

正态电子偶素衰变率的实验研究*

张天保 杨广明 郭宝年 王海东

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100080)

摘 要

本文提出用外推 $N_{2\gamma}/N_{3\gamma} \rightarrow 0$ 的方法测正态电子偶素的真空衰变率 λ_0 , 初步结果得到 $\lambda_0 = 7.034 \pm 0.013 \mu\text{s}^{-1}$, 讨论了进一步改进实验的可能性.

一、引 言

电子偶素 (Positronium, 简称 Ps) 是电子和正电子以电磁相互作用形成的束缚态, 是检验 QED 的纯粹体系. Ps 分正态(o-Ps)和仲态(p-Ps)两种. 已往的工作在 Ps 能级结构^[1]、衰变选择定则^[2]和衰变能谱^[3]等方面, 实验和理论之间相互符合, 但在 o-Ps 衰变率方面实验和理论计算之间长期存在矛盾. o-Ps 真空衰变率最近的 QED 计算值 $\lambda_0 = 7.03893(7) \mu\text{s}^{-1}$ ^[4]. 实验方面的数据主要是 Gidley 等人提供的, 十多年来, 他们多次实验的结果自相符合, 但与计算值不符合, 例如最近的实验值 $\lambda_0 = 7.0482(16) \mu\text{s}^{-1}$ ^[5], 与理论值相差 6σ . Gidley 等人所使用的实验方法大体可分为三类: ①使用超细颗粒氧化物粉末的 Ps 源, 测不同粉末密度下 o-Ps 的湮没率 λ (湮没寿命的倒数), 外推密度 $\rightarrow 0$ 得 $\lambda \rightarrow \lambda_0$ ^[6]; ②使用气体 Ps 源, 外推气体压力 $\rightarrow 0$ 得 λ_0 ^[7]; ③使用 MgO 表面发射的 Ps 源, 把 o-Ps 约束在 MgO 涂壁的腔体中, 外推 $S/V \rightarrow 0$ 来获得 λ_0 ^[8], 这里 S 为腔体内表面面积, V 是腔的体积. 我们曾指出^[9], 由于未充分认识 Ps 动能损失过程对 o-Ps 湮没率的影响, 以上测量可能存在系统误差. 为了避免这一误差, 本文提出用外推 $N_{2\gamma}/N_{3\gamma} \rightarrow 0$ 的方法获得 λ_0 , 这里 $N_{3\gamma}$ 代表 o-Ps 自由衰变的 3γ 计数, $N_{2\gamma}$ 代表 o-Ps 任何猝灭过程给出的 2γ 计数. 当 o-Ps 与介质达到热平衡之后, 其湮没率 λ 与 $N_{2\gamma}/N_{3\gamma}$ 之间有简单关系:

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_q = \lambda_0(1 + \lambda_q/\lambda_0) = \lambda_0[1 + k(N_{2\gamma}/N_{3\gamma})],$$

这里 λ_q 是 o-Ps 猝灭率, k 是与 $N_{2\gamma}$ 和 $N_{3\gamma}$ 计数谱段相关的常数, 当 $N_{2\gamma}/N_{3\gamma} \rightarrow 0$ 时有 $\lambda \rightarrow \lambda_0$. 理论计算表明, 除 3γ 衰变外, o-Ps 的其它奇数光子衰变的机率在 $\sim 10^{-6}$ ^[10], 影响可略, o-Ps 衰变为偶数光子(例如 2γ) 在理论上是禁戒的, Asai 等^[2]给出实验上限值为 33×10^{-4} , 所以本文提出的方法会有很高的准确度.

本文 1991 年 9 月 5 日收到.

* 国家自然科学基金资助.

二、实 验

1. 样品和放射源

实验样品采用密度为 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ 的气凝硅胶两片,尺寸 $\phi 18\text{mm} \times 13\text{mm}$,正电子源为 ^{22}Na .把 $0.8\mu\text{Ci } ^{22}\text{Na}$ 滴入 $40\mu\text{m}$ 的塑料闪烁膜中再夹入样品,样品置入铝制样品盒,它

一端接充氮气的系统,另一端避光并真空封接小型光电倍增管 GDB-20,整体是一个 β^+ 触发计数器,经测量,触发计数率为 $2.6 \times 10^4/\text{s}$,触发效率 $\sim 87\%$.

