. 在 $E_\gamma < 2.5$ MeV 能区, 本工作发表新的评价数据与 ENSDF 评价 (霍俊德等 [5]) 和 IAEA 1991 年发表的总结报告 [4] (IAEA-TECDOC-619) 的评价结果高度一致; 然而在 高能区即 $E_\gamma > 2.5$ MeV 能区, 本工作的数值要低于现有评价数据约 2%. 本文所有数据集均以 ENDF 和 ENSDF 格式在补充材料 (online) 中给出.

γ 射线探测器的效率刻度在 $E_\gamma = 0.05$ —2.0 MeV 能区已经有比较成熟的多种标准源纲图数据, 当前的差异是由于源绝对强度值的偏差和刻度时一些细节处理不当造成, 因而在评价时可用常

规的方法如取平均即可. 然而, 在 $E_\gamma > 2.5$ MeV 的高能区, 现有数据质量参差不齐, 一致性较差, 尚未形成可靠共识. 本工作表明, 在该能区需不断探索更有效的评价方法, 细心甄别和验证不同测量结果. 未来可通过发展更高精度的符合测量技术、优化放射源制备与绝对活度标定方法等途径, 以逐步提升高能区效率刻度数据的准确性与可靠性.

数据可用性声明

支撑本研究成果的数据集可在科学数据银行数据库 <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00169> 中访问获取.

参考文献

- [1] Phelps M, Sarantites D, Winn W 1970 *Nucl. Phys. A* **149** 647
- [2] Camp D C, Meredith G L 1971 *Nucl. Phys. A* **166** 349
- [3] McCallum G J, Coote G E 1975 *Nucl. Instrum. Methods* **124** 309
- [4] Bambynek W, Barta T, Jedlovsky R, Christmas P, Coursol N, Debertain K, Helmer R, Nichols A, Schima F, Yoshizawa Y 1991 report IAEA/TECDOC-619
- [5] Huo J, Huo S, Yang D 2011 *Nucl. Data Sheets* **112** 1513
- [6] Yu W, Huang X, Chen X, Lu H 2009 *Nucl. Sci. Tech.* **20** 363
- [7] Dryak P, Kovar P 2008 *Appl. Radiat. Isot.* **66** 711
- [8] Raman S, Yonezawa C, Matsue H, Iimura H, Shinohara N 2000 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **454** 389
- [9] Molnar Z R G, Belgia T 2002 *INDC (NDS)* **437** 23 (Appendix4)
- [10] Baglin C, Browne E, Norman E, Molnár G, Belgia T, Révay Z, Szelecsényi F 2002 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **481** 365
- [11] Wang M, Huang W J, Kondev F G, Audi G, Naimi S 2021 *Chin. Phys. C* **45** 030003
- [12] Emery J F, Reynolds S A, Wyatt E I, Gleason G I 1972 *Nucl. Sci. Eng.* **48** 319
- [13] Cressy P J 1974 *Nucl. Sci. Eng.* **55** 450
- [14] Funck E, Schötzig U, Woods M, Sephton J, Munster A, Dean J, Blanchis P, Chauvenet B 1992 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **312** 334
- [15] Stewart N, Shaban A 1980 *Z. Phys. A: At. Nucl.* **296** 165
- [16] Alburger D, Warburton E, Tao Z 1989 *Phys. Rev. C* **40** 2891
- [17] Meyer R A 1990 *Fizika* **22** 153
- [18] Helmer R, Van der Leun C 2000 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **450** 35
- [19] Rajput M, Mac Mahon T 1992 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A* **312** 289

SPECIAL TOPIC—Thematic data in nuclear physics: Experimental, theoretical and applied research

Decay data of radionuclide ^{56}Co for high-energy gamma efficiency calibration of detectors*

TIAN Ronghe¹⁾ YANG Dong^{2)†} YU Weixiang¹⁾ HUANG Xiaolong¹⁾
LI Xiaoan³⁾ SHI Mingsong³⁾

