

电子偶素在气凝硅胶中的能量损失 过程及对湮没率的影响*

徐敏 曾湘涛 黄开平 张天保

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

摘 要

用正电子湮没联合谱仪研究电子偶素在气凝硅胶中的慢化过程. 结果表明, 三重态电子偶素 (o -Ps) 因非弹性碰撞从动能 $\sim 1\text{eV}$ 迅速跌落到 0.25eV , 然后通过连续的与气凝硅胶的 SiO_2 原子团弹性碰撞而缓慢热化. 观察到电子偶素速度越大时其湮没速率也越大, 推测这一效应是以往有关测量 o -Ps 衰变率的精密实验中尚未被察觉的主要系统误差源.

一、引 言

电子偶素 (Positronium, 简称 Ps) 是由正电子和电子形成的束缚态. 根据其中正、负电子的自旋取向是平行或反平行, Ps 分为三重态 (3S_1 态, 简称 o -Ps) 和单态 (1S_0 态, 简称 p -Ps) 两种. p -Ps 自衰变寿命很短 (125 Ps), 衰变成两条共线反平行, 能量为 0.511MeV 的 γ 射线. o -Ps 自衰变寿命很长 (142ns), 衰变为三条共面、能量连续分布的 γ 射线. 在磁场的诱导下, 三重态中磁量子数 $m = 0$ 的态会与单态混合, 发生双光子衰变, 缩短了寿命.

Ps 在超细氧化物粉末^[1,2]和气凝硅胶^[3,4]中的形成、扩散和湮没过程已为人们比较清楚地了解: Ps 在粉末微颗粒的内部形成, 扩散到颗粒表面, 由于表面对 Ps 呈负功函数, Ps 就以一定的动能发射到颗粒之间的自由空间中, 然后在此空间中运动和湮没. 根据这一认识, Gidley 等人^[5,6]利用 SiO_2 超细粉末体系做了测量 o -Ps 衰变率的精密实验来检验量子电动力学 (QED) 的计算. 以后, 他们又利用 MgO 粉末层作为真空腔的腔壁^[7,8]和利用气体介质^[6,9,10]多次测量了 o -Ps 的衰变率, 标称其实验精度已改进到 200ppm. 这些实验的结果在误差范围内彼此相符, 但与具有辐射修正的 QED 计算值^[11,12]都不符合, 这是值得研究的.

本文的目的在于提供一个直观的实验来观察 o -Ps 在颗粒体系中从发射到热化的能量变化过程, 研究 o -Ps 的湮没速率与其动能的关系, 进而讨论有关 o -Ps 衰变率精密实

* 国家自然科学基金资助课题.
本文 1987 年 7 月 15 日收到.

验的系统误差问题。

二、实验方法和结果

气凝硅胶由 SiO_2 颗粒按蜂窝状结构构成。本实验采用的气凝硅胶样品产自瑞典，密度是 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ ，样品中 SiO_2 颗粒的平均直径是 50 \AA ，样品在使用前于 10^{-3} 托、 200°C 条件下退火 4 小时除水。共准备了两个样品，其中大样品 ($\phi 30\text{mm} \times 30\text{mm}$) 内有滴在 $1\mu\text{m}$ 厚的 Ni 箔上的 $5\mu\text{Ci } ^{22}\text{Na}$ 放射源，用于寿命谱测量；小样品 ($\phi 14\text{mm} \times 26\text{mm}$) 内有一块厚度为 $40\mu\text{m}$ ，滴有 $1.5\mu\text{Ci } ^{22}\text{Na}$ 源的塑料闪烁膜作为 β^+ 触发计数器，用于测量湮没辐射的 Doppler 展宽谱。

