

# 用高纯锗 $\gamma$ -谱仪借助滑动比较方法 精密测量放射性核的 $\gamma$ -射线能量\*

张天保 王淑英 王海东 沈智奇

(中国科学院高能物理研究所应用部, 北京 100080)

孟伯年

(EG&G Ortec 公司 中国代表处)

## 摘 要

以 $^{192}\text{Ir}$   $\gamma$ -射线能量准确值为标准对高纯锗 $\gamma$ -谱仪进行滑动扫描刻度,通过比较测定放射性核 $\gamma$ -射线能量,得到:  $477603.18 \pm 0.44\text{eV}$ ( $^7\text{Be}$ )、 $511852.70 \pm 0.58\text{eV}$ ( $^{106}\text{Ru}$ )、 $514004.87 \pm 0.52\text{eV}$ ( $^{85}\text{Sr}$ )、 $520399.01 \pm 0.63\text{eV}$ ( $^{83}\text{Rb}$ )、 $529594.48 \pm 0.69\text{eV}$ ( $^{83}\text{Rb}$ )和 $552551.14 \pm 0.68\text{eV}$ ( $^{83}\text{Rb}$ )。用这一结果校正以往的实验,得到电子质量值 $510998.6 \pm 1.1\text{eV}$ ,它与电子质量的近期调节值良好符合。

## 一、引 言

晶体布喇格衍射是测量 X-射线和 $\gamma$ -射线能量的准确方法,因谱仪效率低,要求强的射线源(X-光机、同步辐射等),对于核 $\gamma$ -射线研究而言,可在极端条件下(例如有上千 Ci 源强)获得一些能量标准,常规应用是不方便的。常用高纯锗(HPGe) $\gamma$ -谱仪具有效率高的优点,但能量分辨差,研究提高它的能量测量精度是有意义的。早先, Helmer<sup>[1,2]</sup>以少数 $\gamma$ -能量标准,用 Ge(Li)谱仪比较测量核的 400 keV 以上能区 $\gamma$ -射线能量,误差到 10 eV 水平。后来, Kumahora<sup>[3]</sup>以 $\gamma$ -能量准确已知的 $^{198}\text{Au}$ 和 $^{192}\text{Ir}$ <sup>[4]</sup>对 Ge(Li)谱仪进行刻度,拟合出谱仪非线性曲线,对 $^7\text{Be}$ 、 $^{106}\text{Ru}$ 、 $^{85}\text{Sr}$ 、 $^{147}\text{Nd}$ 和 $^{207}\text{Bi}$ 等核的 500keV 附近的 $\gamma$ -射线能量测准到 2—3eV。本文仍以 $^{192}\text{Ir}$   $\gamma$ -能量作标准,提出滑动测谱法研究 HPGe 谱仪刻度中的非线性问题,把 $^7\text{Be}$ 、 $^{106}\text{Ru}$ 、 $^{85}\text{Sr}$ 和 $^{83}\text{Rb}$ 的 $\gamma$ -能量测准到 $\sim 0.5\text{eV}$ ,接近了晶体衍射谱仪水平。在此基础上讨论了以往正电子物理实验中有关湮没辐射能量测量<sup>[5]</sup>中的问题。

## 二、实 验

### 1. HPGe $\gamma$ -谱仪性能检验

本文 1992 年 1 月 8 日收到。

\* 中国科学院重大研究项目和国家自然科学基金资助。

谱仪包括平面型锗探头, 尺寸  $\phi 44\text{mm} \times 15\text{mm}$ , 配电子学主放大器 Ortec572、偏置放大器 Ortec444、8192 多道缓冲器 Ortec 918 和在线微机。谱仪能量分辨在 514 keV 处为  $FWHM = 1.12\text{keV}$  (用  $^{85}\text{Sr}$  测)。用滑移脉冲产生器检验 8192 多道的微分线性, 发现有非线性结构, 改变输入脉冲波形、速率以及改变环境温度, 总有 15 个振幅占  $\sim 0.15\%$ 、间距为 512 道的峰状起伏分布在计数曲线上, 用测  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -射线康普顿坪方法来检验也是如此, 推断这是由于多道内部逐次比较电坪分布偏离线性所致, 如不细致研究, 将带给  $\gamma$ -射线能量测量 2—3eV 的不确定度。检验谱仪温度效应, 发现增益漂移为 50ppm/ $^{\circ}\text{C}$ , 零点漂移为  $\sim 0.5\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。在以下的谱测量中, 室温控制在  $21 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