1) (*Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

2) (*College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China*)

3) (*NHC Key Laboratory of Nuclear Technology Medical Transformation (Mianyang Central Hospital), Mianyang 621099, China*)

(Received 9 June 2025; revised manuscript received 23 July 2025)

Abstract

^{56}Co , with γ -ray energies covering the ranging from 0.84–3.55 MeV, is an important radionuclide for calibrating Ge detector. Based on the main measurements of D. C. Camp et al. (Camp D C, Meredith G L 1971 *Nucl. Phys. A* **166** 349) and M. E. Phelps et al (Phelps M, Sarantites D, Winn W 1970 *Nucl. Phys. A* **149** 647). before 2000, the probability of γ -ray emission is evaluated and recommended. The values reported by D. C. Camp, however, are systematically lower in high energy range. In this work, using the experimental measurements obtained from the Nuclear Science Reference Library, the main decay data, such as half-life and γ -ray emission probabilities, are evaluated and summarized. In the $E_\gamma < 2.5$ MeV energy region, the new evaluation data in this work are in good agreement with the results of the ENSDF evaluation (Huo J, Huo S, Yang D 2011 *Nucl. Data Sheets* **112** 1513) and the summary report published by IAEA in 1991 (Bambynek W, Barta T, Jedlovsky R, Christmas P, Coursol N, Debertain K, Helmer R, Nichols A, Schima F, Yoshizawa Y 1991 report IAEATECDOC-619). However, in the high-energy region, i.e., in the $E_\gamma > 2.5$ MeV energy region, the present work gives lower values than the other evaluation data. The deviation at 3.4 MeV is as high as 2.7%. Rationality of the present evaluation and corrected method will be dependent on new measurements, and more precise standard data are desirable. The datasets presented in this paper, including the ENDF and ENSDF format decay data files for ^{56}Co , may be available at <https://doi.org/10.57760/sciencedb.j00213.00169>.

Keywords: detector efficiency calibration, high-energy γ -rays, nuclear decay data

PACS: 06.20.fb, 23.50.+z, 29.87.+g

DOI: 10.7498/aps.74.20250743

CSTR: 32037.14.aps.74.20250743

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2022YFA1602000).

† Corresponding author. E-mail: dyang@jlu.edu.cn

探测器高能伽马效率刻度用放射性核素⁵⁶Co的衰变数据

田榕赫 杨东 于伟翔 黄小龙 李小安 石明松

Decay data of radionuclide ⁵⁶Co for high-energy gamma efficiency calibration of detectors

TIAN Ronghe YANG Dong YU Weixiang HUANG Xiaolong LI Xiaoan SHI Mingsong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 190601 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250743

CSTR: 32037.14.aps.74.20250743

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250743>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于变分自编码器的伽马单中子出射反应截面实验数据离群点研究

Outliers identification of experimental (γ, n) reaction cross section via variational autoencoder

物理学报. 2025, 74(8): 082501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241775>

高性能PIN-硅探测器的研制及其在高能放射性核束实验中的应用测试

Development of high performance PIN-silicon detector and its application in radioactive beam physical experiment

物理学报. 2023, 72(12): 122902 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230213>

基于神经网络方法研究 β 衰变释放粒子的平均能量数据

Average energy data of β decay nuclei based on neural networks

物理学报. 2025, 74(18): 182901 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250655>

基于量子计算的高能核物理研究

Quantum computing based high-energy nuclear physics

物理学报. 2023, 72(20): 200303 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230907>

强激光驱动高能极化正负电子束与偏振伽马射线的研究进展

Review on laser-driven high-energy polarized electron and positron beams and γ -rays

物理学报. 2021, 70(8): 087901 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210009>

中子诱发伽马产生截面测量中的谱分析技术

Spectral analysis techniques in measuring neutron-induced gamma production cross-section

物理学报. 2024, 73(7): 072901 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231980>