已知^[9]正电子在气凝硅胶的 SiO_2 微颗粒内部大量形成 Ps,长寿命的 o-Ps 原子(强度 27%)被发射到颗粒之间的自由空间中碰撞和湮没,真空下, o-Ps 经碰撞损失动能直至热化所需的时间为 80ns,热化后自衰变产生的 3γ 谱计数 $N_{3\gamma}$ 与碰撞猝灭产生的 2γ 谱计数 $N_{2\gamma}$ 有一定比例,当充入不同气压氮气时,热化时间将不足 80ns, $N_{2\gamma}/N_{3\gamma}$ 值随气压线性改变.

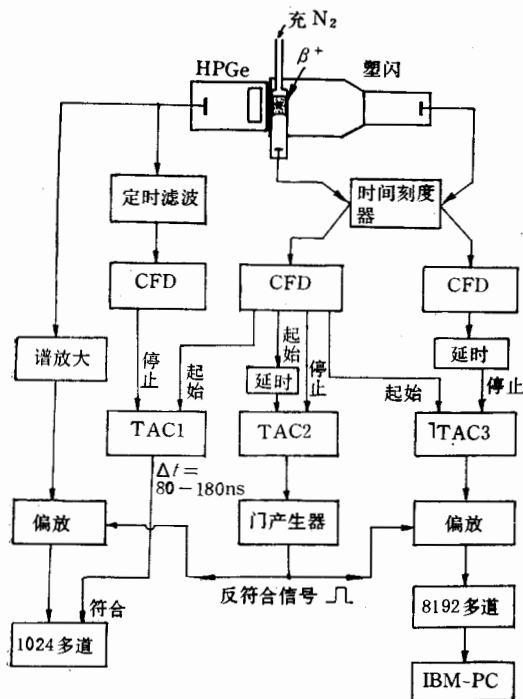


图1 实验装置简图

2. 实验装置

实验装置简图见图1,它由一个寿命谱仪和一个时间选择 γ 能谱仪组成.

探测器有三个,用于时间起始的 β^+ 计数器居于中央,一个大塑料闪烁计数器 ($\phi 75\text{mm} \times 75\text{mm}$, 阱式) 和一个高纯锗探测器 (HPGe, $\phi 44\text{mm} \times 15\text{mm}$) 对称置于两侧,用于探测正电子湮没 γ 射线. 塑料闪烁计数器给出停止信号,与 β^+ 计数器一起通过时幅转换器 TAC3 构成寿命谱仪,测量不同气压下 o-Ps 的湮没率,为了克服多道分析器的非线性影响和测量过程中电子学漂移的影响,把时间刻度器 (Ortec462, 标称准确度 10^{-5}) 的时标信号在线植入寿命谱测量中. HPGe 谱仪担负 $N_{2\gamma}$ 和 $N_{3\gamma}$ 测量,同时它的定时输出与 β^+ 计数器一起通过 TAC1 (内部有单道分析器) 构成有时间窗的寿命谱仪,选择时间窗 Δt 在 $80\text{ns} - 180\text{ns}$ 之间,控制多道符合门以保证在 o-Ps 完全热化下测 $N_{2\gamma}$ 和 $N_{3\gamma}$,整体是一个时间选择 γ 谱仪. TAC2 的作用是为了降低寿命谱测量和 $N_{2\gamma}$ 与 $N_{3\gamma}$ 测量中的本底,首先与它相连的恒分甄别器 CFD 是个极高速插件,双脉冲分辨时间 30ns ,它处理 β^+ 计数器的脉冲,其输出分两路分别作为 TAC2 的起始和停止,在起始路里插入略大于 30ns 的延迟. 使得在 TAC2 的量程中单次 β^+ 触发出现时不给输出,而两次以上触发时给一个输出,把这个输出成形为反符合信号,控制谱测量并把这类事例消除. 这个降低本底的方法是很有效的,原理上,当

β^+ 触发效率趋向 100% 并且 CFD 双脉冲分辨时间趋于 0 时, 本底可完全消除, 目前情况下本底降低 6 倍。

3. 测量

图 2 给出植入时标的寿命谱图, 整谱的计数为 10^8 , 长寿命 o-Ps 的计数约 2×10^7 个。把一小部分谱区扩展开, 所植入的时标清晰可见, 时标间距为 10ns, 时标的计数分布表现为峰状, 可以用寻峰程序精确定出峰位的道数, 峰位分布不均匀(道差不相等), 表明寿命谱系统存在 0.15% 的非线性偏离。当扣除本底后, 长寿命成份表现为单指数, 为准确计算出湮没率 λ 的值, 首先按约定的办法计算出相邻两个时标之间的谱计数之和作为中点时间的谱计数, 然后对这一系列计算出的谱计数作拟合求 λ , 注意在拟合时舍弃前 80ns 的计数点以满足 o-Ps 充分热化的前提条件, 这样解出的 λ 值的相对误差在 0.05% 左右。

