

在低能 e^+e^- 湮没中寻找低质量中性粒子

何景棠 朱国义 吕雨生 董晓黎

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1992 年 1 月 4 日收到, 1993 年 5 月 24 日收到修改稿

摘 要

报道利用单态正电子偶素湮没, 在过程 $e^+e^-(^1S_0) \rightarrow \gamma + U$ 中探测单能 γ 射线, 寻找低质量中性粒子 U 的实验结果. 在 2σ 的统计误差水平上, 没有探测到 $M_U < 2m_e$ 的低质量中性粒子.

关键词 低质量, 中性粒子, 正电子偶素.

1 引 言

超对称理论预言存在引力微子的伙伴粒子, 即自旋为 1 的新的中性玻色子 $U^{[1]}$. 如果 U 粒子的质量 $M_U < 1\text{MeV}$, 其寿命 $\tau_U \sim 10^{-9}\text{s}$, 它主要衰变为中微子对 $\nu\bar{\nu}$.

实验上可以在正电子偶素湮没过程中, 例如

$$e^+e^- \rightarrow \gamma + U, \quad (1)$$

测量反冲的单能 γ 射线去寻找低质量中性粒子 U . 由于是两体衰变, 单能 γ 的能量为:

$$E_\gamma = m_e \left[1 - \frac{1}{4} \frac{M_U^2}{m_e^2} \right], \quad (2)$$

$$M_U = 2m_e \left[1 - \left(\frac{E_\gamma}{m_e} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (3)$$

由于角动量守恒, 单态正电子偶素 $e^+e^-(^1S_0)$ 通常衰变为 2γ , 即

$$e^+e^-(^1S_0) \rightarrow \gamma + \gamma. \quad (4)$$

如果 U 粒子的量子数与光子相同, 则它也会出现在单态正电子偶素 1S_0 的衰变过程中, 即

$$e^+e^-(^1S_0) \rightarrow \gamma + U. \quad (5)$$

如果分支比

$$\frac{BR(e^+e^- \rightarrow \gamma + U)}{BR(e^+e^- \rightarrow \gamma + \gamma)} < 10^{-5},$$

则存在 U 粒子与电子的 $(g-2)$ 因子仍然没有矛盾^[1].

从前有人在正电子偶素湮没过程中寻找过轴子 (Axion) a^0 , 因轴子的自旋宇称为 0^- , 由于守恒定律所支配, 单态正电子偶素 $e^+e^-(^1S_0)$ 不可能湮没成 γa^0 . 寻找轴子 a^0 的实验都是利用正电子偶素三重态 $e^+e^-(^3S_1)$, 即

$$e^+e^-(^3S_1) \rightarrow \gamma + a^0, \quad (6)$$

探测单能 γ 射线, 以判断是否存在轴子 a^0 . 实验都给出负的结果^[2-5]. 目前一般人认为不

存在可见的轴子 a^0 。但没有人从实验上找过上述的自旋为 1 的超对称新玻色子 U。

我们采用 ^{22}Na 正电子放射源发射的 e^+ ，与物质中的 e^- 形成 e^+e^- 的 1S_0 态，利用过程(5)探测单能 γ 射线，以判断是否存在低质量中性粒子 U。

2 实验装置

$e^+e^-(^1S_0)$ 态的寿命为 0.13ns，而 $e^+e^-(^3S_1)$ 态的寿命约为 140ns，它们之间相差约 10^3 倍。寻找轴子的实验，利用 e^+ 发出后 15—40ns 的延迟符合将 $e^+e^-(^1S_0)$ 态去掉，选取 $e^+e^-(^3S_1)$ 态，本实验则利用 e^+ 发射后瞬时符合的办法选取 1S_0 态。实验装置如图 1 所示。

用上海硅酸盐研究所生产的 25 块 $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 7\text{cm}$ 的短 BGO 晶体组成一个 5×5 BGO 晶体阵列，四周再用 24 块 $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 20\text{cm}$ 的长 BGO 晶体包围。总共 $7 \times 7 = 49$ 块 BGO 晶体围成一个半空心的 BGO 盒子。每块 BGO 用一个日本 Hamamatsu 公司的 R1213 小型光电倍增管读出。各块 BGO 晶体之间光缘绝。用微型计算机 IBM-PC/XT-286 通过标准 CAMAC 接口连接 BADC，对所有 49 路 BGO 晶体探测器的工作状态进行监测。

