

# 用 Ge(Li) 探测器测量正电子 $3\gamma$ 湮没

吴关洪 王蕴玉 唐孝威

(中国科学院高能物理研究所)

1982 年 4 月 14 日收到

## 提 要

本文提出了用 Ge(Li) 探测器测量正电子  $3\gamma$  湮没的方法,只测量 511keV 峰区计数,就能确定  $3\gamma$  湮没与  $2\gamma$  湮没的相对份额. 我们称这种方法为“峰法”. 对“峰法”和“峰-谷法”的结果进行了比较.

## 一、引 言

正电子发生自由湮没时,主要释放两条 511keV  $\gamma$  射线,只有 1/372 几率发生  $3\gamma$  湮没. 当正电子与电子结合成正子素 Ps 时,由于三态 Ps 的形成几率是单态 Ps 的三倍,而三态 Ps 湮没释放  $3\gamma$ ,因此,在可以形成正子素的介质中  $3\gamma$  湮没增加. 测定  $3\gamma$  湮没与  $2\gamma$  湮没的相对份额  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  是研究正子素形成和转换,以及研究正子素化学的一种方法.

正电子  $3\gamma$  湮没能谱是连续的,从 0 到接近于 511keV (图 1)<sup>[1]</sup>. 早期研究  $3\gamma$  湮没使用  $3\gamma$  符合测量方法<sup>[2,3]</sup>,缺点是装置复杂、计数效率低. 1955 年 Hughes 等<sup>[4]</sup>、1961 年 Heyman 等<sup>[5]</sup>、1964 年 Bussolati 等<sup>[6]</sup> 曾利用 NaI(Tl) 探测器测量 511keV  $\gamma$  峰区和低能谷区的计数来推算正电子  $3\gamma$  湮没的相对份额. 由于 NaI(Tl) 探测器能量分辨率差,可选用的谷区受到限制.

我们用分辨率高的 Ge(Li) 探测器精细地测定在氧化镁和铝中的 511keV 湮没峰,发现 511keV 峰计数的增减与反映  $3\gamma$  湮没的谷区计数的增减之间有直接而简单的关系;只根据测量 511keV 峰区计数、不

必测量谷区计数,即可给出  $3\gamma$  湮没的数量特征;从而总结出利用 Ge(Li) 探测器测量峰计数来推算  $3\gamma$  湮没相对份额的“峰法”,并与同时测量峰、谷计数的“峰-谷法”做了比较.

本工作测定了正电子在氧化镁、聚四氟乙烯、 $\alpha$ -磷酸锂和气凝硅胶中  $3\gamma$  湮没的相对份额  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$ .

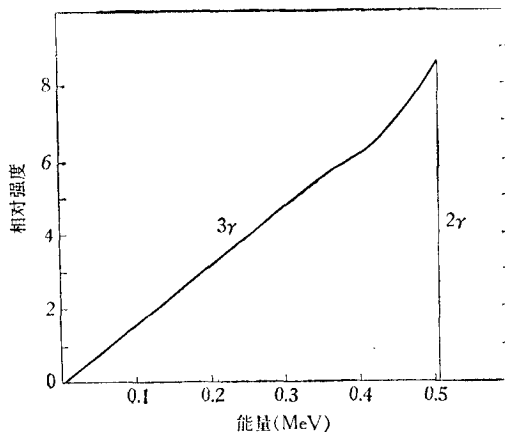


图 1  $3\gamma$  湮没能谱

## 二、实验方法

### 1. 仪器和样品

测量使用 CANBERRA 同轴型 Ge(Li) 探测器和 SCORPIO 3000 数据获取系统. 探测器本征体积为  $138\text{cm}^3$ . 对  $^{181}\text{Hf}$  的  $482\text{keV}$  能峰的半高全宽 (FWHM) 为  $1.43\text{keV}$ . 数据分析由在线的 PDP 11/04 计算机完成.

