

物理实验



俘获效应对缪子寿命测量的影响

陈正宇 宁传刚

(清华大学物理系, 北京 100084)

摘要 缪子是粒子物理标准模型中的基本粒子, 对其研究不仅涉及基础物理的前沿, 还包括相关技术在工业民生领域的应用。对缪子寿命的测量涉及时间膨胀、费米耦合常数和原子核俘获等众多近代物理知识点, 在大学本科物理课程中开设相关教学实验具有重要意义。通过运用信号判选电路甄别以及数字示波器触发记录, 分别用塑料闪烁体和 NaI(Tl) 闪烁体探测器测量缪子衰变事件, 由测量结果的差异得到俘获效应对缪子寿命测量的影响。

关键词 缪子; 寿命测量; 俘获效应; 探测器

THE IMPACT OF CAPTURE EFFECTS ON THE MUON LIFETIME MEASUREMENTS

CHEN Zhengyu NING Chuangang

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

Abstract Muon is a fundamental particle in the standard model of particle physics, and its research not only involves the frontiers of basic physics, but also includes the application of related technologies in the fields of industry and daily life. The measurement of muon lifetime involves several key concepts in modern physics such as relativistic time dilation, Fermi coupling constant, and nuclear capture effects. It is of great significance to offer relevant teaching experiments in undergraduate physics courses. By using signal selection circuits for discrimination and digital oscilloscope triggering for recording, the muon decay events were measured using plastic and NaI(Tl) scintillation detectors, respectively. The impact of capture effects on muon lifetime measurement was obtained from the difference in the measured results.

Key words muon; lifetime measurements; capture effects; detector

当前描述物质微观结构最成功的理论为粒子物理标准模型, 它描述了组成物质的基本粒子以及它们之间的相互作用力, 基本粒子包括三代夸克、三代轻子以及传递相互作用的玻色子, 相互作用包括强相互作用、电磁相互作用与弱相互作用。由美国加州学院的两位物理学家 C. D. Anderson

和 S. Neddermeyer 在 1936 年发现的缪子属于基本粒子中的第二代轻子, 其自旋为 $1/2$, 静止质量为 $105.658 \text{ MeV}/c^2$, 是我们熟知的第一代轻子——电子质量的约 207 倍。缪子带有一个单位电荷, 参与电磁相互作用和弱相互作用。尽管距离发现缪子已经将近 90 年, 但对缪子的研究依然

收稿日期: 2024-03-28

作者简介: 宁传刚, 清华大学物理系教授, ningcg@mail. tsinghua. edu. cn。

通信作者: 陈正宇, 清华大学物理系助理研究员, zhengyuchen@mail. tsinghua. edu. cn。

引文格式: 陈正宇, 宁传刚. 俘获效应对缪子寿命测量的影响[J]. 物理与工程, 2024, 34(4): 137-140.

Cite this article: CHEN Z Y, NING C G. The impact of capture effects on the muon lifetime measurements[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(4): 137-140. (in Chinese)

具有重要意义并且具有挑战性。对缪子的研究不仅涉及基础物理的前沿,还包括相关技术在工业民生领域的应用。例如,对缪子反常磁矩的精确测量在标准模型的检验以及寻找新物理方面一直发挥着重要作用^[1],利用缪子成像技术可以对火山进行监测、对大型古建筑进行无损检测^[2]等。

缪子是被发现的第一个不稳定的基本粒子,其会衰变为电子或正电子以及相应的中微子,即

$$\mu^{-} \rightarrow e^{-} + \bar{\nu}_e + \nu_{\mu} \quad (1)$$

$$\mu^{+} \rightarrow e^{+} + \nu_e + \bar{\nu}_{\mu} \quad (2)$$

在缪子被发现几年以后,人们就开始对其寿命进行了测量,当前精确测量的值为 $2.1969811 \pm 0.0000022 \mu\text{s}$ ^[3]。在大学物理课程中开设缪子寿命的测量实验既可向学生提供一个通向高能物理实验前沿的窗口,并且涉及时间膨胀、费米耦合常数以及原子核俘获等众多近代物理知识点,在人才培养中能发挥重要作用。

清华大学物理系实验物理教学中心于 2013 年自主设计了一套测量缪子寿命的实验系统^[4],该系统设计巧妙而且成本低廉,激发了学生探索的积极性,在实验教学中发挥了重要作用。为了拓展实验内容、进一步开阔学生视野,我们基于相同的实验系统而分别使用塑料闪烁体和 NaI(Tl)闪烁体这两种不同类型的探测器来测量缪子的寿命,向学生直观展示原子核俘获效应对测量结果的影响。