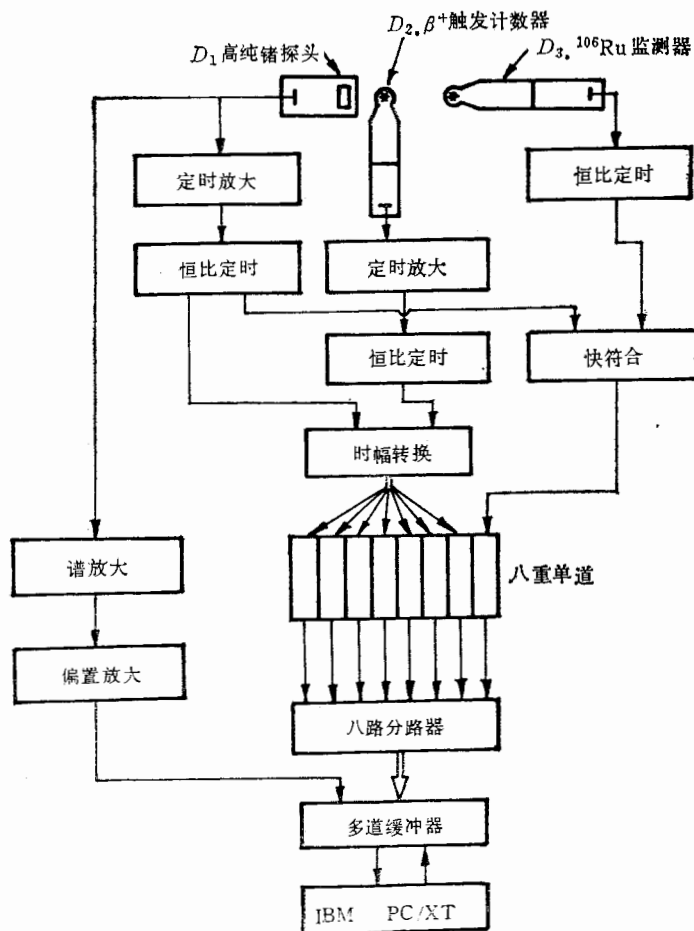


图 1 实验装置示意图

图 1 为实验装置的示意图。它是正电子寿命谱仪和高纯锗 γ 能谱仪的联合。其中 D_2 是 β^+ 触发计数器(上面提到的小样品)，提供时间起始信号； D_1 是高纯锗探测器，提供时间终止信号同时测量能谱； D_1 、 D_2 两个恒比定时甄别器和一个时间幅度转换器构

第一
成表
 D_1
命谱
年谱
一个
这样
的
置中
为

谱的
2);
人一
是
效应
辐射
有一

成寿命谱仪部份(可单独使用); D_3 是 ^{106}Ru 源置入塑料闪烁体中的 β^- 触发计数器, 和 D_1 构成 β^- - γ 符合, 为获高纯锗对单能 γ 射线的响应曲线而设. 从时幅转换器输出的寿命谱信号平行进入七个单道, 调节各个单道的上、下阈, 所确定的时间窗用以判选 $o\text{-Ps}$ 的年龄, 来自 D_3 和 D_1 的 β^- - γ 符合的脉冲进入第八个单道, 八个单道输出的脉冲通过一个八路分路器提供编址信号, 将多道缓冲器分成独立的八个谱区 (每谱区含 1024 道), 这样就把高纯锗探测器测得的混合能谱进行了分解, 七个谱区记录七种年龄 $o\text{-Ps}$ 湮没的 Doppler 谱, 另一个记录 ^{106}Ru 的 0.512 MeV 单能 γ 谱; 数据获取由微机在线控制. 装置中高纯锗探测器 (平面型, $\phi 44\text{mm} \times 15\text{mm}$) 对于 0.512 MeV 的 γ 线的能量分辨率为 $\text{FWHM} = 1.089\text{keV}$, 寿命谱仪的时间分辨率 $\text{FWHM} = 5.9\text{ns}$.

