

粒子是永恒的吗

—— μ 子寿命测量



张笑鹏 刘 佳

(中国科学院高能物理研究所 100049)

朝菌不知晦朔, 蟪蛄不知春秋, 花草树木、虫鱼鸟兽, 甚至地球、太阳、恒星以至宇宙都要经历诞生和死亡, 生老病死似乎是我们这个世界的一条基本规则。那么, 组成物质世界的微观粒子, 也有寿命的概念吗? 随着对微观世界认识的加深, 人们发现, 粒子不仅有寿命, 而且不同粒子之间的寿命相差还极大, 有些只有不到万亿分之一秒, 有些却比宇宙的使用寿命还要长。微观粒子的寿命与物理学基础理论密切相关, 是粒子物理学家十分关心的物理量。测量粒子的寿命并不是一件遥不可及的事情, 我们利用“校园宇宙线”实验课程的探测器, 就可测出 μ 子的寿命。

1. “全新”的粒子?

在开始实验之前, 我们先来理解一下微观粒子的寿命, 因为它可能没有想象中那样简单, 甚至有一些违反直觉。当我们说一个人的寿命, 指的是这个人从出生到死亡所经历的时间。如果要统计一群人的平均寿命, 只需要把他们去世时的年龄加起来, 再除以他们的总人数就可以了。对于微观粒子来说, 它的“死亡”其实就是衰变, 也就是自发地转变为其他种类的粒子。以 μ 子为例, μ 子有带负电的 μ^- 和带正电的 μ^+ 两种, 它们除了电荷不同外其他性质都一样。 μ^- 自发衰变时会变成一个电子(称为米歇尔电子), 同时产生一个 μ 中微子和一个反电子中微子^[1]:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu,$$

而 μ^+ 自发衰变时会变成一个正电子, 同时产生

一个反 μ 中微子和一个电子中微子:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu,$$

考虑到每个 μ 子的寿命可能各不相同, 所以你会想到测量很多个之后求平均值。现在假设你收到了一个装有1000个 μ 子的盒子, 一只秒表, 和一架非常厉害的显微镜: 每当有 μ 子发生衰变的时候你都能看到并且记录下衰变发生的时间。当盒里的最后一个 μ 子衰变完以后, 看着纸上记下的1000个 μ 子衰变时间, 你突然想到, 你只是记录到了每个 μ 子的“死亡”时间, 并不知道它们的“出生”时间! 你找出包装盒, 发现上面并没有贴生产日期标签。当你打开盒子的时候只看到有1000个 μ 子, 却不知道它们送来时候是“新鲜”的还是“临期”的。你跟卖家联系, 他却回复说: “你所看到的 μ 子每一粒都和全新的一模一样”。你仔细品味着这句话的含义, 感觉有些违反直觉。实际上, 微观粒子似乎并不记得它是什么时候产生的, 岁月也不会它们在它们身上留下任何印记, 一个已经坚持1万年没有衰变的 μ 子和一个刚产生的 μ 子之间没有任何区别。这里不是说人类的实验技术不够先进, 观察不到它们之间的区别, 而是真的没有区别, 它们两个在下一秒钟里发生衰变的几率是完全一样的, 卖家并没有骗你!

因此, 我们不必关心这些 μ 子是什么时候产生的, 可以选择任意时刻作为它们的出生时间, 比如打开盒子的时刻或者1小时22分钟之后都没问题。可如果在开始测量的时候发现已经有一些 μ 子衰变掉了, 只剩下500多个了该怎么办呢? 答案是: 没有关系, 因为这500多个 μ 子仍然都是“全新”的。

甚至,我们可以为每个 μ 子都设定一个不同的开始时间,也就是每次只观察一个 μ 子,直到它发生衰变,记录下经历的时间。如果我们在想象中把开始计时的时间对齐,会发现和同时开始观察它们是完全等价的。

微观粒子的寿命为什么会有这样奇特的性质呢,这要从指数衰变规律说起。

2. 指数衰变规律

μ 子的衰变与其他不稳定的粒子和放射性核素遵循同样的统计规律—指数衰变规律。究其原因,在于它们在单位时间内发生衰变的概率 λ 不随时间变化。考虑 $t=0$ 时刻有 N_0 个不稳定粒子,在任意时刻 t 剩余未衰变的粒子数为 $N(t)$,那么在经过一个很短的时间微元 dt 后,将会有 $N(t)\lambda dt$ 个粒子发生衰变,即