### 2. 放射源制备和 $\gamma$ -谱测量

使用  $^{192}\text{Ir}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{85}\text{Sr}$ 、 $^{83}\text{Rb}$  和  $^{106}\text{Ru}$  放射源, 把放射性强度各自为  $\sim 10\mu\text{Ci}$  的  $^{192}\text{Ir}$ 、 $^7\text{Be}$ 、 $^{85}\text{Sr}$  和  $^{83}\text{Rb}$  溶液均匀混合并吸附在  $\phi 7\text{mm}$  滤纸片上, 在塑料盘中干燥密封制成固定放射源, 另一个  $^{192}\text{Ir} + ^{106}\text{Ru}$  的固定源大体如法制作。以下只叙述前一个放射源的  $\gamma$ -谱测量。把源放置在探测器中心轴线上前方 10cm 处, 在源和探测器中间插入  $2\text{mmPb} + 0.5\text{mm}$

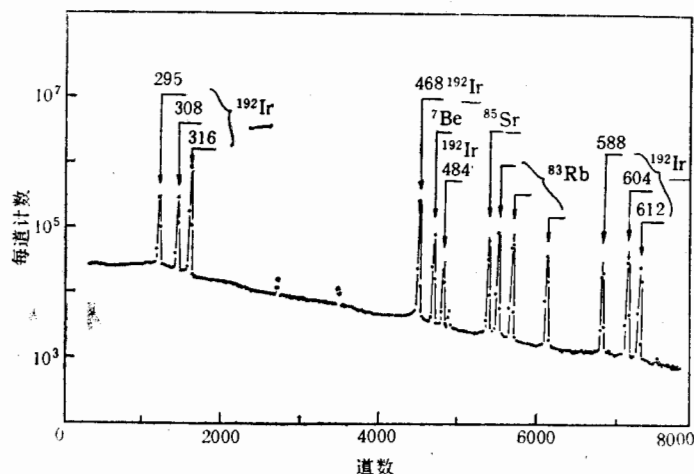


图 1 测得的  $^{192}\text{Ir} + ^7\text{Be} + ^{85}\text{Sr} + ^{83}\text{Rb}$  混合  $\gamma$ -能谱示例图

表 1  $^{192}\text{Ir}$   $\gamma$ -能量值 (Kessler, 1978) 和改正值

$\gamma$ -射线 keV	能量值(1978) eV	改正后能量值 eV	误差 eV
295	295958.25	295956.38	0.13
308	308456.89	308454.94	0.15
316	316507.89	316505.89	0.18
468	468071.47	468068.51	0.27
484	484577.97	484574.90	0.41
588	588584.46	588580.73	0.72
604	604414.63	604410.80	0.23
612	612465.62	612461.74	0.26

Cd + 0.5mmCu 的混合滤片以抑制低能  $\gamma$ -和 X-射线进入探测器, 固定放大器增益和脉冲成型时间 ( $RC = 2\mu s$ ), 改变偏置放大器的偏置电坪测谱, 偏置电坪步距 30mV, 表现在所测各谱之间平移 50 至 60 道。共密布平移测了 54 个谱, 作为例子图 1 示出其中一个谱。

在所有谱中,  $^{192}\text{Ir}$  的  $\gamma$ -线总是作为能量标准出现的, Kessler<sup>[4]</sup> 用晶体衍射谱仪给出了能量的准确值, 列于表 1。我们发觉, 由于基本物理常数方面的改进<sup>[6]</sup>, 特别是由于硅单晶晶格间距和电压-波长转换因子在数值上有改变, Kessler 给出的  $\gamma$ -能量数值应乘一因子 0.999993667, 改正后的数值一并列入表 1。

### 3. $\gamma$ -谱峰的峰位确定

使用一套  $\gamma$ -源包括  $^{137}\text{Cs}$ (662keV)、 $^{85}\text{Sr}$ (514keV)、 $^{103}\text{Ru}$ (497keV)、 $^{184}\text{Hf}$ (482keV)、 $^{198}\text{Au}$ (412keV) 和  $^{192}\text{Ir}$ (316keV) 来研究  $\gamma$ -谱峰的形状, 与文献[3, 7]的结论相仿, 一个单能  $\gamma$ -峰可分解为主高斯部分和加在峰低能侧的一个尾函数, 定义高斯部份的中心为  $\gamma$ -峰的峰位。实用上因谱仪存在非统计性漂移因素(例如温度效应)经常使谱峰的高斯拟合失败 ( $\chi^2 \gg 1$ ), 直接使用此法会废去很多测量谱。我们研究包括尾函数在内的峰的重心, 使用仿真软件 A60-BI (Ortec) 中计算峰重心的子程序, 计算有良好稳定性。经检验知, 一个混合峰重心的计算值恰等于参与混合