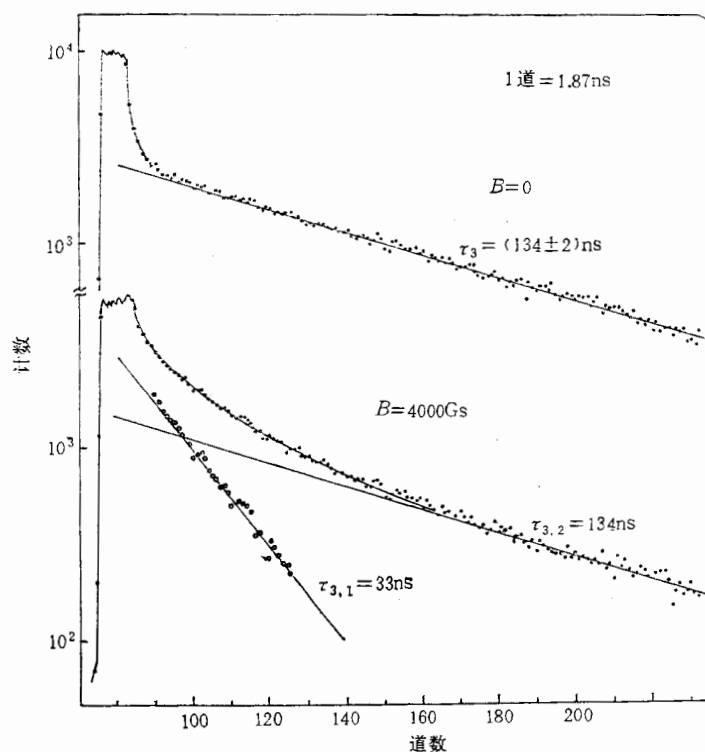


图 2 $o\text{-Ps}$ 寿命谱长成份在磁场作用下的变化

首先测量了真空(10^{-5} 托)下正电子在气凝硅胶中的寿命谱. 在不加外磁场时, 寿命谱的长成份近似为单一成份, 主要是 $o\text{-Ps}$ 3γ 的贡献, 其寿命值 $\tau_3 = 134 \pm 2\text{ns}$ (见图 2), 接近 $o\text{-Ps}$ 的自衰变寿命 142ns . 为了观察磁猝灭效应引起的寿命谱的变化, 样品置入一磁场中. 在磁场强度 $B = 4000\text{GS}$ 时, 寿命谱长成份分裂成两个成份, 寿命值分别是 $\tau_{3,1} = 33\text{ns}$, $\tau_{3,2} = 134\text{ns}$ (见图 2). $\tau_{3,1}$ 主要是 2γ 的贡献, 来自于 $o\text{-Ps}$ 的磁猝灭效应. 把 $\tau_{3,1}$ 分成不同时间段作为时间窗控制测能谱, 所得即属于不同年龄 $o\text{-Ps}$ 湮没辐射的能谱.

$o\text{-Ps}$ 有一定的动能, 它被猝灭成 2γ 湮没时的能谱因 Doppler 效应相对于单能 γ 谱有一加宽量, 加宽量的大小与 $o\text{-Ps}$ 的动能有关. 图 3 给出一个实例. 图中的 Doppler

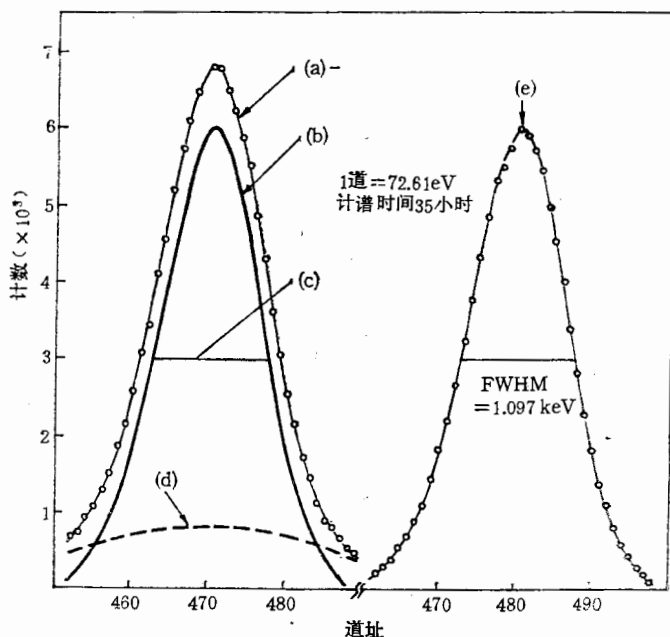


图 3 Doppler 加宽谱实例

(a) 原始数据, (b) o -Ps 磁猝灭产生 2γ 射线的 Doppler 加宽谱, (c) $\text{FWHM} = 1.18\text{keV}$ 相当于 o -Ps 动能为 0.033eV , (d) Pick-off 本底谱, (e) 伴随测量的 ^{106}Ru 的 511.856keV 单能 γ 谱。