用  $^{22}\text{Na}$  正电子源, 源强  $\sim 7\mu\text{Ci}$ . 衬托为  $1\mu\text{m}$  厚的镍箔.  $^{22}\text{Na}$  放出正电子的同时发射一个  $1280\text{keV}$  的光子. 在利用峰法推算  $3\gamma$  相对份额时, 我们根据  $1280\text{keV}$  光子的计数, 来确定进入参照样品与被测样品的正电子数相等.

实验使用的氧化镁样品是化学纯粉末. 在  $120^\circ\text{C}$  下烘 2—4hr, 在干燥器中冷却. 称取  $1.5\text{g}$ , 用  $200\text{kg}/\text{cm}^2$  压力压成厚约  $0.22\text{cm}$  的片. 此时密度为  $1.39\text{g}/\text{cm}^3$ . 为了试验在密度不同的氧化镁中  $3\gamma$  湮没份额的变化, 我们取同样重量的氧化镁粉末, 用  $100\text{kg}/\text{cm}^2$  的压力压片, 得到密度为  $0.90\text{g}/\text{cm}^3$ 、厚度为  $0.34\text{cm}$  的片. 聚四氟乙烯样品为表面磨光的  $0.2\text{cm}$  厚的圆片.  $\alpha$ -碘酸锂为垂直  $z$  轴的切片, 以前曾用它做过加电场的实验. 气凝硅胶的密度为  $0.25\text{g}/\text{cm}^3$ , 处于真空环境中.

由于金属中一般不形成 ps 原子,  $3\gamma$  与  $2\gamma$  湮没的比保持为  $1/372$ . 所以, 我们选用退火的高纯铝作为参照样品. 铝片厚  $0.2\text{cm}$ , 表面经电解抛光.

为了尽可能保持对  $511\text{keV}$  和低能  $\gamma$  射线的吸收和散射相同, 在测量样品和测量参照样品铝时, 分别按图 2(a) 和 (b) 方式放置.

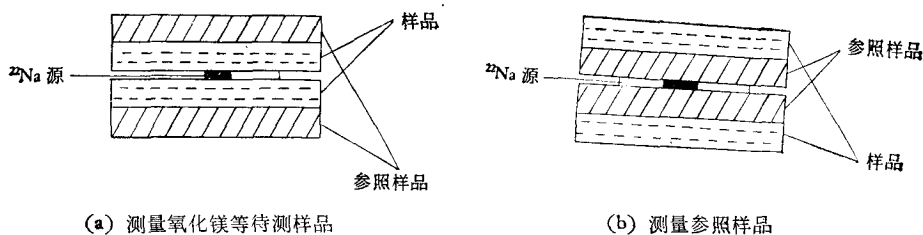


图 2 样品和参照样品的放置位置

### 2. 推算 $3\gamma$ 相对产额的方法

#### 1) 峰-谷法

峰-谷法是根据正电子  $3\gamma$  湮没释放的低于  $511\text{keV}$  的  $\gamma$  光子计数与  $511\text{keV}$  峰区计数之比, 来测定  $3\gamma$  与  $2\gamma$  湮没的相对份额  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$ . 由于在  $0-340\text{keV}$  范围内康普顿本底很大, 而属于  $3\gamma$  湮没的光子较少, 很难提取  $3\gamma$  湮没信息. 所以峰-谷法只是在  $400-500\text{keV}$  范围内选用适当的一段做为谷区计数, 再对在这一段中的  $3\gamma$  计数占总的  $3\gamma$  计数的份额做校正, 校正值  $\xi$  是根据图 1 的  $3\gamma$  湮没能谱求出的. 还需要校正探测器对  $2\gamma$  和  $3\gamma$  的平均探测效率  $\epsilon_2$  和  $\epsilon_3$ . 再考虑到  $2\gamma$  湮没与  $3\gamma$  湮没释放光子数目的比为  $2/3$ , 最后  $3\gamma$  湮没与  $2\gamma$  湮没的相对份额  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  可写成

$$\frac{Y_{3\gamma}}{Y_{2\gamma}} = \frac{\frac{I_{v_3}}{\epsilon_3 \xi} \times 2}{\frac{I_p}{\epsilon_2} \times 3} \quad (1)$$