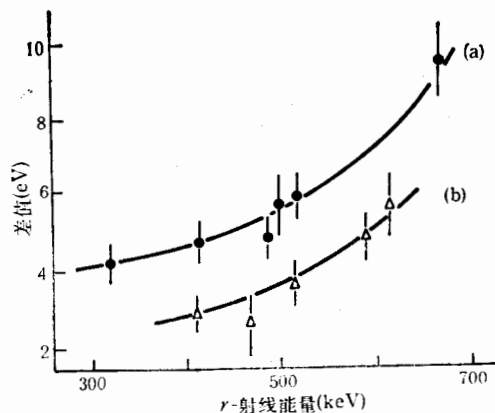


图 2 高斯中心与峰重心之间的差值与  $\gamma$ -射线能量的关系

(a) 谱计数率为 1000/s, (b) 5000/s

各峰重心的算术平均值, 这是很有利的, 表明非统计性漂移因素不对计算引入误差。实验中规定判据, 凡测得谱峰的  $FWHM$  值偏离正常值在 3% 以内的都是有效测量, 保存了大多数测量谱。选择一些能够作良好高斯拟合的谱峰来研究高斯中心与峰重心之间关系, 结果示于图 2。在数值上高斯中心总是略高于峰重心, 差值与  $\gamma$ -能量有关。实用时, 先计算峰重心, 再按图 2 的差值曲线校正到高斯中心作该峰的峰位值, 避免直接高斯拟合。很幸运, 图 2 中不同计数率下的差值曲线相互平行, 表示改变计数率(至少因放射性衰变)的测量等价于

轻微移动偏置放大器偏置电坪的测量, 因此在我们的测量安排下计数率效应引入的误差不必要考虑。

所定出的峰位值精度  $\sigma$  与峰的半高宽  $FWHM$  及峰面积计数  $N$  有关, 经过一系列实验检验得到简单关系式:

$$\sigma \approx \frac{FWHM}{\sqrt{N}}, \quad (1)$$

式中  $\sigma$  和  $FWHM$  均以 eV 为单位。举例而言, 如果  $FWHM = 1\text{keV}$ ,  $N = 10^6$ , 峰位精

度 $\sigma$ 约 1eV.

### 三、数据分析方法与测量结果

#### 1. 谱仪刻度

$\gamma$ -能量  $E$ (eV 为单位)与  $\gamma$ -峰的峰位道数  $x$  之间的关系可表达为:

$$E = a + bx + \varepsilon(x), \quad (2)$$

其中  $a$  是截距,与偏置放大器的偏置电坪相关,  $b$  代表谱仪的线性刻度(eV/道),  $\varepsilon(x) = E - (a + bx)$  代表谱仪在道址  $x$  处的非线性偏离.

用  $^{192}\text{Ir}$  来进行谱仪刻度,在大多数测得谱(谱例见图 1)中有 8 个  $^{192}\text{Ir}$   $\gamma$ -峰,对于每个谱,用 316 和 604keV 两峰位确定(2)式中的  $a$  和  $b$  值,其余峰给出 6 个  $\varepsilon(x)$  的值,共 8 个数据点. 曾试探过用简单函数(文献[3]的作法)拟合这 8 个点求  $\varepsilon(x)$  分布,结果太粗糙. 我们把 54 个谱共 350 个数据点一起考虑,用‘滑动’法求  $\varepsilon(x)$ . 295、308 和 316keV  $\gamma$ -射线共有 150 个点分布在 400—3900 道区内, 468 和 484 keV  $\gamma$ -线共 100 个点分布在 3300—6800 道内, 588、604 和 612 keV  $\gamma$ -线共 100 个点分布在 5600—7900 道内,平均每 20 至 25 道有一个数据点. 原理上,所有这些点应分布在同一  $\varepsilon(x)$  曲线上. 具体作法,先把第一张谱的 8 个点描出,再把毗连(相差 50 至 60 道)的第二张谱的 8 个点摆上,注意低能端和高能端各有三个距离很近的点,调节位置使它们尽可能统计上无矛盾地插入前一张谱的数据点当中,这样,每条  $\gamma$ -射线的数据点都向后滑动一步,如是处理第三张谱的数据点,……,待 54 张谱处理完后,每条  $\gamma$ -射线的数据点都有自己的滑动径迹,根据处理方法知道,前三条和后三条径迹分别是相互重合的径迹. 检查属于 468 和 484 keV  $\gamma$ -射线的径迹,发现它们平均相距 0.2eV(落入统计误差之内)也可视为一条径迹. 幸运地,这些径迹统计上无矛盾地衔接在一起,因此认为在整个道区内得到了谱仪的非线性偏离曲线  $\varepsilon(x)$ (见图 3),谱仪已经刻度好. 图 3 中标在数据点上的误差是根据公式(1)算出的,其数值与数据点偏离  $\varepsilon(x)$  的均方根偏差值接近,这是对上述滑动方法的一个验证.

