

在 e^+e^- 湮灭中轴子 (Axion) 的产生 及其实验建议

张 长 春

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

我们计算了在 e^+e^- 湮灭中轴子的产生截面, 建议利用 β^+ 放射源在 e^+e^- 湮灭实验中寻找轴子。我们还进一步讨论了在这种实验中所用探测器的性能要求。

一、引 言

规范理论用于描述弱电统一现象取得了成功^[1]。但是, 当人们把这一理论推广到强作用现象描述时, 却发生了瞬子解引起的 P 和 T 的破坏。显然, 这个结果同实验事实矛盾。1977年 Peccei 和 Quinn^[2] 提出: 若引进 Chiral 对称性, 可以解决这一困难。第二年, Weinberg^[3] 和 Wilczek^[4] 指出: 这种对称性要求存在一种新的中性玻色子—轴子 (Axion)。轴子的自旋为 0, 具有负宇称。它的质量约在 0.1 至 1 MeV/ c^2 之间, 但也不排除它具有更大质量的可能性。此后, 不少物理学家研究了这种粒子的性质^[5]。但是, 几年来, 对于这种粒子的存在一直没有找到实验证据^[5,6]。

1980年, Faissner 等人^[7]在 SIN 的 590 MeV 质子加速器上, 按衰变方式

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

$$a \rightarrow \gamma\gamma. \quad (2)$$

从束流垃圾中寻找轴子 a 。在此理论预期值低 10^{-7} 的水平下实验没有找到按方式 (1) 衰变的轴子事例。他们得出结论: 若轴子存在, 其质量应小于二倍电子质量。

如果轴子质量小于二倍电子质量, 那么它就能在 e^+e^- 湮灭中产生。本文计算了在 e^+e^- 湮灭中轴子的产生截面, 建议在 e^+e^- 湮灭实验中寻找轴子, 且对探测器的性能要求作了讨论。

二、在 e^+e^- 湮灭中轴子产生截面

按 Weinberg 等人的理论^[3-5], 轴子对带电轻子的耦合具有以下形式

本文 1981 年 5 月 23 日收到。

【注】: 本工作完成之后, 经杜东生同志提醒, 我见到了 CERN 预印本: “一个寻找轴子的方法” (CERN-EP 81-20)。该文提出的物理思想与探测轴子的方法同本文一致。该文提供一条消息, H. Faissner 组已报告: 他们找到了 14 个 $a \rightarrow \gamma\gamma$ 衰变事例。尚未见到关于这项工作的详细文章。

$$\mathcal{L}_{\text{mix}} = ig_l \bar{l} \gamma_5 l \phi. \quad (3)$$

这里, l 表示带电轻子场, ϕ 表示轴子场, 以及

$$g_l = \frac{m_l}{f_\phi} \cdot \frac{1}{x} \quad (4)$$

m_l 是带电轻子的质量, 理论估计 $f_\phi \simeq 250 \text{ GeV}$, $x \simeq 1$.

我们考虑正负电子湮灭过程

$$e^+e^- \rightarrow a\gamma, \quad (5)$$

它由两个费曼图组成, 如图 1 所示. 我们得到在实验室参考系中轴子产生的微分截面为

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\Omega_{k_1}} = & \frac{\alpha\alpha_a}{x^2} \cdot \frac{1}{8m_e P_+} \cdot \frac{k_1^2}{(E_+ + m_e)k_1 - P_+ E_1 \cos\theta_1} \\ & \cdot \left[\frac{-2m_e^2(E_+ + m_e)^2 - \frac{m_a^4}{2} + 2m_e m_a^2(E_1 + E_2)}{m_e E_2 \left(-m_e E_1 + \frac{m_a^2}{2}\right)} \right. \\ & \left. + \frac{m_a^2 k_1^2 \sin^2(\theta_1 + \theta_2)}{\left(-m_e E_1 + \frac{m_a^2}{2}\right)^2} \right], \quad (6) \end{aligned}$$

其中 $\alpha = 1/137$, θ_1 和 θ_2 分别为光子和轴子的出射角, k_1 和 E_1 为出射轴子的动量和能量, k_2 和 E_2 为出射光子的动量和能量, P_+ 为入射正电子的动量, $d\Omega_{k_1}$ 是出射轴子的立体角元, m_e 和 m_a 分别为电子和轴子的质量. 定义 α_a 为

$$\begin{aligned} \alpha_a &= \frac{(m_l/f_\phi)^2}{4\pi} \\ &= \frac{g_l^2}{4\pi} \cdot x^2 \end{aligned}$$

且 $\alpha_a/\alpha \simeq 4 \times 10^{-11}$.

