



物理学专业基础实验——宇宙线 μ 子平均寿命的测量

刘元彻 PB21020505 21 级物理学院 1 班

2024 年 5 月 9 日

摘要：本实验通过荧光闪烁体检测器检测宇宙线中的 μ 子衰变过程，通过长时间测量数据实现 μ 子平均寿命的测量。

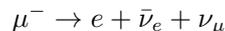
关键词：宇宙线， μ 子 (muon)，半衰期

1 实验目的

1. 加深相对论效应以及对宇宙线 μ 子性质的认识。
2. 掌握宇宙线 μ 子平均寿命的测量原理。
3. 学习段时间间隔的一种现代测量方法。

2 实验原理 [1]

宇宙射线在大气中发生簇射过程产生大量的 π 介子， μ 子主要是 π 介子衰变产生，大多数 μ 子产生在大气上层。由于 μ 子不参与强相互作用，只通过与物质的电磁相互作用和弱相互作用的衰变，具有强穿透力。其衰变成电子和中微子：



实验证明到达地面的 μ 子大多数产生在 15km 的高空，速率接近光速，在 μ 子静止系中平均寿命约为 $2.197\mu\text{s}$ ，考虑到相对论效应的的时间膨胀， μ 子可以飞到地面。实验上可利用塑料闪烁体配合光电倍增管探测 μ 子。 μ 子在塑料闪烁体中主要靠电离能损和一些库伦散射损失能量，高能 μ 子可以直接穿出，并产生电子、荧光光子等；低能 μ 子在闪烁体中停止并衰变，衰变产生的电子则继续与闪烁体中发生作用损失能量并使闪烁体分子激发，中微子直接穿出。闪烁体中被激发的分子在极短时间内 (ns) 退激发并发出荧光，经光电倍增管后转化成电信号。停止在闪烁体中的 μ 子信号就是粒子“到达”探测器的信号， μ 子衰变产生的信号是“衰变”信号。实验中通过测量到达-衰变信号的时间差的分布，进而计算 μ 子平均寿命。设 μ 子平均寿命为 τ ，产生时刻数目 N_0 ， t 时刻数目为 N ，则衰变规律：

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau} \quad (1)$$

$$dN = -\frac{1}{\tau} N_0 e^{-t/\tau} dt \quad (2)$$

因此，对于某一个 μ 子，在时间间隔 dt 内的衰变概率为：

$$P(t) = \frac{e^{-t/\tau}}{\tau}$$

本实验中由于来自宇宙中的 μ 子通量很低，每次击中探测器都可以看成单 μ 子事例。设地第 i 个 μ 子的产生时间 t_i ，则对于一个公共的时间零点，衰变概率为：

$$P_i(t) = \frac{e^{-(t-t_i)/\tau}}{\tau}$$



第 i 个 μ 子到达探测器时间为 T_i ，则时间间隔 ΔT 内，衰变概率：

$$P = \int_{T_i}^{T_i+\Delta T} D_i(t) dt = K(1 - e^{-\Delta T/\tau})$$

设实验中共测量到 M 个 μ 子，则时间间隔内 ΔT 内衰变的总 μ 子数为：

$$N = K(1 - e^{-\Delta T/\tau}), \quad K = \sum_i K_i$$

通过测量得到的时间差 ΔT 分布曲线，采用指数曲线拟合，就可以求得 μ 子衰变的平均寿命。

3 实验装置

所有装置包括：闪烁探测器，高压电源，信号处理，数据通讯接口，计算机，分析软件等；

4 实验步骤

1. 将高压电源线（红色）与探测器连接；探测器信号线（黑色）与信号处理仪器测量面板上的信号输入端连接；USB 接口线与计算机相应接口连接。
2. 将各部件电源线接好，检查无误后，打开高压电源和信号处理仪器电源。并将探测器工作高压设置为 $-600V$ 。记录下电压及电流大小。
3. 从信号处理仪器观测放大器输出观测信号，记录放大信号特征（幅度、上升时间，噪声信号）；观测甄别器输出信号，记录甄别器输出信号特征（信号宽度、频率）。
4. 调节仪器面板上的电阻以选择合适的阈电压，用于去除放大器输出信号中包含的噪声信号。方法为：设定阈电压，并将阈电压从 $0.01V - 0.5V$ 连续变化，取十个测量点，作 μ 子计数-阈电压曲线，并得出合适的阈电压值。
5. 打开计算机，执行数据获取软件：muon.tcl，获取 μ 子的衰变信号，要求累积数据足够长（实验安排测量约 2 小时）。存储数据文件（自备 U 盘拷贝数据文件）。此外实验室提供了 200 小时测量数据供分析使用。
6. 利用 Python 处理数据，计算 μ 子的平均寿命。