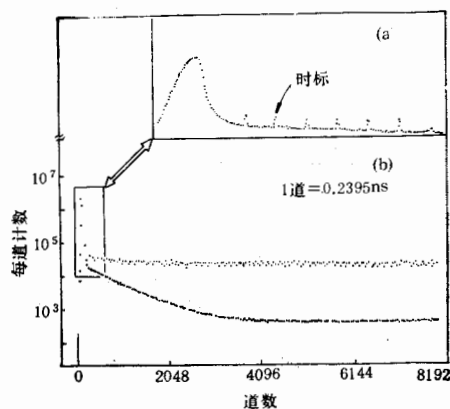


图 2

- (a) 寿命谱局部展开;
- (b) 寿命谱全谱(充氮气压为 0)

图 3 给出计算 $N_{2\gamma}$ 和 $N_{3\gamma}$ 的示意图。按图

1 的安排测得时间选择的 γ 谱图, 其中出现弱的 1.28MeV γ 峰, 它的强度代表偶然符合本底的量, 按预先测得的偶然符合 γ 谱形扣除此本底, 剩余谱为 511keV γ 峰和 3 γ 连续

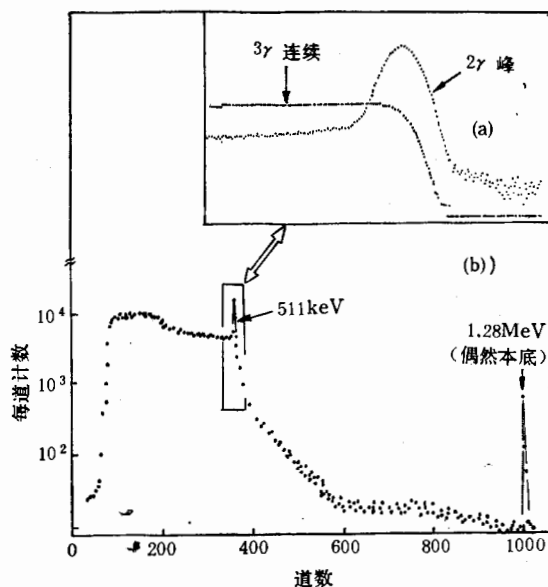


图 3 (a) 借 ^{85}Sr 的 514keV 单能 γ 谱形模拟产生 $N_{2\gamma}$ 和 $N_{3\gamma}$ 谱形; (b) 实测 80ns—180ns 时间窗内的湮没 γ 谱形(充氮气压为 0)。

谱的叠加. 为了解析出 $N_{2\gamma}$ 和 $N_{3\gamma}$, 借用 ^{85}Sr 的 514keV 单能 γ 谱形, 把它视作正电子湮没的 2γ 谱形, 并按 o-Ps 3γ 谱的强度分布^[3] 滑移产生模拟的 3γ 谱形, 参考这两个谱形进行实测谱的分解, 所求出的 $N_{2\gamma}/N_{3\gamma}$ 值的误差可以折合为对应的 λ 值的误差, 这部份误差大体也在 0.05% 水平.

三、结果和讨论

在不同充氮的气压(从 0 到 1 气压)下进行如图 2 和图 3 的测量, 共得 15 组 ($\lambda, N_{2\gamma}/N_{3\gamma}$) 数据点, 作图示于图 4, 由于每次测量情况不尽相同, 各数据点的误差相应有所差异. 按不等精度最小二乘法把数据点作线性拟合, 并把所得直线外推到 $N_{2\gamma}/N_{3\gamma} = 0$ 处, 得实验的 λ_0 值 $7.034 \pm 0.013 \mu\text{s}^{-1}$, 其中误差项主要反映计数的统计误差及为求 $N_{2\gamma}$ 和 $N_{3\gamma}$ 所作曲线分解的误差.