1 测量原理

缪子衰变事件的甄别是通过自行设计的一个信号判选电路来实现的^[4]。如果一个缪子在探测器内衰变,则在缪子信号后紧接着会看到一个电子信号。因此,如果两个脉冲的时间间隔小于 $22 \mu\text{s}$ (约为缪子寿命的 10 倍),则可以认为其很大概率是一个缪子衰变信号,图 1 是甄别信号的示意图。探测器产生的信号会与一个固定的阈值进行比较(图中的虚线)。如果电压大于阈值,会产生一个窄脉冲(A,宽度约为 50 ns)。信号 A 消失后会紧接着产生一个长脉冲(B,宽度约为 $22 \mu\text{s}$)。如果在 $22 \mu\text{s}$ 时间内又出现一个信号 A,电路会产生触发信号“A&B”并触发数字示波器记录波形。上述方法具有通用性,也可以广泛地应用于其他采样率不是很高的实验中,关于对实现上述功能

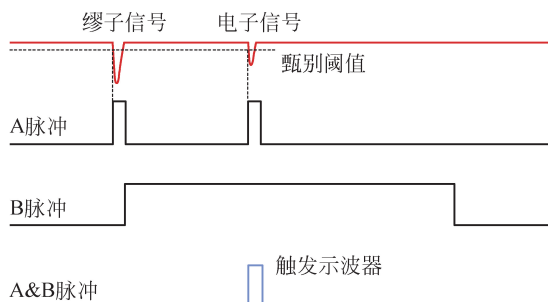


图 1 缪子衰变信号甄别示意图

的电路介绍,可参阅文献[4]。

在一个典型的缪子衰变事件中,第一个信号是由缪子进入探测器产生,第二个信号由缪子衰变产生的电子产生。两个脉冲信号之间的时间差就是这个缪子的寿命。信号的电压幅度与粒子在探测器中沉积的能量成正比。因此通过测量两个脉冲的时间差便可以得到缪子的寿命谱,通过测量两个脉冲的高度便可以得到粒子的能量谱。我们使用两类探测器来分别测量缪子的寿命谱。第一类为塑料闪烁体探测器,其核心是一个直径 31 cm ,高 35 cm 的圆柱形塑料闪烁体,材料为 NE102,其密度为 1.02 g/cm^3 。光电倍增管的型号为 GDB52B,其工作电压为 -1200 V ,在其屏蔽管内集成了一个预放大器,输出电压大约为 0.5 V ,脉冲宽度为 20 ns 。第二类为 NaI(Tl)闪烁体探测器,使用的型号为 CH158-06,为由高灵敏光电倍增管、NaI(Tl)闪烁体、分压电路、前置放大器、高压电源模块等组成的高度集成一体化的探测器。为了和我们设计的缪子衰变事件的信号判选电路相配合,我们对 CH158-06 型闪烁探测器进行了相应的改造。该探测器的核心是一个直径 7.5 cm ,高 7.5 cm 的圆柱形 NaI(Tl)闪烁体,能量分辨率 (^{137}Cs) $\leq 8.5\%$ 。

海平面附近缪子的通量大约为 $1 \sim 2 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$,由 NaI(Tl)闪烁体探测器的尺寸可知每秒钟大约有 1 个缪子进入探测器,因此由两个缪子先后进入探测器而被误认为是衰变事件的概率非常小,环境中低能 γ 射线为本实验的主要干扰。为了尽可能降低本底,并且保留足够多的有效信号,可以通过将光电倍增管的高压和增益以及甄别阈值 (-30 mV) 设置合适的值来实现。我们使用的示波器型号为 Pico Scope 4227,图 2 为其记录的一个缪子衰变事件,其中下方的红色波形中

的两个峰分别对应缪子和电子信号,上方的蓝色波形为缪子衰变事件的触发判选信号,我们设定峰值的 1/3 位置处为缪子或电子到达时间。

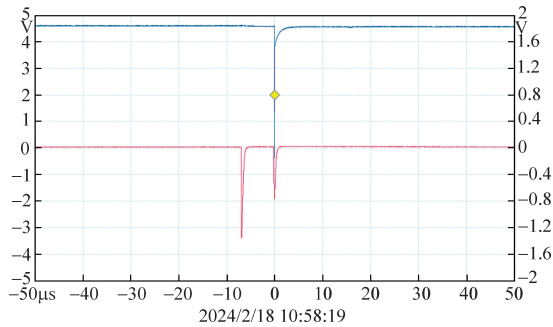


图2 示波器记录的一次缪子衰变事件

2 实验结果

在运用 NaI(Tl) 闪烁体探测器进行实验的初期观察到寿命谱在 $t = 8\mu\text{s}$ 处有一个小的凸起,而在运行一段时间后凸起消失,这同塑料闪烁体探测器测量实验类似(在 $t = 7\mu\text{s}$ 处有一个小的凸起)^[4],这个凸起是由光电倍增管后脉冲产生的伪衰变事件引起的,并且由于两类探测器中的光电倍增管参数不同使得凸起时间不同,而凸起消失的原因可能为光电倍增管中残余的气体在电子长时间的轰击下消耗殆尽。