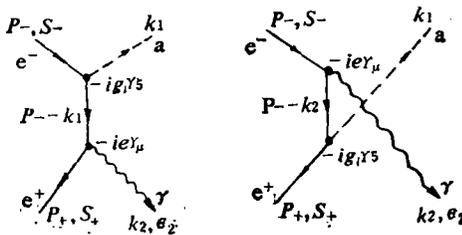


图 1 $e^+e^- \rightarrow a\gamma$ 湮灭过程的费曼图表示

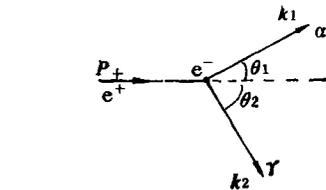


图 2 $e^+e^- \rightarrow a\gamma$ 过程的运动学关系

当入射正电子速度 β_+ 接近于零时, (6) 式简化

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_{k_1}} = \frac{\alpha\alpha_a}{x^2} \cdot \frac{k_1^2}{m_e^2 \beta_+} \cdot \frac{1}{2k_1 - \beta_+ E_1 \cos\theta_1}, \quad (7)$$

这儿, 轴子能量和动量为 $E_1 = (4m_e^2 + m_a^2)/4m_e$, $k_1 = (4m_e^2 - m_a^2)/4m_e$. 由式 (7) 对 4π 立体角积分, 算出在非极化 e^+e^- 自由湮灭中轴子产生的总截面

$$\sigma_{\text{自由}}(e^+e^- \rightarrow a\gamma) = \frac{\alpha\alpha_a}{x^2} \cdot \frac{2\pi k_1}{m_e^3 \beta_+}, \quad \text{当 } \beta_+ \ll 1 \text{ 时.} \quad (8)$$

为了便于比较,在非极化 e^+e^- 自由湮灭中双光子和三光子产生的总截面^[9]给出如下,当 $\beta_+ \ll 1$

$$\sigma_{\text{自由}}(e^+e^- \rightarrow 2\gamma) = \frac{\alpha^2\pi}{m_e^2\beta_+}, \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{自由}}(e^+e^- \rightarrow 3\gamma) = \frac{4}{3} \frac{\alpha^3(\pi^2 - 9)}{m_e^2\beta_+}. \quad (10)$$

由此,我们得到当 m_s 趋于 0 时 $a\gamma$ 和 2γ 事例产率之比等于

$$\frac{\sigma_{\text{自由}}(e^+e^- \rightarrow a\gamma)}{\sigma_{\text{自由}}(e^+e^- \rightarrow 2\gamma)} = \frac{x_s}{x} \cdot \frac{2}{x^2} \simeq 8 \times 10^{-11}, \quad (11)$$

正电子在气体中(如 Freon, He, A 和 N_2 等)飞行时,约以 1/3 几率形成基态的电子偶素 (positronium)^[9]. 总角动量为 0 的态记为 1S_0 , 它的正负电子自旋取向相反,总角动量为 1 的态记为 3S_1 , 它的正负电子自旋取向相同. 3S_1 态的总角动量第三分量允许有三个取向. 假定 1S_0 态和 3S_1 态的衰变率分别为 η_0 和 η_1 , 那么电子偶素的平均衰变率应当是

$$\eta = \frac{1}{4} \eta_0 + \frac{3}{4} \eta_1. \quad (12)$$

η 等于非极化 e^+e^- 所有湮灭道的初态自旋平均衰变率之和. 忽略 4γ 以上产生过程,则有

$$\eta \simeq \eta_{2\gamma} + \eta_{3\gamma}$$

考虑到角动量守恒,所以得到

$$\begin{aligned} \eta_0 &\simeq 4\eta_{2\gamma}, \\ \eta_1 &\simeq \frac{4}{3} \eta_{3\gamma}. \end{aligned} \quad (13)$$

因为轴子自旋为 0, 衰变道 $e^+e^- \rightarrow a\gamma$ 对 1S_0 态禁戒, 而对 3S_1 态允许. 因此, 电子偶素衰变产生 2γ 、 3γ 和 $a\gamma$ 的衰变率之比分别为(当 $m_s \rightarrow 0$)

$$\frac{\eta_2}{\eta_0} = \frac{\frac{4}{3} \eta_{a\gamma}}{4\eta_{2\gamma}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\sigma_{\text{自由}}(e^+e^- \rightarrow a\gamma)}{\sigma_{\text{自由}}(e^+e^- \rightarrow 2\gamma)} = 2.7 \times 10^{-11}, \quad (14)$$