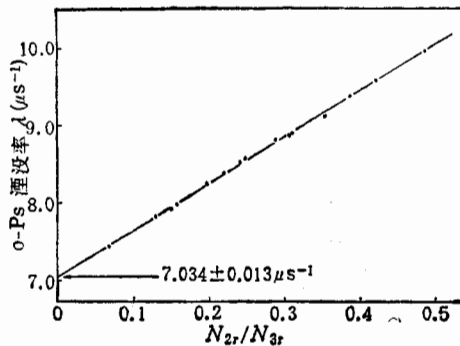


图 4 o-Ps 湮没率随不同充氮气压下 $N_{2\gamma}/N_{3\gamma}$ 的变化

考虑地磁场的影响, o-Ps 在外磁场中, 其 $m = 0$ 的磁亚态 (占 1/3) 会转为 2γ 衰变, 同时寿命缩短, 但因地磁场强度通常小于 $1 \times 10^{-4}\text{T}$, 计算表明, 其影响小于 10^{-5} , 可忽略不计.

考虑时间幅度转换器停止道计数率的影响, 严格说来, 所测寿命谱的表达式应该是 $N(t) = [Ae^{-\lambda t} + B]e^{-\lambda_0 t}$, 其中 A 和 B 是常数, λ_0 是停止道偶然计数率^[7]. 在我们的测量中, 停止道计数率为 $\sim 4000/\text{s}$, 但因起始的 β^+ 触发效率很高 (达 87%), 停止道绝大部分是有用的相关计数, 对 λ_0 有贡献的不相关计数率仅 $\sim 700/\text{s}$, 在采用了抑制本底的措施之后, $e^{-\lambda_0 t}$ 项对结果带来的影响小于 10^{-4} , 目前可以忽略.

因目前实验结果的误差还比较大, 不能讨论已往实验与理论之间的矛盾, 但实验如经过改进有希望达到这个目的. 首先目前所使用的气凝硅胶样品的密度仍显得太高, 它对 o-Ps 的猝灭率等价于 0.2 气压的氮气, 使得图 4 中拟合直线的斜率大, 误差传播到 $N_{2\gamma}/N_{3\gamma} \rightarrow 0$ 的截距点时较大. 设想采用气体 Ps 源, 减低气体压力使数据点密集在截距附近, 可以有效减小外推误差. 但是低密度气体很难约束像 ^{22}Na 这样所放出的高能量的 β^+ 粒子, 因此应建立一定的电磁装置, 挑选出能量为 50keV—100keV 的 β^+ 粒子作触发并在气体中形成 Ps, 这时由于不存在很低能量的 β^+ 粒子, β^+ 触发的效率可以接近 100%, 计数本底进一步大幅度降低, 实验精度可以相应提高, 这方面的工作正在准备中.

外推 $N_{2\gamma}/N_{3\gamma} \rightarrow 0$ 求 λ_0 的方法的准确度极限目前为 3.5×10^{-4} , 如果要求更高准确度, 需要更深入研究 o-Ps 2γ 衰变的禁戒上限问题.

作者对方澄研究员的帮助表示感谢.

作者对方澄研究员的帮助表示感谢.

参 考 文 献

- [1] S. Hatamian, R. S. Conti & A. Rich, *Phys. Rev. Letters*, **V58**(1987), 1833.
- [2] S. Asai, S. Orito, T. Sanuti, M. Yasuda & T. Yokoi, *Phys. Rev. Letters*, **V66**(1991), 1298.
- [3] Chang Tianbao, Tang Hsiowei & Li Yaoqing, *Physics Letters*, **V157B**(1985), 357.
- [4] G. S. Adkins, *Ann. Phys. (N. Y.)*, **146**(1983), 78.
- [5] J. S. Nico, D. W. Gidley, A. Rich & P. W. Zitzewitz, *Phys. Rev. Letters*, **V65**(1990), 1344.
- [6] D. W. Gidley, et al., *Phys. Rev. Letters*, **V36**(1978), 737.
- [7] C. I. Westbrook, et al., *Phys. Rev. Letters*, **V58**(1987), 1328.
- [8] D. W. Gidley, et al., *Phys. Letters*, **V69A**(1978), 97.
- [9] Chang Tianbao, Xu Ming & Zheng Xiantao, *Physics Letters*, **V126A**(1987), 189.
- [10] G. S. Adkins, et al., *Phys. Rev.*, **V28A**(1983), 1164.

Experimental Investigation for the Decay Rate of Orthopositronium

ZHANG TIANBAO YANG GUANGMING GUO BAONIAN WANG HAIDONG

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

ABSTRACT

A method for the measurement of the vacuum decay rate λ_0 of orthopositronium is suggested and the preliminary result is obtained $\lambda_0 = 7.034 \pm 0.13 \mu\text{s}^{-1}$. The possibility for the improvement of the experiment has been discussed.