使用 NaI(Tl) 闪烁体探测器采集 50 天的数据共得到约 20000 个衰变事件。对衰变事件数据以 200ns 为间距进行统计,得到缪子寿命的统计分布如图 3 所示,我们使用指数衰减加上常数本底的函数来拟合,即

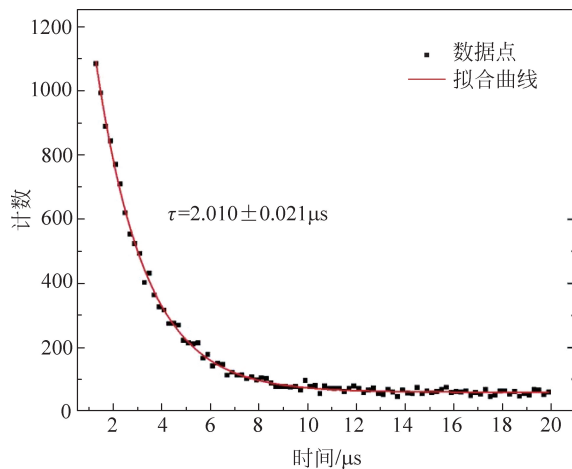
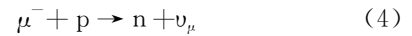


图3 缪子寿命的统计分布

$$N(t) = A_0 \text{Exp}(-t/\tau) + N_0 \quad (3)$$

其中, N_0 为本底噪声, τ 即为我们需要得到的缪子平均寿命。拟合结果得到 $\tau = 2.010 \pm 0.021\mu\text{s}$, 这要小于自由空间的精确测量值 $2.1969811 \pm 0.0000022\mu\text{s}$ ^[3], 也小于我们之前基于塑料闪烁体探测器得到的测量值 $2.098 \pm 0.006\mu\text{s}$ ^[4]。正负缪子都会与探测器发生相互作用损失能量并且衰变,但负缪子(μ^-)会被探测器材料中的原子核俘获,即



这会减小缪子的寿命,因此无论是使用塑料闪烁体还是 NaI(Tl) 闪烁体探测器,测量结果均小于自由空间的测量值。负缪子发生俘获效应的截面与探测器材料相关^[5-7],大致正比于其原子序数的四次方 Z^4 ,而塑料闪烁体的材料主要由 C、H 等原子组成,这要小于 NaI(Tl) 闪烁体材料的原子序数,因此由 NaI(Tl) 闪烁体测量得到的缪子寿命要小于由塑料闪烁体得到的结果。

对 NaI(Tl) 闪烁体探测器测量的衰变数据进行统计处理时发现时间间隔小于 $1\mu\text{s}$ (塑料闪烁体为 200ns) 的事件数要小于更大间隔的事件数,这是由于衰变事件的两个脉冲有堆积,如图 4 所示,甄别器不能对第二个信号即电子的信号进行触发,导致时间间隔小于 $1\mu\text{s}$ 的事件丢失所引起的。闪烁体退激发射光子通常服从指数衰减规律,单位时间发射的光子数(发光强度)为^[8]

$$I(t) = -\frac{dn_{ph}(t)}{dt} = \frac{n_{ph}}{\tau_{ph}} e^{-t/\tau_{ph}} \quad (5)$$

其中, n_{ph} 为闪烁过程中发射的总光子数, τ_{ph} 为闪烁体衰减常数,即经过 τ_{ph} 时间,脉冲衰减到最大值的 $1/e$ 。电子学仪器采集到的信号脉冲衰减快慢主要由衰减常数 τ_{ph} 决定,此外脉冲形状还和电子学响应有关。NaI(Tl) 闪烁体的衰减常数约为 230ns(塑料闪烁体约为 1~3ns),因此其脉冲尾巴较长,导致时间间隔小于 $1\mu\text{s}$ 衰变事件的两个脉冲容易产生堆积,从而使得相应区间的事件丢失。上述死时间问题可以通过使用更快的探测

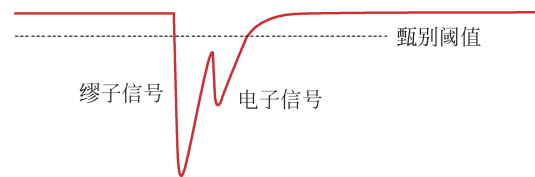


图4 脉冲堆积事件

器,如 CsI 或 BaF₂ 探测器,或者先采集探测器接收到的全部信号再进行分析处理来解决。

本实验测得的是正负缪子的平均寿命,而负缪子寿命(τ_-)又包含自由空间的寿命(τ_0)以及俘获寿命(τ_c),它们之间的关系为^[5-7]

$$\frac{1}{\tau_-} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{\tau_c} \quad (6)$$