$$-dN(t) = N(t)\lambda dt, \quad (1)$$

$$-\frac{dN(t)}{N(t)} = \lambda dt. \quad (2)$$

对(2)式两边进行积分,得到

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

式中 λ 的倒数即为粒子的平均寿命 $\tau=1/\lambda$ 。注意不要把平均寿命与“半衰期($T_{1/2}$)”弄混,它们之间的关系为 $T_{1/2} = \tau \ln 2 \approx 0.693\tau$ 。由(3)式可以知道,不稳定粒子的数量随时间按照指数形式减少。在数学上,“无记忆性”是指数分布的一个重要特性,即任意选择坐标原点,都得到相同的分布形式。因此,我们可以选择任意时刻开始测量,直到 μ 子发生衰变,记下经历的时间 t ,然后不断重复这个过程,画出大量 μ 子衰变时间的统计分布,它与上述 $N(t)$ 随时间的变化曲线等价(图1)。最后我们用指数函数拟合这条曲线,即可得到粒子的寿命。

3. 捕捉来自天空的 μ 子

弄明白了 μ 子平均寿命的概念以后,终于可以动手做实验了!我们首先面临的问题是,到哪里去

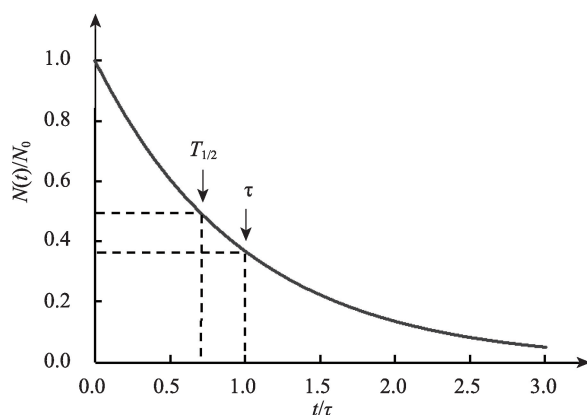


图1 指数衰减的函数图像

寻找 μ 子?要知道在现实中可不存在出售 μ 子的卖家,也没有能装 μ 子的盒子。学习过前面几节课程的你一定想到了,次级宇宙线中就有 μ 子!没错,就从我们头顶的天空,每时每刻都有大量 free(自由、免费)的 μ 子不停地落下。 μ 子具有很强的穿透力,可以轻易穿透建筑物,所以即使在室内做实验也不用担心探测不到它们。在之前课程中已经介绍过探测宇宙线次级粒子的探测器^[2],这些探测器就能帮助我们捕捉到来自天空的 μ 子,现在简单回顾一下它的工作原理。

如图2所示,这种探测器的核心是一种叫塑料闪烁体的材料,当 μ 子或其他带电粒子穿过的时候,会在闪烁体内损失一部分能量,闪烁体会把这部分能量的一部分转换成波长与可见光接近的光子释放出来。这些闪烁光子,有一部分会进入到光电倍增管(PMT)中。PMT通过光电效应,把光子转换为光电子,再逐级放大最终产生电信号。这样,当有一个粒子打到探测器上时,探测器就会输出一个电信号。这个电信号会输入到一个电子学板上,电子学板会把信号到达的时间记录下来,然后通过数据获取系统(DAQ)保存到计算机上。这样我们不仅有了能看到 μ 子到达的显微镜,还有了可以自动记录到达时刻的秒表,而且这个秒表的精确度可以达到纳秒量级。

每当有粒子击中闪烁体时,探测器都将把信号产生的时间记录下来,称为一个事例。大部分 μ 子能量都很高,会轻松穿过闪烁体,产生一个事例;少

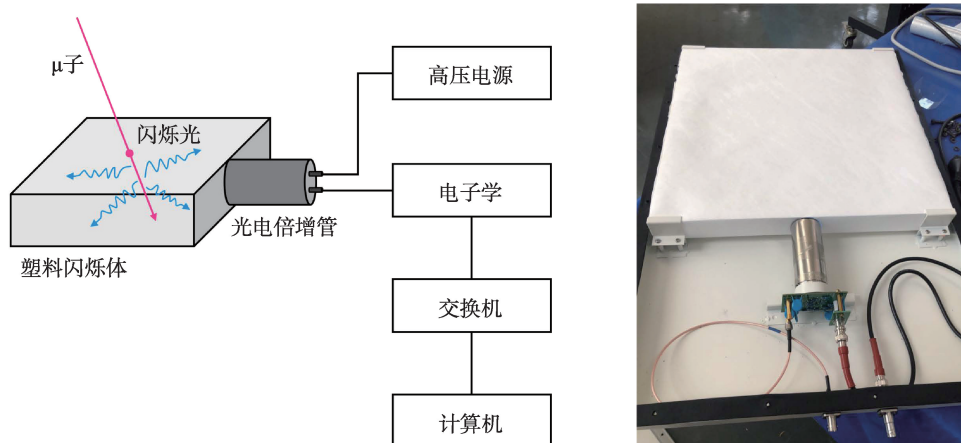


图2 校园宇宙线探测器的原理图和实物照片

部分 μ 子能量较低,会在闪烁体中损失全部能量,产生一个事例,之后停留在闪烁体中,并在一段时间之后发生衰变。衰变产生的中微子具有极强的穿透性,无法被有效探测,但米歇尔电子会与闪烁体发生相互作用,发出闪烁光从而使探测器产生第二个事例。