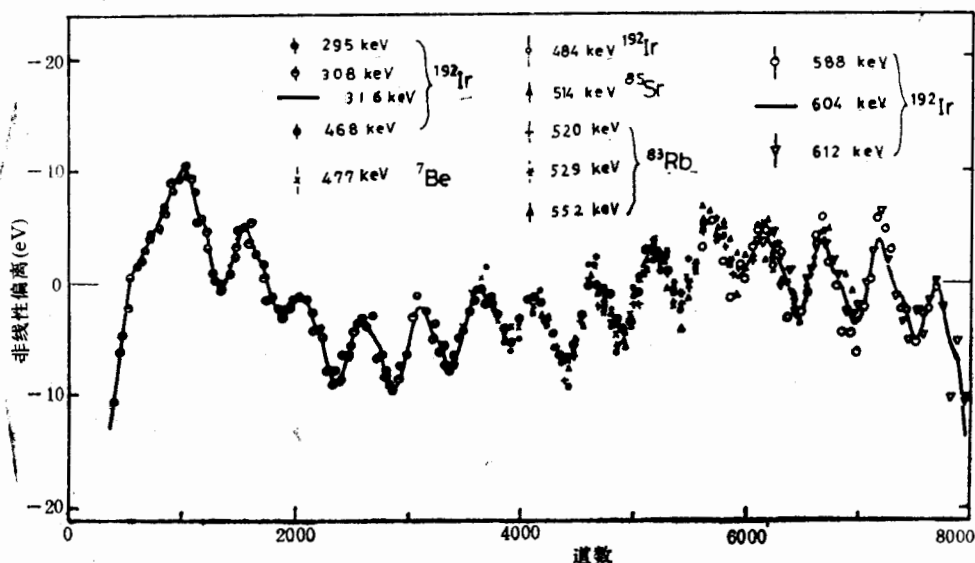
#### 2. ‘未知’ $\gamma$ -能量测定

实际上,放射性核  $^{7}\text{Be}$ 、 $^{85}\text{Sr}$  和  $^{83}\text{Rb}$  是和  $^{192}\text{Ir}$  一起测谱的,设想这些未知能量的  $\gamma$ -射线都有自己的滑动曲线且应与  $\varepsilon(x)$  统计地重合,因此可定出它们的能量值. 具体作法上只把这些  $\gamma$ -射线数据点与 468 keV  $\gamma$ -线滑动径迹相比较,使它们沿该径迹统计分布,即与 468keV  $\gamma$ -能量准确值相比较定出这些  $\gamma$ -射线能量(见图 3).

使用  $^{192}\text{Ir} + ^{106}\text{Ru}$  混合源滑动测谱共 41 次,与 468 keV  $\gamma$ -射线能量准确值相比较定出  $^{106}\text{Ru}$  的 512 keV  $\gamma$ -射线的能量准确值.

实验结果列于表 2 中.

实验误差估计有 4 项来源: ①计数统计,按公式(1)每个数据点有自己统计误差  $\sigma$ ,总的统计误差可以按  $\sigma/\sqrt{n-1}$  来计算,这里  $n$  是与 468 keV 滑动径迹相比较的数据点数目,每张谱测量时间大体相同,属于等精度测量; ②能量标准 468 keV 本身的误差 0.27 eV; ③尾函数修正过程中引入的误差,参照图 2, 高斯中心与峰重心之间的差值曲线是有

图3 滑动法定出谱仪非线性偏离曲线  $\sigma(x)$ , 比较定出未知  $\gamma$ -射线能量表2 测得的  $\gamma$ -射线能量值

放射性核	文献[3]		本工作	
	能量*	误差	能量	误差
$^7\text{Be}$	477603.4	2.6	477603.18	0.44
$^{106}\text{Ru}$	511853.0	2.3	511852.70	0.58
$^{85}\text{Sr}$	514004.3	2.2	514004.87	0.52
$^{83}\text{Rb}$	—	—	520399.01	0.63
$^{83}\text{Rb}$	—	—	529594.48	0.69
$^{83}\text{Rb}$	—	—	552551.14	0.68

\* 文献[3]中的能量值在这里已乘校正系数 0.999993667.