加宽谱相应的 o -Ps 的平均年龄为 60ns 。无外磁场时, Doppler 加宽谱为一强度很弱的宽峰,是 o -Ps 被 pick-off 猝灭的结果;有外磁场存在时,上述 pick-off 本底上有一尖峰部份,这是 o -Ps 被磁场猝灭的贡献,将它扣除 pick-off 本底,可得到反映 o -Ps 动能的净 Doppler 加宽谱。

净 Doppler 加宽谱和能谱仪响应曲线都呈单高斯分布。以 $W(G)$ 表示高纯锗探头在 ^{106}Ru 监测条件下的能量分辨率, W 表示净 Doppler 加宽谱的半高宽,则有:

$$W(\text{Ps}) = \sqrt{W^2 - [W(G)]^2}, \quad (1)$$

其中 $W(\text{Ps})$ 直接与 Ps 的动能有关。

参照一维角关联实验中有关动量分布和 Ps 能量的关系^[43],可以推知 $W(\text{Ps})$ 与 Ps 动能的关系可由下式近似计算:

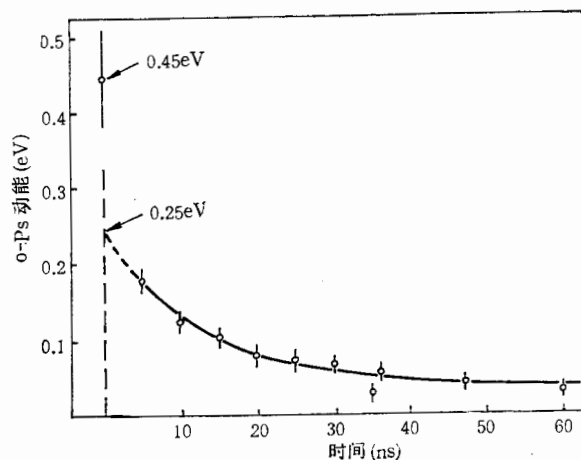
$$E = [0.847W(\text{Ps})]^2, \quad (2)$$

式中, E 、 $W(\text{Ps})$ 的单位分别是 eV 和 keV。对于热化了的 Ps 原子来说,上式得到的 E 是 Ps 动能的均方根值。

根据(1)、(2)式对得到的净 Doppler 加宽谱进行处理,可以得到与所选的时间窗相应的 o -Ps 的动能,亦即 o -Ps 动能与其年龄的关系,结果表示于图 4 中。图中所标的误差主要来自计数统计误差,因为在上述测量中,由 ^{106}Ru 单能 γ 谱伴随测量 Doppler 加宽谱,抵消了电子学漂移的影响。由于是长时间测量,所得的 ^{106}Ru 单能 γ 谱的半高宽 $\text{FWHM} = 1.097\text{keV}$,比短时间测到的能谱仪的分辨率 1.089keV 略大(见图 3)。

通
(8)
量,
公

其
变
这
平
地
P
平
移
没
mn
Me
酒

图 4 o -Ps 在气凝硅胶中的慢化曲线

○ 实验点, — 拟合曲线

对 o -Ps 在气凝硅胶中的慢化过程可以作一些理论上的考虑。Hyodo^[4]认为: o -Ps 通过与 SiO_2 原子团的连续弹性碰撞而热化, 每次碰撞时 o -Ps 的能量损失为: $\Delta E = (8m/2M)\left(E - \frac{3}{2}kT\right)$, 其中 m 是电子质量, M 是与 o -Ps 碰撞的 SiO_2 原子团的质量, k 是 Boltzmann 常数, T 是样品温度。根据这个假设, 可得到关于 o -Ps 能量变化的公式:

$$\begin{cases} E(t) = \left[\frac{1 + 0.5195 \exp(-at)}{1 - 0.5195 \exp(-at)} \right]^2 \cdot \frac{3}{2} kT, \\ a = \frac{1090}{ru} \rho^* \end{cases} \quad (3)$$