$I_p$  为由 2 $\gamma$  湮没产生的 511keV 峰计数,  $I_{v_3}$  为在所取谷区内属于 3 $\gamma$  湮没的计数. 在此区内的总计数  $I_v$  包括  $I_{v_3}$  和由于多次康普顿散射以及电荷收集不完全而由峰区转来的计数  $I_{v_2}$ .  $I_{v_2}$  应与  $I_p$  成比例,  $I_{v_2} = k \cdot I_p$ .  $k$  是反映探测器特性的一个常数.

$$I_v = I_{v_3} + I_{v_2} = I_{v_3} + kI_p.$$

令

$$\frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} \times \frac{3}{2} = \eta,$$

则(1)式可写成

$$\frac{Y_{3\gamma}}{Y_{2\gamma}} = \frac{I_v - kI_p}{\eta \xi I_p} \quad (2)$$

为了求系数  $k$ , 我们测定正电子在退火的高纯铝中的湮没谱. 可以认为它的谷区计数  $\bar{I}_v = k\bar{I}_p$ . 根据铝中湮没谱的峰区计数  $\bar{I}_p$  和相应谷区的计数  $\bar{I}_v$  即可求得系数  $k$ .

2) 峰法

在入射正电子数目相等的条件下, 如果被测样品的 511keV  $\gamma$  峰计数是  $I_p$ , 参照样品铝的峰计数是  $\bar{I}_p$ , 则  $(\bar{I}_p - I_p)$  即是被测样品中 2 $\gamma$  湮没减少的数目, 也就是 3 $\gamma$  湮没增加数, 因此

$$\frac{Y_{3\gamma}}{Y_{2\gamma}} = \frac{\bar{I}_p - I_p + (I_p/372)}{I_p} = \frac{\bar{I}_p}{I_p} - \frac{371}{372} \quad (3)$$

根据 1280keV 光子的计数来确定待测样品和参照样品中进入正电子数目相等的条件.

峰法的优点在于只需测量 511keV 峰区计数, 不需要知道探测器的绝对效率因子, 也不需要理论提供的 3 $\gamma$  湮没能谱来校正所取谷区 3 $\gamma$  光子所占的份额, 从而消除了这两项校正引入的误差, 特别是避免了由于本底扣除不准而在使用谷区计数时引入的误差.

我们根据实验中引起误差的各项因素对峰法和峰-谷法的误差做了分析. 得出峰法的计算公式及其误差如下:

$$\frac{Y_{3\gamma}}{Y_{2\gamma}} = \left( \frac{\bar{I}_p}{I_p} - \frac{371}{372} \right) \pm \left( \frac{1}{I_p} \sqrt{\frac{\bar{I}_p}{I_p} + \bar{I}_p} + 0.06 \times 10^{-2} \right) \quad (4)$$

峰-谷法的计算公式及其误差如下:

$$\frac{Y_{3\gamma}}{Y_{2\gamma}} = \frac{I_v - kI_p}{\eta \xi I_p} \pm \left( \frac{k + \sqrt{k} + \sqrt{k + k^2}}{\eta \xi \sqrt{I_p}} + \frac{\Delta \eta}{\eta} \cdot \frac{Y_{3\gamma}}{Y_{2\gamma}} + 0.14 \times 10^{-2} \right) \quad (5)$$

### 三、实验结果和讨论

为了检验峰法和峰-谷法的可靠性和检验选取峰区和谷区的可变动范围, 我们用氧化

镁样品,在较宽的范围内改变峰区和谷区选取的起止道数,求得  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  值. 结果列于表 1 和表 2. 图3是在氧化镁和铝中湮没能谱的峰区与谷区的比较.