我们顺利搭好了实验装置,正式开始测量。80多个小时后,计算机上采集到了如图3所示的实验数据。可以看到实验数据的格式非常简单,每一行代表一个事例,其中ID为事例的序号,ev_time_s和ev_time_ns分别为事例绝对时间的秒和纳秒部分, ch0_t2为信号的TDC时间(以纳秒为单位)。由以上几列得到粒子到达时间 t ,把每一行的 t ,减去上一行

的 t_{i-1} ,即可得到相邻两个事例的时间间隔 dt_i 。

4. 找出衰变的 μ 子

对于那些能量直接穿透闪烁体的 μ 子,探测器只记录到了它们进入的时间,但我们只对那些碰巧停留在闪烁体中并衰变了 μ 子感兴趣。闪烁探测器无法区分一个信号是由 μ 子还是米歇尔电子产生,它们被当作两个独立的事例记录下来。此外,次级宇宙线中本来就有许多正负电子等其他成分,更不用说探测器还会测量到大量的本底噪声信号,它们都成为寻找 μ 子衰变事例的背景事例,怎样才能把与衰变有关的事例从大量背景事例中挑选出来呢?

简单来说就是,找出时间间隔非常近,即 dt 小于特定值的两个事例,它们非常可能分别是由 μ 子的进入和衰变产生的。这种叫作符合测量的方法,就像是在时间轴上开了一个宽度为 w 的“窗口”,一个个事例依次经过这个窗口,只有落在窗口内的相邻两个事例才被挑出来。为什么如此简单的方法能够挑选出衰变事例呢?

举个例子可能更容易理解一些。想象一下你坐在一间屋子里,窗外是一条幽静的小路,在你看到的视野范围内,大部分时候都只有一个人走过。这时如果偶尔看到有两个人或一群人同时出现,你是不是比较有把握地认为他们应该是同行的朋友?你可能会说,如果窗外是一条繁忙的商业街,

ID	ev_time_s	ev_time_ns	ch0_t2	t_ns	dt_ns
1	0	917479456	98	9.174796e+08	38231478
2	0	959548768	114	9.595489e+08	42069328
3	1	6858560	112	1.006859e+09	47309790
4	1	9723104	114	1.009723e+09	2864546
5	1	133530240	110	1.133530e+09	123807132
...
5867083	303142	480876736	122	3.031425e+14	68770040
5867084	303142	510179168	120	3.031425e+14	29302430
5867085	303142	573602208	128	3.031426e+14	63423048
5867086	303142	589112320	98	3.031426e+14	15510082
5867087	303142	612581664	112	3.031426e+14	23469358

5867087 rows x 5 columns

图3 测量得到的部分实验数据

来往的行人络绎不绝,那这个推断就不太成立了。没错!在这种情况下他们是偶然碰在一起的陌生人的可能性就不能忽略了。这种两个不相关的事例由于巧合而同时出现在符合窗口中的情况叫作偶然符合。实验中,直接穿过的 μ 子和其他放射性本底引起的事例都可以视为背景,它们都可以造成偶然符合。我们可以用符合测量来挑选 μ 子衰变事例也有一个前提,那就是 μ 子的寿命比较短,背景计数率不太高,从而保证偶然符合不会对衰变产生的符合事例造成太大干扰。

根据图3中采集到的事例总数和时长可以计算出平均事例率约为30 Hz。在事例率一定的情况下,符合窗口 w 越宽就越容易发生偶然符合,因此减小 w 可以压低偶然符合计数率。但是 w 也不能取得过小,否则衰变事件的计数率也会减小,需要更长的测量时间才能累积同样的统计量。在这里我们选取 $w=10000$ ns,把 $dt < w$ 的事例挑选出来,并把它们的 dt 填充到直方图上(如图4所示,注意图中 y 轴为对数坐标),可以看到经过筛选以后的事例数只有原来的3%左右。将这个直方图按照 $f(t)=N_0 \cdot \exp(-t/\tau)+C$ 进行拟合(为减小偶然符合事例的影响,在公式(3)的基础上增加了一个常数项),即得到 μ 子寿命的测量值为

$$\tau = 2.11 \pm 0.04 \mu\text{s}$$

这个结果与 μ 子寿命的现代标准测量值(2.197 微秒)非常接近,我们成功测量出了 μ 子的寿命!