其中 r 是 SiO_2 颗粒的平均半径, u 是以原子质量单位表示的 M 数值, ρ^* 是一个无量纲变量, 表示单位自由体积的颗粒质量。对本实验的样品来说, $r = 25 \text{ \AA}$, $\rho^* = 0.0476$, 将这两个参数和 $\frac{3}{2}kT = 0.025 \text{ eV}$ 代入(3)式并作拟合, 发现当取 $u = 72$ 时 (意味着 Ps 平均每次与三至四个原子相碰), (3)式与实验点符合得很好(见图 4)。从图 4 可以清楚地看到: 在 0.06 eV 以下, o -Ps 慢化得相当慢, 至少 60 ns 以后才能热化。

将图 4 中的拟合曲线外推到 $t = 0$ 时刻, 得到 $E_0 = 0.25 \text{ eV}$ 。这个数值不仅低于 Ps 的发射动能 0.8 eV ^[4], 而且比实验中测到的 0.45 eV (这应该是 0 到 2.5 ns 内 o -Ps 的平均动能) 低。可以认为: o -Ps 在离开颗粒表面的最初阶段与颗粒发生了有大的能量转移过程的非弹性碰撞。

为了研究 o -Ps 慢化过程中与 SiO_2 原子团碰撞而引起的 pick-off 效应对 o -Ps 湮没率的影响, 我们做了一个无磁场条件下的特殊的寿命测量。寿命谱仪起始道采用 $\phi 75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 的大塑料闪烁体, 停止道仍用高纯锗探头, 但其能窗开得很窄, 只接受 0.511 MeV 的光峰部份。这样测到的谱就基本上是来自 o -Ps 因 pick-off 效应而发生的 2γ 湮没的寿命谱, 结果见图 5。从图上可以看到: 寿命谱长成份在 t 很大时, 寿命值 τ_2 为

的尖能

探

1)

Ps

2)

