

宇宙线 μ 子平均寿命测量

赵宇航

摘要: 本实验测量了宇宙线 μ 子的平均寿命, 以及其随角度的变化关系。

1 实验目的

1. 加深宇宙线 μ 子性质的认识;
2. 掌握宇宙线 μ 子平均寿命的测量原理;

2 实验原理

宇宙线中的 μ 子主要是由宇宙线中的 π 介子衰变($\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$, $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$)产生的. 大部分的子产生在约 15 km 的高空, 由于 μ 子不参与强相互作用, 因而具有较强的穿透力. 海平面上 μ 子的通量近似为 $1 \sim 2 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, 平均能量约为 4 GeV。 μ 子带有 1 个单位的电荷, 其质量: $105.658 \text{ MeV}/c^2$, 平均寿命约 2.197 us。

宇宙线中的 μ 子通过塑料闪烁体时, 主要的能量损失方式是电离能损, 并伴随库仑散射. 高能量 μ 子可直接从闪烁体中穿出, 并在径迹周围产生电子及荧光光子等次级粒子; 一些较低能量 μ 子在闪烁体中停止后, 可以自由衰变, 也可能与物质的原子核发生作用被俘获而消失. 其发生衰变如下:

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

衰变中产生的电子(e)继续与闪烁体发生作用损失能量, 并使闪烁体分子激发, 而电子反中微子 $\bar{\nu}_e$ 和 μ 子中微子 ν_μ 直接穿出. 塑料闪烁体中受激发的分子在极短的时间内(约 10^{-10} s)退激发并发射荧光(荧光波长在 $350 \sim 500 \text{ nm}$ 之间), 荧光通过光电倍增管光电转换放大而输出电信号, 这个信号将作为 μ 子的“到达”信号. 当停止在闪烁体内的 μ 子发生衰变, 产生的电子被闪烁探测器探测, 形成 μ 子“衰变”的信号。“到达”探测器的信号与 μ 子“衰变”的信号的时间间隔, 即为 μ 子 1 次衰变的寿命. 由于微观粒子的衰变具有一定的统计性, 因此实验上是通过测量时间差的分布, 进而计算得到 μ 子的平均寿命。

宇宙线中 μ 子的通量很低, 每次击中探测器的事例可以看成单 μ 子事例. 设 μ 子的平均寿命为 τ , 第 i 个 μ 子的产生时间为 t_i , 则相对公共的时间零点, μ 子在时刻 t 衰变概率为

$$D_i(t) = \frac{e^{-(t-t_i)/\tau}}{\tau} \quad (2)$$

如果第 i 个 μ 子到达闪烁探测器的时刻为 T_i , 那么时间间隔 ΔT 内, 这个 μ 子衰变的概率是:

$$P = \int_{T_i}^{T_i+\Delta T} D_i(t) dt = \int_{T_i}^{T_i+\Delta T} \frac{e^{-(t-t_i)/\tau}}{\tau} dt = K - K e^{-\Delta T/\tau} \quad (3)$$

式中 $K = e^{-(T-t_i)/\tau}$ 。如果实验共测量到M 个 μ 子衰变事例,则在时间差 ΔT 以内, 衰变的总 μ 子数 N 为

$$N = \sum_{i=1}^M K_i(1 - e^{-\Delta T/\tau}) = K(1 - e^{-\Delta T/\tau}) \quad (4)$$

式中 $K = \sum_{i=1}^M$ 。

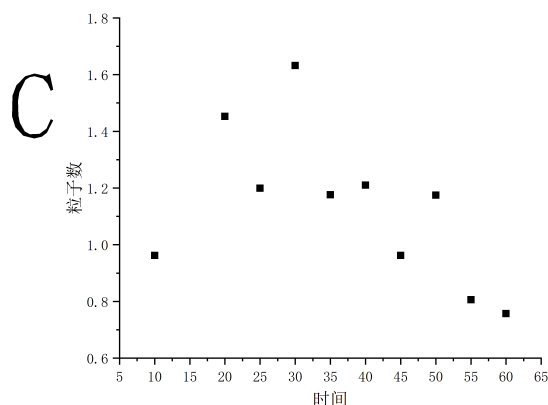
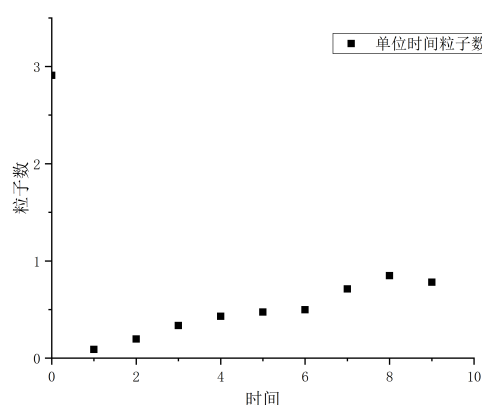
可见在 ΔT 时间内 μ 子衰变数随时间同样服从指数规律。实验上通过记录确定时间间隔内的 μ 子衰变事例数,利用指数函数拟合方法,可以求得 μ 子衰变的平均寿命 τ 。

3 实验结果

根据实验所测的数据, 知 μ 子衰变的平均寿命为 $2.2014 \pm 0.0191 \mu s$ 。

我们只需要研究一个分布规律, 所以以单位时间通过粒子数代替单位时间通量, 其随探测器角度改变分布如下表所示

探测器角度	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
单位时间粒子数	2.910	0.089	0.196	0.335	0.431	0.475	0.497	0.712	0.848	0.781
探测器角度	10	20	25	30	35	40	45	50	55	60
单位时间粒子数	0.962	1.453	1.199	1.632	1.176	1.210	0.962	1.175	0.806	0.757



在探测器角度比较小的时候, μ 子单位时间通量和探测器角度成正比; 在探测器角度比较大的时候, μ 子单位时间通量大致先增加后减小, 在 30° 达到最大值。。

4 讨论

所有的 μ 子全同, 它们以同样地概率衰变, 所以大量 μ 子绘出的寿命曲线从统计上看就有确定的分布。

实验中所取的单位时间内, 只有不到2个粒子发生了衰变。可见, 如果我们选取一定的时间间隔, 只以到达信号与衰变信号小于这个间隔的取例, 那么在间隔时间内连续两个粒子衰变的概率会达到二次小量 (大约 10^{-4}), 可以忽略不计。