将 e^+ 放射源 ^{22}Na 放于半空心 BGO 盒子的中央，用原子能科学研究院生产的 $\phi 60\text{mm}$

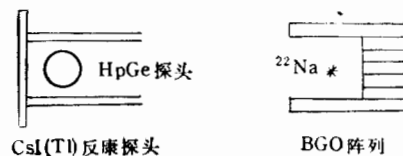


图 1 实验安排示意图

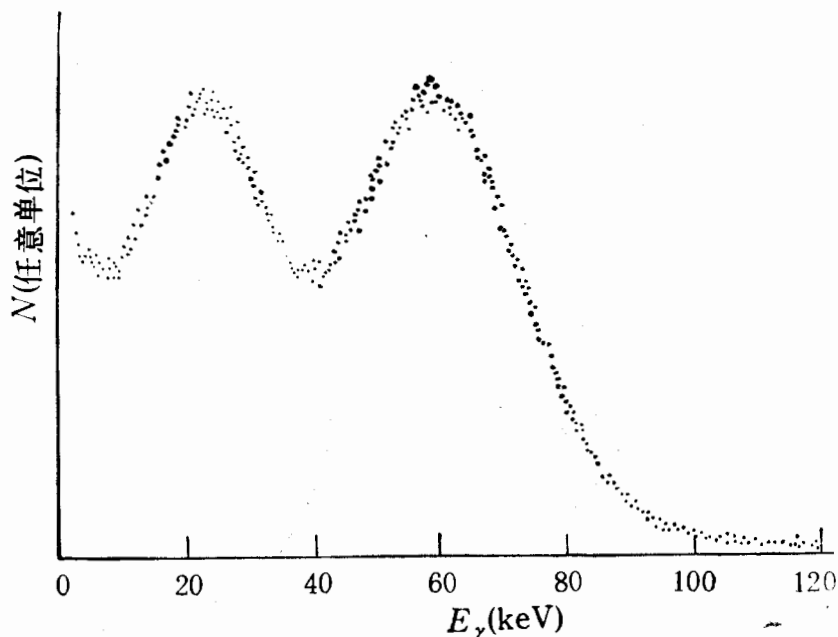


图 2 反康普顿系统的 CsI(Tl) 探测器对 ^{241}Am 的 59.5keV γ 射线的响应

$\times 60\text{mm}$ 约为 170cm^3 的高纯锗 (HPGe) 单晶半导体探测器探测过程 (5) 产生的单

能 γ 射线。用 BGO 盒子四周的长 BGO 晶体探测 ^{22}Na 的 1.27MeV γ 射线作为 e^+ 的起始信号。长晶体输出的信号与 HPGe 信号作瞬时符合,符合电路的分辨时间为 40ns。这是由 BGO 和 HpGe 信号较慢所决定的。用 BGO 盒子中央的 $5 \times 5 = 25$ 块 7cm 长的 BGO 晶体阵列作为对本底过程(4)的 511keV γ 射线的反符合。反符合的甄别阈约为 100keV。实验测得对 $e^+e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ 的 511keV γ 射线的反符合效率为 $\eta = 40\%$ 。在 HPGe 探头的四面,放置三个 20cm \times 20cm \times 0.6cm 的 CsI(Tl) 晶体探测器和一个 $\phi 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 的 NaI(Tl) 晶体探测器作为反康普顿探测装置,图 2 是 CsI(Tl) 晶体探测器对 ^{241}Am 的 59.5keV 低能 γ 射线的测量结果,可以看到它们的甄别阈约为 10keV。HPGe 测到的真正的单 γ 信号被送到多道脉冲幅度分析器记录和进行幅度分析。

3 实验结果

整个系统的稳定度和重复性约为 0.1%, HPGe 对 511keV γ 射线的能量分辨率为 2keV。测量结果如图 3 所示。其中看到五个明显的 γ 射线峰。它们分别是:

1. $e^+e^-(^1S_0) \rightarrow \gamma + \gamma$ 本底的 511keV γ 峰。
2. $E_\gamma \approx 170\text{keV}$ 的属于 511keV γ 射线的背散射峰。

3. BGO 中的 ^{207}Bi 杂质放出的 84.8keV, 75.0 keV 和 72.8keV 的 γ 射线。图 4 是 HPGe 探测到的 BGO 晶体中所含的 ^{207}Bi 放出的 84.8keV, 75.0keV 和 72.8keV 三条 γ 射线的能谱。可以看到, HPGe 探测器能把 75keV 和 72.8keV 两条 γ 射线分开。

这五条能量已知的 γ 射线为整个探测器系统提供了良好的能量定标的标准。

取数据约两个月,计数时间为 $1.1 \times 10^7\text{s}$ 。总的反符合事例触发数为 22966643。对认为可能存在单能 γ 峰的位置,按探测器的能量分辨率给出该峰的全宽度,用多项式拟合该处的本底分布,用高斯分布拟合峰,求出该处的本底计数和峰面积内的计数。按数

