

仲态电子偶素湮没辐射能量的改进测量*

彭良强 张天保 王海东

(中国科学院高能物理研究所应用部 北京 100080)

孟伯年 殷国利

(EG&G, Ortec 公司北京办事处)

1994-10-20 收稿

摘 要

用充氧气的气凝硅胶作仲态电子偶素源,用 ^{192}Ir 精密 γ 能量作标准,以时间选择能谱仪和滑动比较法改进测量仲态电子偶素 2γ 湮没能量,得到 $h\nu = 510995.34 \pm 0.69\text{eV}$.经电子偶素结合能修正,得正、负电子对静止质量,与电子质量比较,表明正、负电子质量在1.4ppm内一致.

关键词 正电子湮没, 电子偶素, γ 能量.

1 引 言

目前电子静止质量 m_e 由最小二乘法调节得出,为 $510999.06(0.15)\text{eV}^{[1]}$.根据电磁作用的CTP理论,正电子和电子的质量相等 $^{[2]}$.正电子湮没过程包含正电子和电子,测量湮没 γ 射线能量提供了检验这一结论的途径.仲态电子偶素 $p\text{-Ps}$ 湮没的 2γ 能量 $2h\nu$ 与正、负电子质量之间存在简单关系:

$$2h\nu + B = (m_e + m_p)^*, \quad (1)$$

其中 $B = 6.80\text{eV}$ 是电子偶素 Ps 的结合能, $(m_e + m_p)^*$ 代表正、负电子对运动质量.在 Ps 原子低速自由运动的情况下,很容易得到静止质量 $(m_e + m_p)$ 的实验结果.

我们使用充氧气凝硅胶 $p\text{-Ps}$ 源进行过两次测量 $^{[3,4]}$.在文献[3]中,用时间选择能谱仪把 $p\text{-Ps}$ 湮没信号选择出来,满足 $p\text{-Ps}$ 原子低速自由运动的条件,但能量标准 ^{106}Ru 的精度不高,导致实验精度(2.5eV)太差.在文献[4]中,使用精度很高的 ^{192}Ir γ 能量标准,采用滑动比较法,将实验精度提高到0.74eV,但采用的 $p\text{-Ps}$ 源含其它湮没成分,使得修正过程多而复杂.本文结合文献[3,4]的优点,用改进的时间选择能谱仪挑选 $p\text{-Ps}$ 事例,用 ^{192}Ir γ 能量标准,采用滑动比较法,取得了新的结果.

2 实 验

实验样品为充氧气的低密度气凝硅胶($0.1\text{g}/\text{cm}^3$).实验中充氧气1atm,已知 $^{[5]}$ 在

* 中国科学院八五重点课题,国家自然科学基金资助.

这种条件下, 正电子 e^+ 射入气凝硅胶后 27% 生成了正态电子偶素 o -Ps, 其中 80% 在碰撞中转化为 p -Ps, 寿命缩短为 30ns. 磨制了两片气凝硅胶, 每片尺寸为 $\phi 12\text{mm} \times 5\text{mm}$.

正电子源为 $2.3\mu\text{Ci } ^{22}\text{Na}$, 滴入 $\phi 3\text{mm}$ 的塑料闪烁膜中, 能量标准 $5\mu\text{Ci } ^{192}\text{Ir}$ 源滴在 $\phi 7\text{mm}$ 的滤纸环上, 套在 ^{22}Na 源周围, 一起夹入样品. 样品装入带有有机玻璃窗的铝盒, 密封充氧, 玻璃窗耦合在光电倍增管上, 构成 β^+ 触发器. HPGe 探测器 (平面型, $\phi 25\text{mm} \times 10\text{mm}$) 距样品 44mm, 其轴线与 XP2020 的轴线重合.