5 实验结果

5.1 阈值电压选取

调整阈值电压，分别进行 1min 的读数测量，选取读数适中的对应电压作为阈值电压。测量结果如下：

表 1: 阈值电压测量结果

$U(V)$	0.002	0.023	0.130	0.180	0.220
计数	17983	17866	4433	486	479
$U(V)$	0.240	0.294	0.352	0.399	0.506
计数	455	409	403	382	376

在此测量基础上，我们进一步逼近测量，最后确定 $V = 0.301V$. 这个电压选取保证本底不十分大，也不十分小（防止忽略掉一些有效信号）。因此，我们选取 V 作为阈值电压，以尽可能排除本底干扰。



5.2 2h 实验室测量数据

实际测试过程中，我们取 2h 时长进行测量，测得实验结果如下：

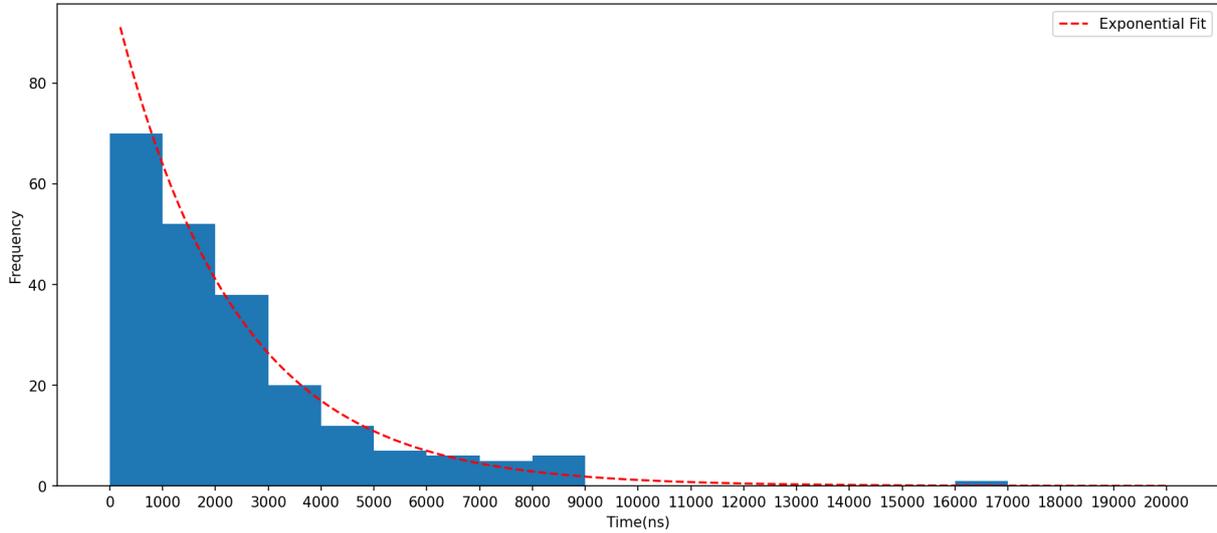


图 1: 2h 实验结果

测得频率（并非频数，相差一个间距因子）实验结果如下：

$$f \sim \exp(-t/\lambda), \quad \lambda \approx 2258.15\text{ns}$$

以上结果由 Python 中 scipy 库调用 expon 函数通过指数拟合得到。根据指数分布的含义， $\lambda = \tau = 2258.15\text{ns} \approx 2.26\mu\text{s}$ 即为宇宙线缪子的半衰期。

5.3 200h 实验室测量数据

实验室另外提供了 200h 时长进行测量，对其进行同样的分析结果如下：

测得频率（并非频数，相差一个间距因子）实验结果如下：

$$f \sim \exp(-t/\lambda), \quad \lambda \approx 2427.20\text{ns}$$

以上结果由 Python 中 scipy 库调用 expon 函数通过指数拟合得到。根据指数分布的含义， $\lambda = \tau = 2427.20\text{ns} \approx 2.43\mu\text{s}$ 即为宇宙线缪子的半衰期。

6 思考题

6.1 μ 子寿命的矛盾问题

$$T = \gamma\tau = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\tau \approx 34.755 \mu\text{s}$$

这与实验数据确实矛盾。但是这不影响实验的结果的合理性，因为高能 μ 子大多已经穿过了闪烁体，并不在记录范围内，只有较低能的 μ 子有记录，低能 μ 子动系与静止系的寿命区别较小。