实验误差的,此误差传播到  $\gamma$ -能量测定值引起不确定性在 0.1eV 水平; ④比较误差,  $^{83}\text{Rb}$  三条  $\gamma$ -射线也可以通过与 604keV  $\gamma$ -线径迹的滑动比较来定出能量,发现这样定出的能量值与同 468 keV 相比较定出的能量值之间有差异,分别是 0.91eV (对 520 keV  $\gamma$ -线)、0.39eV (对 530keV  $\gamma$ -线)和 0.41eV (对 553keV  $\gamma$ -线),因此认为在比较过程中尚有未认识清楚的误差源,水平在 0.3—0.5eV. 误差分析情况列于表 3.

表3 误差估计,以 eV 为单位

误差成份	$^7\text{Be}$ 477keV	$^{106}\text{Ru}$ 512keV	$^{85}\text{Sr}$ 514keV	$^{83}\text{Rb}$ 520keV	$^{83}\text{Rb}$ 529keV	$^{83}\text{Rb}$ 552keV
计数统计	0.18	0.3	0.18	0.23	0.36	0.31
468keV $\gamma$ -的误差	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
尾函数修正	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
比较过程	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
总误差	0.44	0.58	0.52	0.63	0.69	0.68

## 四、讨 论

充氧气的气凝硅胶是良好仲态电子偶素(p-Ps)源<sup>[1]</sup>, 利用此源, 我们曾测得低速 p-Ps  $2\gamma$  湮没中湮没辐射能量与  $^{106}\text{Ru}$  512 keV  $\gamma$ -能量之差等于  $857.49 \pm 0.93\text{eV}^{[5]}$ , 根据本文测量的  $^{106}\text{Ru}$  的能量值, 可算出 p-Ps 湮没辐射能量  $E_{\text{p-Ps}} = 510995.2 \pm 1.1\text{eV}$ , 这个值可以用作研究正电子在其它材料中势能的能量标准。此外, 如果忽略 p-Ps 动能的影响 ( $< 0.1\text{eV}$ ), 根据公式  $mc^2 = E_{\text{p-Ps}} + B$  可以得到电子质量  $mc^2 = 510998.6 \pm 1.1\text{eV}$  的结果, 这里  $B = 3.40\text{eV}$  是电子偶素结合能的一半, 这一结果与电子质量的近期调节值  $510999.06 (15)\text{eV}$  在误差范围内良好符合。

## 参 考 文 献

- [1] R. G. Helmer, R. C. Greenwood & R. J. Gehrke, *Nuclear Instruments & Methods*, **96** (1971), 173.  
 [2] R. G. Helmer, R. C. Greenwood & R. J. Gehrke, *ibid*, **155** (1978), 189.  
 [3] H. Kumahora, H. Iroue & Y. Yoshizawa, *ibid*, **206** (1983), 489.  
 [4] E. G. Kessler, et al., *Phys. Rev. Letters*, **40** (1978), 171.  
 [5] 张天保 王海东 沈智奇, 高能物理与核物理, **15**(1991), 486.  
 [6] E. R. Cohen & B. N. Taylor, *CODATA Bullentin*, No. 63 (1986), 1.  
 [7] K. Shisuma, *Nuclear Instruments & Methods*, **150** (1978), 447.  
 [8] 张天保 徐敏, 高能物理与核物理, **14**(1990)289.

## Precise Measurement of Gamma Ray Energies With HPGE Spectrometer by Slithering Comparison Method

ZHANG TIANBAO, WANG SHUYING WANG HAIDONG SHEN ZHIQI

(Application Division, Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100080)

MENG BONIAN

(EG&G Ortec INC., China Office)

### ABSTRACT

The energies of  $\gamma$ -rays from some nuclides around 500 keV have been measured by a slithering comparison with the precisely known  $\gamma$ -energies of  $^{192}\text{Ir}$ . The energies determined by this method are: 477603.18(44) eV for  $^7\text{Be}$ , 511852.70(58) eV for  $^{106}\text{Ru}$ , 514004.87(52) eV for  $^{88}\text{Sr}$ , 520399.01(63) eV for  $^{85}\text{Rb}$ , 529594.48(69) eV for  $^{87}\text{Rb}$  and 552551.14(68) eV for  $^{83}\text{Rb}$ . From the correction of the previous experiment by using the new result, the value of electron mass is obtained as  $510998.6 \pm 1.1\text{eV}$  which is in good agreement with the recently adjusted value of electron mass.