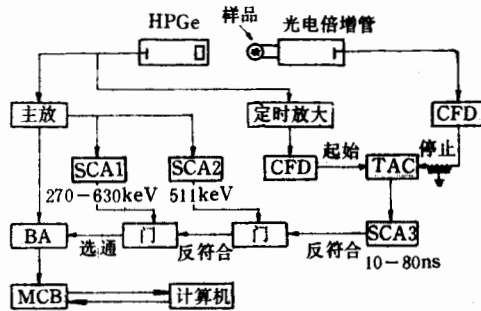


图 1 电子学框图

主要的电子学安排见图 1. HPGe 探测器输出信号分两路, 用作时间探测的一路与 β^+ 触发计数器构成时间谱仪, 测量正电子湮没寿命谱 (时间分辨为 2ns), 单道分析器 SCA3 给出时间窗 10 — 80ns, 由此选择了 p -Ps 事例. HPGe 能谱测量的一路中安排偏置放大器 BA, 它在选通状态下工作, 单道 SCA1 确定能窗 270 — 630keV, 控制 BA 和 8192 多道缓冲器 MCB 只能记录此能区的 γ

谱, 但 SCA1 受单道 SCA2 反符合控制, SCA2 的能窗略宽于 511keV 能峰, 使得多道上显示所有感兴趣的 ^{192}Ir γ 能峰, 但在正电子湮没峰处无计数. 然而 SCA2 受 SCA3 反符合控制, 两次反符合等效于一次符合, 最后在多道上显示被挑选的 p -Ps 湮没 γ 能谱. 经验表明, 如果在这里使用直接的一次符合, 门信号对被挑选的信号干扰往往不易严格排除. 以上系统能量分辨在 500 keV 处约 1.1keV, 谱仪一般技术性能及检验情况参见文献 [6].

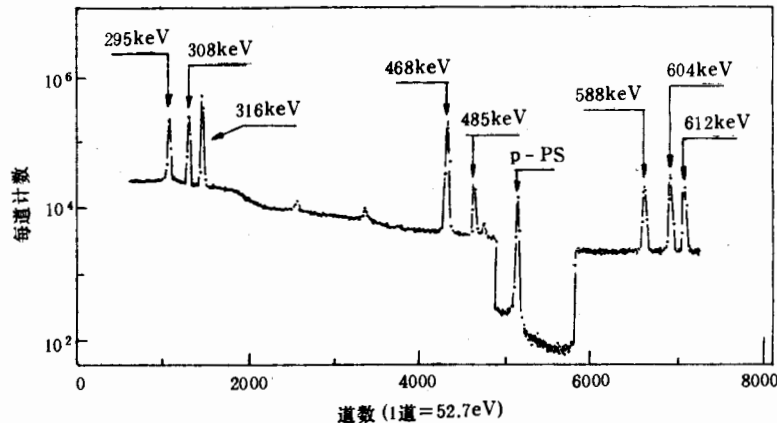


图 2 $^{192}\text{Ir} + p\text{-Ps}$ 的 γ 能谱

主放大器脉冲成形时间为 $2\mu\text{s}$, 固定各放大器增益, 步进式 (每步 50 — 60 道) 改变偏置放大器的偏置阈测谱, 共得 56 张谱, 其中之一示于图 2. 图中给出 ^{192}Ir 8 条 γ 射线的能峰, 其精密能量值参见文献 [6]. 图中还给出了 p -Ps 2γ 湮没窄峰, 它与通常正电子在材料中的湮没宽峰显著不同. 根据峰的宽度确定 p -Ps 原子的动能为 0.07eV [7].

3 数据分析和测量结果

数据分析方法采用滑动比较法, 详见文献 [6]. 由 ^{192}Ir 的 γ 能峰扫描出谱仪的非线性结构, p-Ps 湮没峰经过小的修正后 (详见文献 [3]), 一并绘于谱仪的非线性曲线上, 即图 3. 图 3 中 316keV 和 604keV 数据点光滑地排布在该曲线上, 其余 γ 射线点统计分

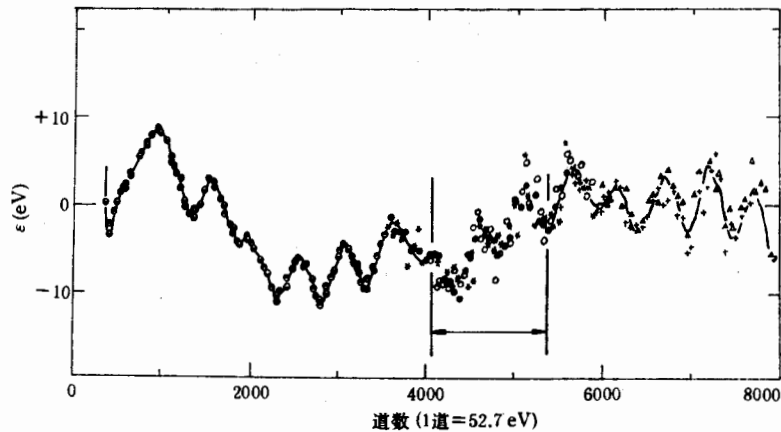


图 3 谱仪的非线性曲线

● 295keV; * 485keV; ⊙ 308keV; ○ p-Ps; — 316, 604keV;
+ 588keV; ● 468keV; △ 612keV.