到

相

误

宽

宽

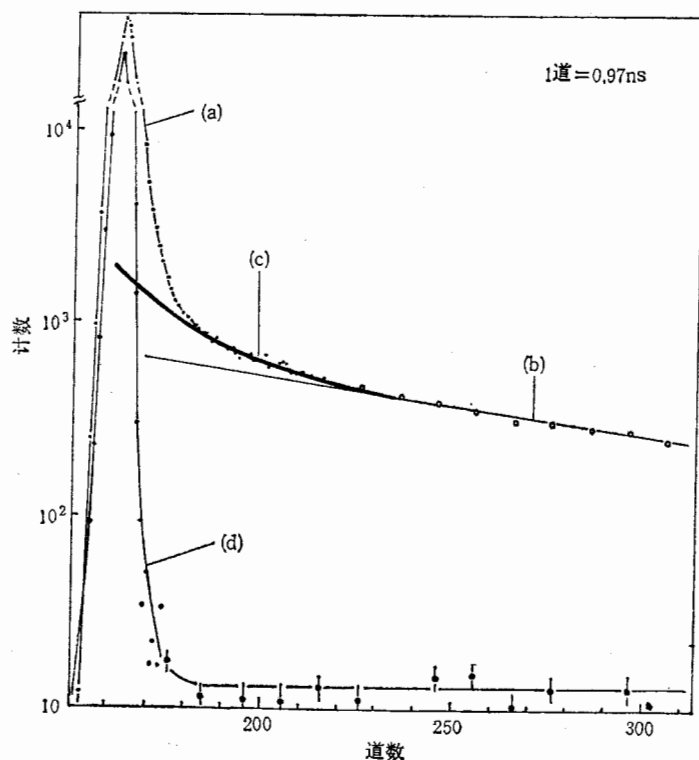


图 5 o -Ps 在气凝硅胶中 2τ 湮没寿命谱

(a) 实测 2τ 湮没寿命谱的短成份, (b) 实测 2τ 湮没寿命谱的长成份 τ_3 , (c) 根据图 4 中慢化曲线得到的拟合曲线, (d) 测 ^{22}Na 在纯铁中所得寿命谱作为仪器的瞬发符合曲线, $\text{FWHM} = 2.4\text{ns}$, $\text{FW} 0.1\text{M} = 4.9\text{ns}$, $\text{FW} 0.01\text{M} = 7.2\text{ns}$, $\text{FW} 0.001\text{M} = 10\text{ns}$, $\text{FW} 0.0001\text{M} = 19\text{ns}$

134ns, 和通常的测量是相同的。但 $t < 60\text{ns}$ 时, τ_3 明显不是常数。

o -Ps 的 pick-off 几率正比于它与气凝硅胶中 SiO_2 颗粒的碰撞频率 ν , 或者说正比于其运动速度 $v(t)$ 。若假定其 pick-off 湮没截面是一常数, 则根据慢化曲线拟合得到的寿命谱与实测的谱符合(见图 5)。以上结果表明: o -Ps 速度越大, 其湮没速率也越大, 未热化的 o -Ps 对寿命谱长成份影响越大。

三、讨 论

最近的 X 射线散射实验表明, 气凝硅胶和 SiO_2 粉末在结构上是相似的^[12], 因此我们可以讨论上述实验结果对 Gidley、Marko、Rich (GMR) 利用 SiO_2 粉末体系测量 o -Ps 衰变率的精密实验^[5]的影响。

从(3)式可以看出: o -Ps 达到热平衡的时间与 ρ^* 、 r 这两个参数有关。GMR 实验的每一个实验点(见图 6)都有一组特定的 ρ^* 、 r 值, 对应着一条慢化曲线。我们发现图 6 中有些点是在 o -Ps 未热化的条件下得到的, 尤其是那些低密度的点。例如对第 8 点

来说
作拟
命谱
的有
据修
验结
1
分辨
行0.2
5
等人^[12]
似,推
截面
误差。
效应

E
邦男

[1] F
[2] V
[3] T

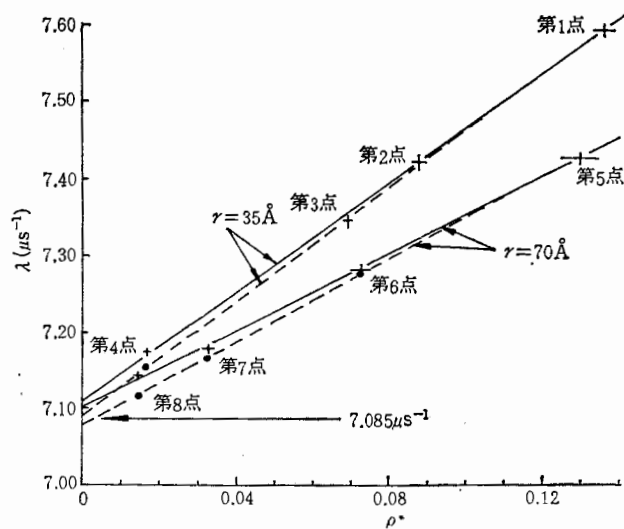


图6 GMR 实验值及其修正

——+—— GMR 实验值, ---•---修正值

来说, $r = 70 \text{ \AA}$, $\rho^* = 0.015$, 这种条件下, $o\text{-Ps}$ 至少 1000 ns 以后才能热化, 在 GMR 作拟合计算取的 80 ns 到 450 ns 这段时间内远未热化。上述讨论的未热化的 $o\text{-Ps}$ 对寿命谱长成份的影响使得 GMR 所得实验点有必要作修正。我们根据这些作者已经发表的有关此实验的原始数据^[16]和计算步骤^[17]以及本文中的公式(3)进行了可能的修正, 并根据修正后的实验点重新外推, 得到 $o\text{-Ps}$ 衰变率是 $7.085 \pm 0.006 \mu\text{s}^{-1}$, 比 GMR 原来实验结果 $7.104 \pm 0.006 \mu\text{s}^{-1}$ 降低了 0.27% , 见图 6。