这儿, $\eta_2 = ^3S_1$ 态衰变成 $a\gamma$ 的事例率, 及

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \frac{\eta_{a\gamma}}{\eta_{3\gamma}} = \frac{\sigma_{\text{自由}}(e^+e^- \rightarrow a\gamma)}{\sigma_{\text{自由}}(e^+e^- \rightarrow 3\gamma)} \simeq 3 \times 10^{-8}, \quad (15)$$

上述结果表明,在电子偶素衰变中所产生的 $a\gamma$ 和 2γ 衰变率之比低于 e^+e^- 自由湮灭时的比值. 但是,由式(15)我们知道, 1S_0 和 3S_1 态平均寿命分别为 $\tau_{2\gamma} \simeq 10^{-10}$ 秒和 $\tau_{3\gamma} \simeq 1.4 \times 10^{-7}$ 秒. 通过延迟符合方法能剔除大量 2γ 背景事例,从而提高 $a\gamma$ 和多 γ 产生事例率的比值.

三、在 e^+e^- 湮灭中寻找轴子的实验考虑

从上节计算,我们看到,若在 e^+e^- 自由湮灭中测量轴子事例,主要的背景来自 2γ 产生, $a\gamma$ 和 2γ 的事例率之比为 8×10^{-11} . 为了排除 2γ 背景事例,需要一台 γ 光子绝对探

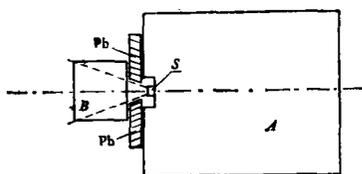


图 3 在 e^+e^- 自由湮灭中寻找轴子的实验装置图。
S 由闪烁计数器 C_1, C_2 和 β^+ 放射源组成

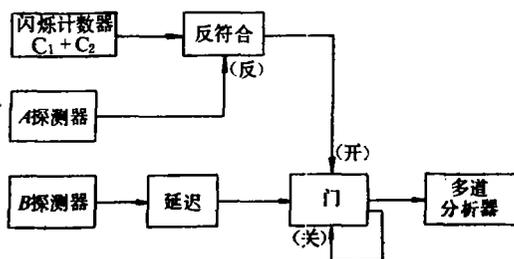


图 4 在 e^+e^- 自由湮灭中寻找轴子。
探测系统的事例选择逻辑

表 1 A、B 探测器种类与尺寸的选择

种 类	A		B
	e^+e^- 自由湮灭实验	e^+e^- 偶素衰变实验	
NaI	$\phi 75 \times 45 \text{cm}^2$	$\phi 30 \times 30 \text{cm}^2$	$\phi 20 \times 10 \text{cm}^2$
塑料闪烁体	$250 \times 250 \times 200 \text{cm}^3$	$140 \times 140 \times 140 \text{cm}^3$	—
Ge(Li)	—	—	$\phi 6 \times 10 \text{cm}^2$

测效率高达 $1-10^{-7}$ 的探测器 A, 用于反符合 2γ 事例, 另外, 还需要一台能量分辨率小于 8% 和全能峰计数对 γ 总计数比值为 99% 的 γ 探测器 B, 用于测量来自 $a\gamma$ 事例的 γ 能谱, 如图 3 所示。正电子在塑料闪烁计数器 C_1 和 C_2 中发生自由湮灭, 且由 C_1 和 C_2 给出事例触发信号。铅准直器用于限制被测 γ 光子的角度, 改善 B 探测器的能量分辨率。若 B 用 Ge(Li) 探测器, 就可不使用 Pb 准直器。在表 1 中列出了 A、B 探测器种类和尺寸的可能选择。探测系统的事例选择逻辑如图 4 所示。由于正电子大多静止湮灭, 对于通过 β^+ 源点的任一平面, 朝平面左边出射的 γ 动量矢量和等于朝右边出射的 γ 动量矢量和。在 2γ 事例中出射的是 0.511 MeV 单能 γ 光子, 而在 $a\gamma$ 事例中产生的是单能的轴子和光子, 它们的能量是

$$\text{对 } a, E_1 = (4m_a^2 + m_e^2)/4m_e,$$

$$\text{对 } \gamma, E_2 = (4m_a^2 - m_e^2)/4m_e.$$

若轴子存在, 那么从实验测到的 γ 能谱中, 除了 0.511 MeV 峰外, 还应出现能量为 E_2 的峰, 从 E_2 峰的位置, 可以确定轴子质量 m_a 。