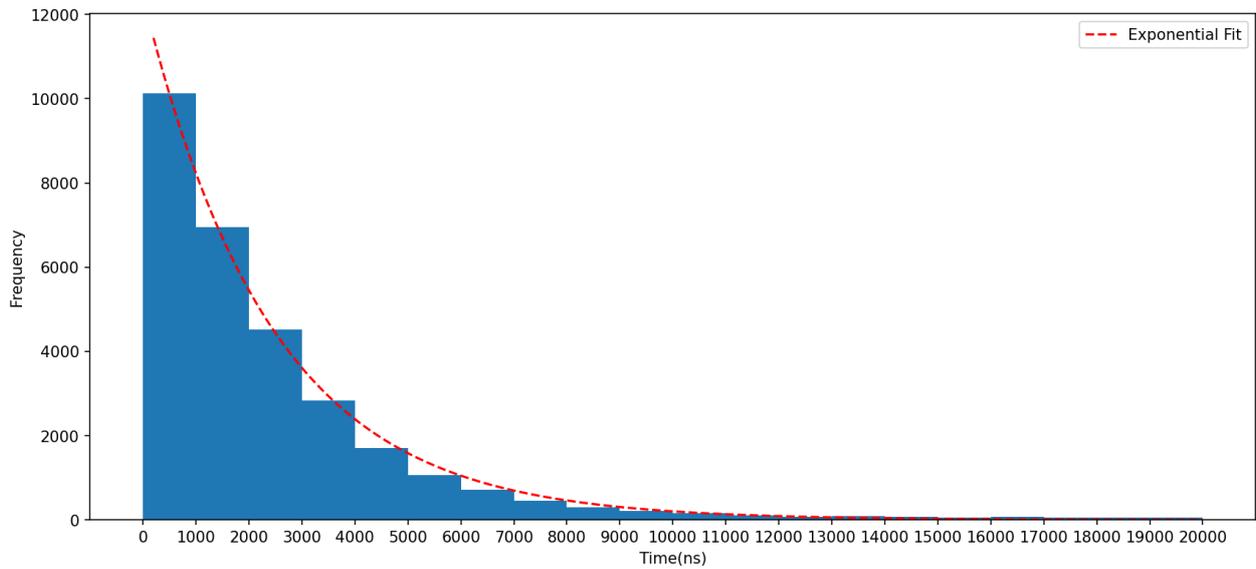


图 2: 200h 实验结果

6.2 计数原理

μ 子在闪烁体探测器中的信号经放大器、甄别器形成逻辑信号，在可编程逻辑电路（FPGA）中进行逻辑筛选。将接收到的第一个脉冲作为开始时间，对时钟脉冲进行计数，若在一定时间间隔内没有接收到第二个信号，则电路清零重置；否则将输出两个重建的时钟周期数，再清零重置。这样就通过触发判选电路，找到了具有时间关联的 μ 子的到达信号和衰变信号。

6.3 衰变寿命曲线的分布

根据理论分析。 μ 子的衰变具有如下的规律，即每个时刻，大量 μ 子中衰变的比例为一个常数，即：

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha N$$

因此我们可以得到，对于大量的 μ 子，其衰变曲线为：

$$N = N_0 e^{-\alpha t}$$

则 μ 子的平均寿命为：

$$\tau = \frac{1}{\alpha}$$

这就看出其分布为一个指数衰减曲线（即指数分布）。

6.4 实验数据误差分析

200h 结果与 2h 结果有一定的误差，估算可知其误差大概在：

$$\frac{2427.20 - 2258.15}{2427.20} \approx 6.96\%$$

误差原因可能有以下几点：



1. 测量时间短，粒子数少，统计涨落带来的误差较大。可以延长测量时间，从而增加测量到的粒子数目，降低统计误差。
2. 时间较短时，噪声带来的部分误差难以剔除，导致存在一定的偏差。选择合适的阈值电压，从而尽可能剔除噪声，并且不影响 μ 子信号的测量。

6.5 μ 原子与一般原子的区别

μ 子质量远大于电子，因此原子核的运动不可以忽略。由理论力学，想要得到修正后的有关物理量，只需要将原来式子中的电子质量 m_e 改为约化质量 M ：

$$M = \frac{m_\mu m_p}{m_\mu + m_p}$$

其中 m_p 就是质子质量。借此可以得到相关数据，例如结合能变为：

$$E \approx 2.53\text{keV}$$

参考文献

- [1] 中国科学技术大学物理实验教学中心. 量子计算实验 (实验讲义). Sept. 8, 2020. URL: <https://pems.ustc.edu.cn/uploads/project/20200908/0dd42808ad26aefd5fc9aae44c2a140f.pdf> (visited on 03/27/2024).