1978 年, Gidley 等人^[16]对于他们的 SiO_2 粉末实验进行了样品几何效应以及探测器分辨效应的修正, 给出 $o\text{-Ps}$ 衰变率为 $7.067 \pm 0.021 \mu\text{s}^{-1}$, 我们考虑如果把此值再进行 0.27% 的非热化效应的修正, 其结果将十分逼近 QED 计算值^[13] $7.03893(7) \mu\text{s}^{-1}$ 。

对于 MgO 体系, Curry 等人^[17]测得厚靶条件下 $o\text{-Ps}$ 发射动能为 0.28 eV , Gidley 等人^[18]测得在粉末薄靶条件下发射动能最大到 0.8 eV , 这与我们对气凝硅胶的观察十分相似, 推测在 MgO 表面发射的快 $o\text{-Ps}$ 也将与 MgO 分子团发生非弹性碰撞, 由于碰撞截面很大, 将会给 Gidley 等人用 MgO 作真空腔壁测量 $o\text{-Ps}$ 衰变率的实验引入系统误差。关于 Gidley 等人用气体介质进行的实验也同样存在 $o\text{-Ps}$ 非弹性碰撞和非热化效应的问题, 需要重新考虑。

日本国千葉利信博士测量了气凝硅胶样品的 SiO_2 颗粒直径, 兵頭俊夫博士和藤原邦男教授提出了有益的建议和讨论, 作者向他们深表谢意。

参 考 文 献

- [1] R. Paulin and G. Ambrosino, *J. Phys.*, 29(1968), 198.
- [2] W. Brandt and R. Paulin, *Phys. Rev. Lett.*, 21(1968), 193.
- [3] T. B. Chang et al., *Proc. ICPA-6*, (1982), 698.

- [4] T. B. Chang et al., Proc. ICPA-7, (1985), 974.
- [5] D. W. Gidley, K. A. Marko and A. Rich, *Phys. Rev. Lett.*, **36**(1976), 395.
- [6] D. W. Gidley et al., *Phys. Rev. Lett.*, **40**(1978), 737.
- [7] D. W. Gidley et al., *Phys. Rev. Lett.*, **37**(1976), 729.
- [8] D. W. Gidley et al., *Phys. Lett.*, **A69**(1978), 97.
- [9] D. W. Gidley et al., *Phys. Rep. Lett.*, **49**(1982), 525.
- [10] C. I. Westbrook et al., *Phys. Rev. Lett.*, **58**(1987), 1328.
- [11] W. E. Caswell et al., *Phys. Rev. Lett.*, **38**(1976), 488.
- [12] G. S. Adkins, *Annals of Phys.*, **146**(1983), 78.
- [13] K. Fujiwara, Proc. ICPA-6, (1982), 615.
- [14] T. Hyodo, Private communication, Dec. (1986).
- [15] D. W. Schaefer and K. D. Keefer, *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986), 2199.
- [16] A. Rich, *Rev. Mod. Phys.*, **V53**, No. **1**(1981), 147.
- [17] S. M. Curry and A. L. Schawlow, *Phys. Lett.*, **A35**(1971), 5.

EFFECT OF THE ENERGY LOSS PROCESS ON THE ANNIHILATION OF ORTHOPOSITRONIUM IN SILICA AEROGEL

XU MIN ZENG XIANGTAO HUANG KAIPING ZHANG TIANGBAO

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

ABSTRACT

The Doppler broadening of the two-photon annihilation line arising from the intermediate lifetime of positronium in a magnetic field has been measured using a time selecting γ -ray spectrometer. From the relation between the kinetic energy and age, we have found that orthopositronium loses its energy rapidly between about 1eV and 0.25 eV through inelastic collisions with SiO₂ molecules and then is slowly thermalized through successive elastic collisions. It is also observed that the annihilation rate of the orthopositronium is larger while it has larger speed. The effect of the gradual thermalization of orthopositronium should be a main systematic error source, which was not understood, in the previous precision experiments on the decay rate of orthopositronium.