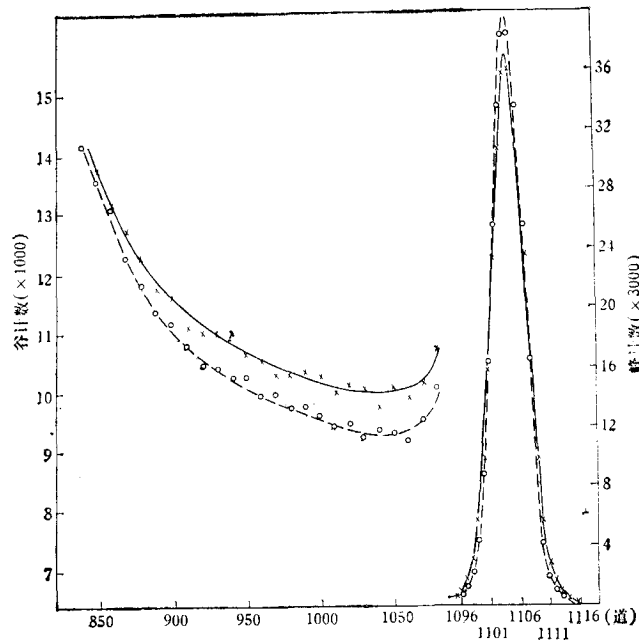


图 3

— 为待测样品氧化镁; ---- 为参照样品种铝

表 1 改变谷区范围对峰-谷法结果的影响

峰区范围 起始道—终止道	1096—1116				
	840—940	940—1040	940—1060	840—1040	840—1060
谷区范围 起始道—终止道					
$\eta, \xi$	0.244	0.258	0.310	0.502	0.559
$Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma} (\times 10^{-2})$ (实验 I)	2.37	2.26	2.31	2.31	2.31
$Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma} (\times 10^{-2})$ (实验 II)	2.70	2.66	2.70	2.68	2.68

能量刻度为 0.46keV/道, 840 道对应于 390keV, 1060 道对应于 491keV.

表 2 改变峰区选取范围对峰法结果的影响

峰区范围 起始道—终止道	1096	1095	1094	1093	1092	1091	1090	1089	1088	1087	1086	1085	1084	1083	1082	1081
	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131
$Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma} (\times 10^{-2})$ (实验 I)	2.46	2.45	2.43	2.42	2.41	2.41	2.40	2.39	2.37	2.36	2.34	2.52	2.51	2.50	2.51	2.50
$Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma} (\times 10^{-2})$ (实验 II)	2.64	2.62	2.61	2.58	2.56	2.55	2.54	2.53	2.52	2.51	2.48	2.68	2.67	2.65	2.63	2.63

从表 1 看出, 在相当宽的范围内改变谷区的选取范围, 用峰-谷法求得的  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  值保持不变. 这表明所给的峰-谷法公式是合理的, 间接验证了  $3\gamma$  理论能谱在一定精度上的正确性.

表 2 结果表明, 用峰法推算  $3\gamma$  湮没相对产额时, 峰区的选取道数可以在很宽的范围内变动, 求出的  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  值基本不变. 这也显示了峰法的简便.

为了比较上述两种推算  $3\gamma$  相对产额的方法和它们的误差, 在完全相同的实验条件下对氧化镁和铝做了六次测量, 分别用峰法和峰-谷法推算  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  和均方根误差, 结果列于表 3. 由表 3 看出, 用峰法推算的  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  与用峰-谷法得到的基本符合. 但峰法的实验精度明显地优于峰-谷法.

表 4 中列出了用峰法和峰-谷法求得的在两种氧化镁、聚四氟乙烯、 $\alpha$ -碘酸锂以及气凝硅胶中的  $3\gamma$  和  $2\gamma$  湮没产额比, 还给出了用(4)式和(5)式求出的误差值. 该值与表 3 中的均方根误差符合.