或者

$$\tau_- = \tau_0 \tau_c / (\tau_0 + \tau_c) \quad (7)$$

俘获寿命 τ_c 依赖于探测器材料中俘获元素的原子序数,从 $357\mu\text{s}$ ($Z=3$) 到 77ns ($Z=92$) 不等^[5]。通常情况下,到达地面的正、负缪子数目并不相等,并且由于正缪子不参与俘获过程,更精确的拟合函数形式应该为

$$N(t) = A_0 [f_+ \exp(-t/\tau_+) + f_- \exp(-t/\tau_-)] + N_0 \quad (8)$$

其中, f_+ 和 f_- 分别为正负缪子数的比重, τ_+ 和 τ_- 分别为在探测器中测量得到的正负缪子寿命。如果已知正负缪子的比重,并且取正缪子的寿命 τ_+ 为自由空间的测量值,那么则可以通过拟合得到探测器中负缪子的寿命 τ_- ,并由公式(6)进一步得到其俘获寿命 τ_c 。反过来,如果已知负缪子在探测器材料中的俘获寿命 τ_c ,就可以通过拟合得到实验室所在区域里处于特定能量区间的正负缪子比重。

精确的实验测量结果表明缪子俘获寿命的倒数(衰减常数)在低原子序数时正比于 Z^4 ,而当 $Z > 40$ 时近似趋于常数。由于原子核结构的复杂性,对缪子的俘获效应仍有很多问题没有达到理解的程度,包括对俘获寿命测量结果的原子序数依赖性的理论解释^[9],基于弱相互作用理论的经验公式能够给出和实验较一致的结果。本实验我们使用了两种类型的探测器,直观展示了俘获效应对缪子寿命测量的影响。如果需要进一步验证俘获寿命对原子序数的依赖性,可以使用更多类型的探测器,或者通过在一个包含水的塑料闪烁体箱中溶解各类不同元素作为探测器来实现^[5]。

3 结语

由于缪子不参与强相互作用并且衰变产物也没有强子,对与其相关物理过程的理论计算和实验测量均可达到很高的精度,因此缪子物理在粒

子物理前沿研究特别是寻找新物理方面发挥着重要作用。缪子经过物质时会与其中的原子核发生相互作用,通常情况下,其经过密度大或原子序数大的物质时会更多地被吸收或发生更大的偏转,通过穿过物质前后缪子计数或偏转角的变化就可以反推物质的密度、原子序数等信息,这是缪子成像技术的基本原理。通过用信号判选电路甄别以及数字示波器触发记录,我们分别使用塑料闪烁体和 NaI(Tl)闪烁体这两种不同类型的探测器来测量缪子的寿命,向学生直观展示原子核俘获效应对测量结果的影响。本实验可以使学生对缪子的寿命、衰变模式等自身性质以及与物质的相互作用规律等有进一步的认识,也向学生开设了一个通向基础物理前沿和技术前沿的窗口。

参 考 文 献

- [1] ABI B, ALBAHRI T, AL-KILANI S, et al. Measurement of the positive Muon anomalous magnetic moment to 0.46ppm[J]. Physical Review Letters, 2021, 126(14). DOI:10.1103/PhysRevLett.126.141801.
- [2] MORISHIMA K, KUNO M, TAYOUBI M, et al. Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons[J]. Nature, 2017, 552(7685): 386-390.
- [3] OLIVE K A. Review of particle physics[J]. Chinese Physics C, 2014, 38(9): 09001. DOI:10.1088/1674-1137/38/9/090001.
- [4] 胡雨石,王天治,梅叶峰,等. 测量缪子寿命和衰变能谱的简单装置及其蒙特卡罗模拟[J]. 物理与工程, 2016, 26(5): 27-32.
HU Y S, WANG T Y, MEI Y F, et al. A simple setup to measure Muon lifetime and electron energy spectrum of Muon decay and its Monte Carlo simulation[J]. Physics and Engineering, 2016, 26(5): 27-32. (in Chinese)
- [5] WARD T, BARKER M, BREEDEN J, et al. Laboratory study of the cosmic-ray lifetime[J]. American Journal of Physics, 1985, 53(542).
- [6] RIGGI F, ROCCA P La, RIGGI S. Muon decay: an old, yet alive experiment in the university physics curriculum[J]. European Journal of Physics, 2016, 37(045702).
- [7] PRIMAKOFF H. Theory of muon capture[J]. Reviews of Modern Physics, 1959, 31(802).
- [8] 复旦大学、清华大学、北京大学合编. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1997.
- [9] MEASDAY D F. The nuclear physics of muon capture[J]. Physics Reports—Review Section of Physics Letters, 2001, 354(243).