布在曲线两侧. ^{192}Ir 的 468keV γ 峰距 p-Ps 湮没峰近, 且统计好、精度高, 用作湮没峰的能量比较标准, 图中比较道区定在 4100—5400 间. 计算出 468keV 数据点在此道区内对非线性曲线的偏离平均值 $\bar{\epsilon}_{468}$, 寻求湮没峰数据点在该道区内对非线性曲线的偏离平均值 $\bar{\epsilon}_{511}$, 使得 $\bar{\epsilon}_{511} = \bar{\epsilon}_{468}$, 湮没 γ 能量值随之确定.

根据上述步骤, 测得 p-Ps 静止 2γ 湮没的 γ 能量为 $h\nu = 510995.34 \pm 0.69\text{eV}$. 总误差 0.69eV 包含五个误差源: 来自 468keV γ 能量的不确定度 0.28eV; 来自 p-Ps 湮没峰的计数统计 0.53eV; 由于其余参考峰的不确定度和计数统计 0.30eV; 起因于本底扣除过程的 0.15eV 和来自 Ps 原子运动的相对论效应修正 0.01eV.

4 讨 论

由实验结果及式 (1), 有:

$$\frac{1}{2} (m_e + m_p) = 510998.74 \pm 0.69\text{eV} \quad (2)$$

与电子质量 m_e 比较, 二者在误差范围内符合, 表明正、负电子质量在 1.4ppm 内一致.

测量 ^{192}Ir γ 射线能量的原始实验是用平面晶体衍射谱仪做的^[8], 实际上测量的是 γ 射线波长, 因此本实验直接给出电子 Compton 波长值为 $2.4263121(33) \times 10^{-6}\text{m}$, 它和最小二乘法调节值 $2.42631058(22) \times 10^{-6}\text{m}$ ^[1] 在误差范围内一致.

本实验采用时间选择技术提取 p-Ps 湮没信号, 信噪比高, 能量关系简单, 因而实验精度有所提高. 由于本实验的主要误差来自统计涨落, 所以继续改进是可能的.

采用时间选择技术可以分别测量不同湮没成分, 因此本实验所提供的结果和方法有可能过渡到测量材料中不同成分的电子结合能.

参 考 文 献

- [1] E. R. Cohen, B. N. Taylor, *Rev. Modern. Phys.*, **59** (1987) 1121.
- [2] R. Lewis, *Elementary Particles and Symmetries*, Gardon and Breach (1975).
- [3] 张天保、王海东、沈智奇, *高能物理与核物理*, **15** (1991) 486.
- [4] 张天保等, *中国科学*, **A9** (1992) 970.
- [5] 张天保、徐敏, *高能物理与核物理*, **14** (1990) 289.
- [6] T. B. Chang et al., *Nucl. Instr. Methods*, **A325** (1993) 196.
- [7] 张天保, *物理*, **4** (1990) 228.
- [8] R. D. Deslatts et al., *Ann. Phys.*, **129** (1980) 378.

Improved Measurement of γ -Energy from Parapositronium 2γ -Decay

Peng Liangqiang Zhang Tianbao Wang Haidong

(Application Division, Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Meng Bonian Yin Guoli

(EG&G Ortec INC., Beijing Office)

Received 20 October 1994

Abstract

Using a silica aerogel sample with oxygen gas filled as the positronium (Ps) source and a time selecting energy spectrometer, the measurement of the γ -energy of parapositronium (p-Ps) 2γ -decay is further improved and the result of $h\nu = 510995.34 \pm 0.69\text{eV}$ is obtained by a slithering comparison with the precisely known γ -energies of ^{192}Ir . The rest mass of a pair of positron and electron is determined by the correction with the binding energy of Ps, which shows a mass equality within 1.4ppm between positron and electron by the comparison with the rest mass of electron.

Key words positron annihilation, positronium, γ -energy.