表 3 相同实验条件下测量, 用峰法和峰-谷法推算  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  值的比较

序 号	氧 化 镁		铝		$Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma} (\times 10^{-2})$	
	$I_p$ 1088-1124 道	$I_v$ 840-1060 道	$\bar{I}_p$ 1088-1124 道	$\bar{I}_v$ 840-1060 道	峰 法	峰-谷法
1	775844	125075	792950	117660	2.47	2.29
2	775458	127775	793592	118042	2.61	2.87
3	775018	125681	792680	116490	2.55	2.72
4	775014	128914	793398	116378	2.64	3.05
5	775101	126237	793112	114853	2.59	3.23
6	774834	126412	795146	116637	2.89	2.94
平均					$2.63 \pm 0.14$	$2.85 \pm 0.38$

表 4  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  的测量结果

样 品	制 备 条 件	$Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma} (\times 10^{-2})$	
		峰 法	峰-谷法
氧 化 镁	200kg/cm <sup>2</sup> 压片, 密度 1.39g/cm <sup>3</sup>	$2.62 \pm 0.13$	$2.85 \pm 0.32$
氧 化 镁	100kg/cm <sup>2</sup> 压片, 密度 0.90g/cm <sup>3</sup>	$3.25 \pm 0.18$	$3.23 \pm 0.41$
聚 四 氟 乙 烯	棒料切割后磨光, 厚 0.2cm	$0.65 \pm 0.21$	$0.45 \pm 0.34$
$\alpha$ -碘 酸 锂	垂直 $z$ 轴方向切片, 用 <sup>64</sup> Cu 源	$1.05 \pm 0.20$	$0.87 \pm 0.35$
气 凝 硅 胶	密度 0.25g/cm <sup>3</sup> , 真空中	$26.7 \pm 0.2$	

由表 4 结果看出, 用峰法和峰-谷法测得四种样品的  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  值是一致的. 实验测出密度低的氧化镁样品的  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  值明显地大于密度高的氧化镁样品, 而多孔性材料气凝硅胶样品的  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  值高达  $26.7 \times 10^{-2}$ . 这结果符合 ps 形成和 pick-off 猝灭理论. 此外, 用峰法求出聚四氟乙烯样品的  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  值与文献[7]的结果相符.

原则上峰法的精度只取决于峰的计数,增加峰计数累积即可提高精度;不涉及计数很低的谷区,与  $\eta, \xi$  也无关. 而峰-谷法不能避免这些因素引入的误差,因此即使加长测量时间,对峰-谷法精度的提高却是有限的. 对  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  值仅比参照样品大一倍的样品,用峰-谷法测量的误差太大.

#### 四、结 论

1. 本文提出了一种用 Ge(Li) 探测器根据测定 511keV 峰区计数推算正电子  $3\gamma$  湮没相对产额的简便方法——峰法. 它的精度明显地优于峰-谷法.

2. 分别用峰法和峰-谷法定了氧化镁、聚四氟乙烯和  $\alpha$ -碘酸锂等四种样品的  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  值,两种方法获得的结果基本一致. 此外,还用峰法测量了气凝硅胶样品,其  $Y_{3\gamma}/Y_{2\gamma}$  值高达  $26.7 \times 10^{-2}$ .

#### 参 考 文 献

- [1] A. Ore, *et al.*, *Phys. Rev.*, **75**(1949), 1969.
- [2] R. L. Graham, *et al.*, *Can. Jour. Phys.*, **32**(1954), 678.
- [3] V. L. Telegdi, *et al.*, *Phys. Rev.*, **104**(1956), 867.
- [4] V. W. Hughes, *et al.*, *Phys. Rev.*, **98**(1955), 1840.
- [5] F. F. Heyman, *et al.*, *Proc. Phys. Soc.*, **78**(1961), 1037.
- [6] C. Bussolati, *et al.*, *Phys. Rev. B*, **6**(1964), A657.
- [7] M. Bertolaccini, *Phys. Rev.*, **139**(3A)(1965), A696.

### MEASUREMENT OF $3\gamma$ ANNIHILATION OF POSITRON USING Ge (Li) DETECTOR

WU GUN-HUNG    WANG YUN-YU    TANG HSIAO-WEI

(*Institute of High Energy Physics, Acadimia Sinica*)

#### ABSTRACT

A method for measuring the positron  $3\gamma$  annihilation with Ge(Li) detector is introduced, in which the relative yields of  $3\gamma$  annihilation is measured by the counts of the 511 keV peak only. We call it the "peak method", and compare it with the "peak-valley method."