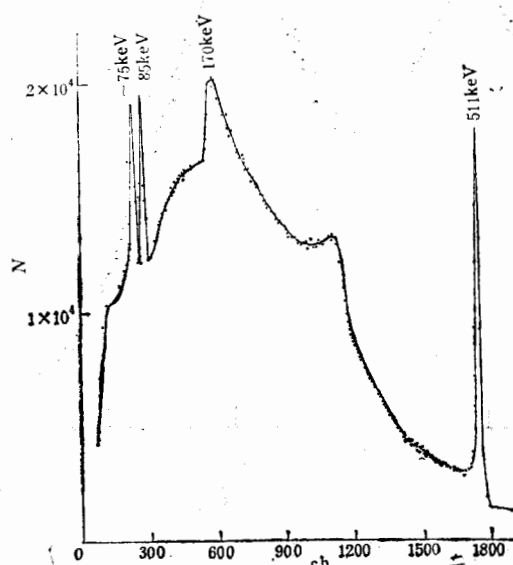
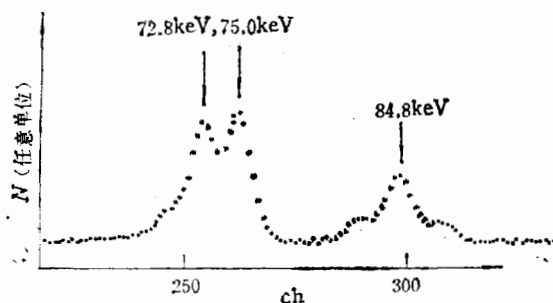
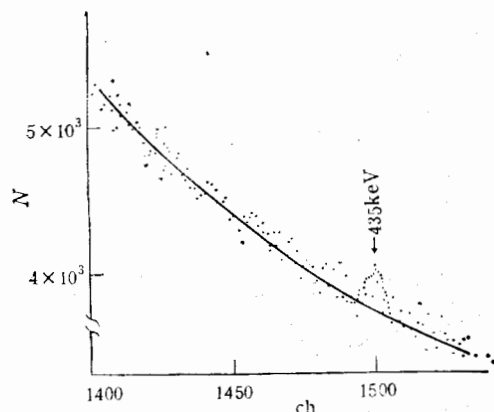


图 3 $e^+e^- \rightarrow \gamma + U$ 单 γ 探测结果

图 4 HPGe 探头对 ^{207}Bi 的 72.8、75.0 和 84.8keV γ 射线的响应图 5 $E_\gamma = 435\text{keV}$ 处本底拟合结果

据分析的统计学定出该峰的统计意义。例如,在 $E_\gamma = 435\text{keV}$ 处,似乎有一个小鼓包,如图 5 所示。运用上述程序,求得鼓包下面的总计数 $N = 58919$,本底计数 $B = 58402$,扣除本底之后,鼓包面积内的总计数 $N - B = 517$ 。按统计学定义,检验统计量取为^[6]:

$$N_\sigma = \frac{N - B}{\sqrt{V(N - B)}} = \frac{N - B}{\sqrt{2B}} = \frac{517}{341} = 1.51,$$

其中 $\sqrt{V(N - B)}$ 是标准差 σ 。上式表明该峰的显著性为 1.51σ , 小于 2σ , 即该峰可被认为是单能 γ 峰的显著性小于 2σ 。

在 $E_\gamma = 435\text{keV}$ 能区,计数标准差 $\sigma = 341$, 分支比

$$R = \frac{BR(e^+e^- \rightarrow \gamma + U)}{BR(e^+e^- \rightarrow \gamma + \gamma)} < 4.1 \times 10^{-6} \text{ (95\% C.L.)}.$$

由于本底计数,反康普顿效率,探测器的能量响应在不同能区是不同的,考虑了上述各种因素,对 E_γ 为 100, 200, 300 和 400keV 能区,以 95% 的置信水平,本实验给出对单能 γ 峰分支比的探测灵敏度如表 1 所示。

因此,本实验测量的结果是:在 $E_\gamma = 100\text{keV} - 480\text{keV}$ 区域内,没有看到统计意义大于 2σ 的单能 γ 峰,即在本实验的探测灵敏度之下,没有探测到 $M_U < 2M_e$ 的低质量

中性粒子。

表 1

$E_r(\text{keV})$	100	200	300	400
R	$<4.5 \times 10^{-6}$	$<5.6 \times 10^{-6}$	$<5.4 \times 10^{-6}$	$<4.3 \times 10^{-6}$

感谢高能所物理一室、二室、三室、十四室、电子学室和技安室的同志为本实验提供许多仪器设备。

参 考 文 献

- [1] P. Fayet and M. Mezard, *Phys. Lett.*, **104B** (1981) 226.
- [2] G. Carboni, *Phys. Lett.*, **101B**(1981) 444.
- [3] G. Carboni and W. Dahme, *Phys. Lett.*, **123B**(1983) 349.
- [4] U. Amaldi et al. *Phys. Lett.*, **153B** (1985)444.
- [5] Tang Xiaowei, *Chinese Phys. Lett.*, **4**(1987) 1.
- [6] 朱永生, 实验物理中的概率和统计, 科学出版社, (1991)398页.

Search for Light Neutral Particle in Low Energy e^+e^- Annihilation

He Jingtang Zhu Guoyi Lü Yusheng Dong Xiaoli

*(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica,
Beijing 100039)*

Received on January 4, 1992

Abstract

This paper reports the experiment result from a search for light neutral particle U by measuring the monoenergetic gamma ray in the singlet positronium annihilation: $e^+e^-(^1S_0) \rightarrow \gamma + U$. No evidence for the existence of such a particle of mass $M_U < 2m_e$ has been found on the level of 2σ standard deviation.

Key words low mass, neutral particle, positronium.