

探测器校准用的 6130 keV 单能 γ 源

丁锡祥 丁声耀 汪幼梅 杨小芸 叶宗垣 李宇兵

(中国原子能科学研究院计量测试部, 北京, 102413)

通过混合 ^{238}Pu α 辐射体和 ^{13}C 制得单能 6130 keV 高能 γ 射线校准源, 测量了 HPGe 探测器效率、标准源的中子发射率、 γ 射线能谱及其发射率, 讨论了不同投料比和工艺。

关键词 高能 γ 射线 高能 γ 校准源 γ 探测器

γ 射线谱仪的刻度, 在 2 MeV 以下可利用一组不同的源或单个多线源。大于 2 MeV 能区, 同位素 ^{56}Co 源在 $E_{\gamma} \leq 3.62$ MeV 也能可靠地用于谱仪刻度^[1]。Am-Be 或 Pu-Be 中子源能提供 4.44 MeV 的 γ 射线, 但由于 Doppler 效应对 γ 能量宽度有约 1% 的贡献, 不宜用于 HPGe γ 探测器能量分辨测试。因此超过 3.5 MeV 的高能区范围, 没有合适的 γ 放射源。而许多电离辐射的应用, 如反应堆物理、核物理及天体物理、剂量学、核电站的核安全及防护、中子俘获 γ 射线分析等已将能区扩展到了 3.5 MeV 以上。利用核反应产生的高能 γ 射线源, 或采用半经验公式将低能校准曲线朝高能外推, 这些解决办法既昂贵又费时, 常常是不精确的。

1 高能 γ 射线源的制备

研制了一个用于探测器能量分辨测试和效率校准的高能 γ 校准源, 它是利用 ^{238}Pu 和 ^{13}C 的混合物由 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应得到 6130 keV γ 射线。这一能量比以前得到的同位素源 γ 能量要高出约 40%, 且没有 Doppler 展宽效应。选择的 α 辐射体具有相当长的寿命, 同时不受辐射体本身 γ 辐射的干扰, 是一个既简便又合适的谱仪标准源。J. K. Dickens^[2] 采用类似的 ^{244}Cm 的 α 辐射体, 具有 18 a 的寿命, α 能量为 5.80 MeV。我们采用的 ^{238}Pu α 辐射体, 比 ^{244}Cm α 辐射体容易处理, 且有低得多的自发裂变率和较长的寿命(87 a), 便宜且容易获得。 ^{238}Pu 有 2 条主要的 α 射线, 能量为 5.499 和 5.455 MeV, 都高于形成 ^{16}O 的 6130 keV 激发态的入射能量(约 5.1 MeV) 而低于形成 ^{16}O 的 6.92 和 7.12 MeV 激发态的入射能量(分别是 6.15 和 6.40 MeV), 可产生一个单能的 γ 校准源^[3]。与 ^{244}Cm 的 5.80 MeV 的 α 能量比较, 在这个能区内 (α, n) 反应激发函数不是快速变化的^[4], 因此其源强与使用 ^{244}Cm 是相当的。与文献[3]比较, 在投料比上我们的源更趋于合理, 且有更高的 6130 keV γ 射线产额。

采用国产 $^{238}\text{PuO}_2$ 原料(4.81×10^{11} Bq/g), ^{238}Pu 的核纯度为 75%, 主要杂质有 ^{239}Pu (约 10%) 和 ^{234}U (13%)。 ^{13}C 为固体粉末, 产自美国 Isotec INC, 核纯度为 99%。采用干法制备工

收稿日期: 1995-08-28 收到修改稿日期: 1995-09-20

艺,把2种材料45 mg $^{238}\text{PuO}_2$ 和660 mg $\text{Ba}^{13}\text{CO}_3$ (国产,相当于43 mg ^{13}C)在研钵中混合均匀,安放在装料壳里,用油压机(4 T)压缩成型,剩余空间用Al块填充,然后用双层氩弧焊密封,制得源外形尺寸为 $\phi 16\text{ mm} \times 19\text{ mm}$ (源芯部分为 $\phi 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$)。为了使 ^{238}Pu 均匀分散在 ^{13}C 中,最好采用湿法工艺。先把 $^{238}\text{PuO}_2$ 用6 mol/l HNO_3 和0.05 mol/l HF 混合液溶解,按一定比例(表1)滴入预先称好的 ^{13}C 粉中,置于红外灯下烤干,装入模具内加压成型,把压制成的源芯装入装料壳,置于管式电炉内在氩气保护下加热,逐步升温到 800°C ,使硝酸钚充分分解转化成 PuO_2 。冷却后取出,容器剩余空隙填入Al料,装入源壳。为了增加安全性和便于携带,将源置于另一个Al的保护容器中。

表1 $^{238}\text{Pu}-^{13}\text{C}$ γ 源测量结果和投料配比Table 1 The measurement results and the material ratio of $^{238}\text{Pu}-^{13}\text{C}$ γ source