若 A 探测器采用时间响应快的塑料闪烁计数器, 配用快电子学仪器, 整个系统可以进行 10^7 事例/秒的事例判选, 允许使用较强的 β^+ 源, 收集到较多的轴子事例。例如, 使用 β^+ 源强度 $0.3 \text{ mc} = 1.1 \times 10^7 \text{ 秒}^{-1}$, B 探测器对源 S 所张的立体角设为 4 立体角弧度, 那么 B 探测器测到的 $a\gamma$ 事例率

$$\begin{aligned} \dot{R}_{\text{收集}}(e^+e^- \rightarrow a\gamma) &\simeq 1.1 \times 10^7 \times 8 \times 10^{-11} \times \frac{4}{4\pi} \text{ 秒}^{-1} \\ &= 24 \text{ 事例/天}. \end{aligned}$$

从公式 (10) 看到, 假如轴子质量 m_a 介于 m_e 和 $2m_e$ 之间, 轴子产生的总截面将比现用的近似值低得多。因此, 若不使用强的 β^+ 源, 就得不到足够的轴子事例产率。从这个意义

上讲, A 探测器采用塑料或液体闪烁计数器较为适宜。

正如前述, 通过电子偶素形成和衰变的方法寻找轴子事例, 能够有效地排除 2γ 事例, 使背景和轴子的事例率之比压低二个量级。因此, 同前一方法相比, A 探测器的 γ 光子绝对探测效率的要求降低到 $1-10^{-5}$ 。由于排斥的是 3γ 事例, 单个 γ 光子能谱在 0 至 0.511 MeV 之间连续分布, 因此 A 探测器的尺寸将相应地减小 (见表 1)。需要注意的是, 轴子事例率主要由 β^+ 源强度决定。电子偶素衰变方法可以增加轴子事例的绝对产率。假如轴子质量 m_a 接近于零, 那么伴随产生的 γ 能量 E_γ 接近于来自 2γ 事例的 γ 能量 0.511 MeV。这样, 使用高分辨率的 Ge(Li) 探测器将有利于区分两种 γ 的全能峰。若轴子质量 m_a 接近于 $2m_e$, 轴子事例率将比式 (13) 的估计值低很多, 强源的使用将要求 A 探测器能承受更高的 γ 光子触发率。

唐孝威同志对本工作给予了支持与鼓励, 并提出了许多宝贵的意见。张肇西和郑志鹏同志提供了有益的经验。在此一并致以感谢。

参 考 文 献

- [1] S. Glashaw, *Nucl. Phys.*, **22**(1961), 579; A. Salam and J. C. Ward, *Phys. Lett.*, **13**(1964), 168; S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.*, **19**(1967), 1264.; *Phys. Rev. Lett.*, **27**(1971), 1688; *Phys. Rev.*, **D5**(1972), 1412.
- [2] R. D. Peccei and H. R. Quinn, *Phys. Rev. Lett.*, **38**(1977), 1440; *Phys. Rev.* **D16**(1977), 1791.
- [3] S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.*, **40**(1978), 223.
- [4] F. Wilczek, *Phys. Rev. Lett.*, **40**(1978), 279.
- [5] T. W. Donnelly et al., *Phys. Rev.*, **D18**(1978), 1607.
- [6] D. J. Bechis et al., *Phys. Rev. Lett.*, **42**(1979), 1511.
- [7] H. Faissner et al., *Phys. Lett.*, **B96**(1980), 201.
- [8] P. Dirac, *Proc. Camb. Phil. Soc.*, **26**(1930), 361; A. Ore, J. Powell, *Phys. Rev.*, **75**(1949), 1696.
- [9] M. Deutsch, *Proc. in Nucl. Phys.*, **3**(1953), 131.

THE AXION PRODUCTION IN e^+e^- ANNIHILATION AND AN EXPERIMENTAL SUGGESTION

ZHANG CHANG-CHEN

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

We calculate the cross section of Axion Production in e^+e^- annihilation, and suggest that one can search for Axion in the e^+e^- annihilation experiment using β^+ Source. The requirements of detectors used in such experiment is also discussed.