制作地	^{238}Pu		^{13}C	C-Pu比		中子		γ	γ -n比	尺寸 ϕ /mm \times mm	工艺	
	m/mg	I/ 10^{10}Bq	m/mg	质量比	原子比	/ 10^5s^{-1}	/ $10^5\text{s}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}/10^8\text{s}^{-1}$	/%				
本	PC-001	45.0	2.16	60	1.3	24	0.20	1.30	0.28	1.35	16 \times 19	干法
	PC-01	50.0	2.41	500	10	183	1.88	10.7	8.41	4.47	16 \times 19	湿法
	PC-02	100.0	4.81	1000	10	183	3.73	10.6	15.9	4.27	20 \times 25	湿法
工	PC-110	37.5	1.81	300	8	146	1.51	11.4	6.89	4.57	12 \times 25	湿法
	PC-111	25.0	1.20	300	12	220	1.20	13.7	5.50	4.58	12 \times 25	湿法
	PC-112	31.5	1.52	300	9.6	176	1.30	11.7	5.71	4.39	12 \times 25	湿法
作	PC-113	18.8	0.91	300	16	293	0.87	13.1	3.96	4.55	12 \times 25	湿法
	Harwell	10.0	0.50	200	20	356	0.45	10.4	0.77	1.71		干法
法	Saclay	50.0		1000	16.7	305	1.46		4.90	3.36	9 \times 20	干法
英	Amersham	200.0	13.0	1800	9	165	4.00	4.22			22.4 \times 31	[8]

2 测量和讨论

测量了n型HPGe探测器的效率。此探测器是美国ND公司生产,型号为NIGC-2520,体积为 $\phi 56\text{ mm} \times 59\text{ mm}$,对于1332 keV γ 射线能量分辨为1.8 keV。利用NaCl的成份单一且稳定的特点,可方便可靠地用于探测器效率刻度。Cl的热中子俘获 γ 射线具有能量分辨好、能区宽(1.5-8.6 MeV)、强度适中、Na俘获中子后具有14.95 h的半衰期,分支比单一,能量便于测量。根据放射性的生成和衰变规律可计算得到 ^{24}Na 的生成率。利用Na的热中子俘获截面,可得到Cl的热中子俘获率,进而得到探测器的探测效率值^[5]。为了得到探测器的本征效率值,在不同距离下测量探测器(28.5-64.3 cm内改变4个距离)对放射源的探测效率值,再由效率值与距离平方成反比关系进行拟合得到不同能量 γ 射线的本征效率值。另一种刻度方法是利用 $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)$ 反应产生的6130 keV γ 射线。当 $E_p = 340\text{ keV}$ 、 γ 射线相对入射质子方向为 $\theta = 55^\circ$ 时,由反应产生的 α 粒子数和 γ 射线数一一对应。同时测量可定出探测器的绝对效率,并在28.5-100 cm间的5个距离上进行了测量,以获得探测器的本征效率^[6]。由此得到在6130 keV能量点探测器的本征效率值为 $(1.32 \pm 0.05)\%$ 。两种方法的测量结果在5%内符合。用效率刻度过的探测器测量了该源的脉冲幅度谱。放射源面中心至探测器中心纵向剖面距离为31 cm。为减少中子对探测器的损害及低能 γ 和散射中子对测量的影响,在探测

器晶体外罩上一屏蔽帽(由内向外的材料为 1.5 mm 有机玻璃、3 mm Pb 层、2 mm 硝酸锂粉末填充层、0.5 mm Cd 和 2.5 mm 不锈钢壳)。测量的脉冲谱示于图 1。测量时间为 8000 s。图中 6130 keV 的全能峰,单、双逃逸峰清晰可见。

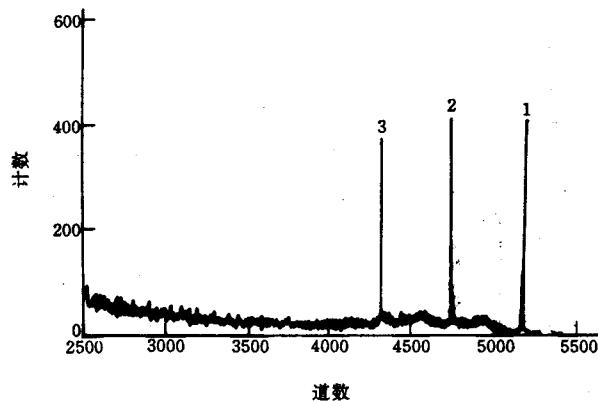


图 1 Pu-C 6.13 MeV 高能 γ 谱

Fig. 1 Pu-C 6.13 MeV high energy gamma-ray spectrum

1——全能峰;2——单逃逸峰;3——双逃逸峰

中子发射有两种情况,即 (α, n) 反应和自发裂变。与 (α, n) 反应比较,自发裂变中子可以忽略。当低于 5.5 MeV 的 α 粒子被 ^{13}C 吸收后形成 ^{17}O 的 6.4 - 10.6 MeV 的激发态时,通过发射中子衰变到 ^{16}O 态,因此产生一个很宽的中子能量谱。用 $E_\alpha = 5.5$ MeV 的 α 粒子轰击一个厚碳靶得到平均中子能量为 (4.05 ± 0.14) MeV^[7]。用锰浴法测量放射源的总中子产额。

对于 ^{238}Pu - ^{13}C 源而言,感兴趣的不是中子而是 (α, n) 反应生成的 ^{16}O 核退激时放出的 6130 keV γ 光子。因此投料量不变,要得到最大 γ 效应必须使 ^{238}Pu 充分分散并与 ^{13}C 保持良好的接触,以保证 (α, n) 反应的顺利进行。另外, α 入射途中仅允许损失 0.4 MeV 的能量,不然,低于产生 6130 keV 激发态的入射能量将不产生所需的 γ 光子。因此改变一般机械混合的制作方案,采用液体分散方案。研究不同原子比得到 C 与 Pu 质量比接近或大于 10 时,中子产额趋于饱和。在所研制的七个源中,除了 PC-001 选用 $\text{Ba } ^{13}\text{CO}_3$ 作为靶材料外,其余选用成分为 99% ^{13}C 粉末。 γ 产额率与中子产额率比值均高于英国 Harwell^[3]和法国 Saclay 实验室所给出的数据。其主要原因除采用湿法工艺外,还由于采用在氩气保护下的高温灼烧,消除了使 α 平均入射能量衰减的重要因素—— ^{13}C 表面的水蒸汽。

当 ^{13}C 俘获一个能量为 5.12 - 6.14 MeV 的 α 粒子后,通过发射中子衰变到 ^{16}O 的 O^+ 基态、 O^+ 第一激发态或 3^- 第二激发态。其中 3^- 态的衰变产生感兴趣的 6130 keV γ 射线,而 O^+ 第一激发态只通过内转换衰变。中子能谱中的低能峰是通过 ^{16}O 的第一、二激发态衰变产生的中子,可以得到从 ^{17}O 发射中子衰变到 ^{16}O 第二激发态发射的 γ 光子平均约占总中子数的 4.5% (表 1)。在用 BaCO_3 靶材料时,由于元素 Ba 的影响,使 γ 产额降低。

观察到的主要本底是与辐射体相关联的若干强峰。最靠近的一个强峰是由于 ^{238}Pu 中 ^{236}Pu 污染的 2615 keV 的 Thc'' 线。 $E_\gamma = 1240$ keV 线是因为在不锈钢中 ^{56}Fe 的中子激发及铝、

锰等杂质引起的中子激发峰和如 ^{40}K 等的天然本底峰。测量的总不确定度为8%。中子发射率的总不确定度 $\leq 3\%$ 。

对王志强同志参加的部分测量及容超凡同志的关心和支持表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Scott HL, Van Patter DM. Intensities of Gamma Rays From the Calibration Source ^{56}Co . Phys Rev, 1969, 184:1111.
- 2 Dickens JK, Baybrz RD. A Monoenergetic 6130 keV Gamma-Ray Source for Detector Calibration. Nucl Instrum Methods, 1970, 85:143.
- 3 Mason JP. A 6130 keV Gamma-Ray Source Using $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ Reaction. Nucl Instrum Methods, Phys Res, 1985, A241:207.
- 4 Spear RH, Larson JD, Rearson JD. Excitation Function for the Reaction $^{13}\text{C}(\alpha, n\gamma)^{16}\text{O}$. Nucl Phys, 1963, 41:353.
- 5 Ye Zongyuan, Ding Shengyao, Ding Xixiang, et al. Modified Method for Efficiency Calibration of High Energy γ Detector. Chin Nucl Lett, 1994, 11:12.
- 6 Ding Shenyao, Ye Zongyuan, Li Yubing, et al. Research of Quasi-Monoenergetic 6 - 7 MeV Photon Source. Chin Nucl Phys, 1989, 11:31.
- 7 Jacobs JGH, Liskien H. Energy Spectra of Neutrons Produced by α -Particles in Thick Targets of Light Elements. Ann Nucl Energy, 1983, 10:541.
- 8 Lorch Edgar A. Neutron Spectra of $^{241}\text{Am}/\text{E}$, $^{241}\text{Am}/\text{Be}$, $^{241}\text{Am}/\text{F}$, $^{242}\text{Cm}/\text{Be}$, $^{238}\text{Pu}/^{13}\text{C}$ and ^{252}Cf Isotopic Neutron Sources. International Journal of Applied Radiation and Isotopes, 1973, 24:585.

A 6130 keV γ -RAY SOURCE OF ^{238}Pu - ^{13}C FOR DETECTOR CALIBRATION

Ding Xixiang Ding Shenyao Wang Youmai Yang Xiaoyun Ye Zongyuan Wang Zhijiang

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-20, 102413)

ABSTRACT

A monoenergetic 6130 keV high energy γ -ray calibration source is produced by mixing the alpha emitter ^{238}Pu with ^{13}C . The efficiency of the detector is measured using both $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)$ reaction and to determine thermal neutron capture rate of NaCl compound methods. The γ -ray spectrum and emission rate and the neutron emission rate are determined. The different material ratio and the technology are discussed.

Key words High energy γ -ray Calibration source Gamma-ray detector