5. μ 子为什么能穿过大气?

在测得 μ 子寿命以后一个新的问题又出现了,那就是既然 μ 子的寿命如此之短,它们是怎么穿过大气层到达地面的呢?从之前的课程^[3]中大家已经知道, μ 子在距离地面几十千米的地方产生后,以接近光速的速度冲向地面。这样我们立刻就能算出从 μ 子产生到落到地面一共需要经历大约100 微秒的时间,这几乎是它们平均寿命的50倍,按照公式(3)计算, μ 子应该只有大约 10^{-20} 的几率到达海平面,但实验测量结果却远大于这一预期^[4],这又是怎么回事呢?

这个疑难只能用爱因斯坦的狭义相对论来解释。根据狭义相对论的钟慢效应,在以地面为参照系的观察者看来,以接近光速运动物体的时钟会变慢,因此高能 μ 子的寿命会远大于2.2 微秒,使它们有足够的时间抵达地面。也可以换一个思考方式,如果以 μ 子作为参照系,虽然它自己的寿命还是2.2 微秒,但是由于狭义相对论的尺缩效应,数十公里厚的大气层缩短到了只有几百米, μ 子在衰变之前还是有很大概率穿透它。事实上,大量 μ 子能穿过大气层到达地面,一直被当作是狭义相对论的有力

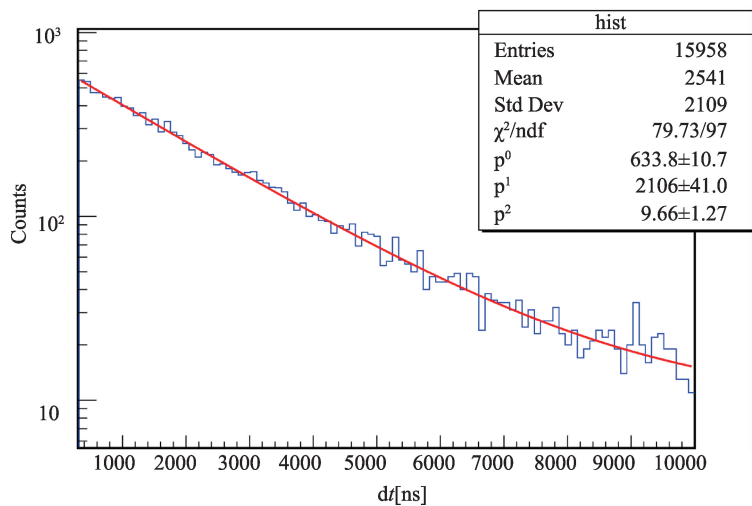


图4 实验数据中 dt 的分布以及拟合结果

证据之一。

总结:

1) 粒子不会像人一样逐渐衰老,但可能会在某一时刻毫无预兆地发生衰变成为其他粒子。我们无法预知单个粒子一定会在什么时间衰变,但是可以通过大量统计得到它在单位时间内发生衰变的几率,这个几率是恒定不变的,它的倒数就是这种粒子的平均寿命;

2) 利用闪烁体探测器和符合测量方法,经过简单的数据处理,我们以相当高的精度测量出了次级宇宙线中 μ 子的寿命;

3) μ 子的寿命比我们预期的要短很多,但是却能够穿过大气层到达地面,这一事实验证了狭义相对论的正确性。

思考:

1. 为什么需要通过拟合来计算 μ 子的平均寿命,直接对 dt 求平均值可以吗?

2. 实验为什么要连续采集几天的数据,如果只进行了1个小时,你预期实验结果会是怎样的?可以把多次测量得到的数据合并到一起进行处理吗?

3. 查找更多资料之后回答,中子和质子也会发生衰变吗?

参考文献

[1] Unger M. *JPS Conf. Proc.*, 010020 (2016)
 [2] 刘佳. 空气电离之谜, 现代物理知识, 2022, 34(3): 54
 [3] 吕洪魁. 宇宙线粒子运动速度的测量, 现代物理知识, 2022, 34(5): 54
 [4] 赵静, 马玲玲. 每秒有多少宇宙线穿过我们的身体, 现代物理知识, 2022, 34(5): 49



科苑快讯

废弃塑料有望化身燃料

虽然废弃塑料中含有潜在有用的原材料,但是回收塑料制品远比制造它们要昂贵。现在,由美国能源部太平洋西北国家实验室(Department of Energy's Pacific Northwest National Laboratory)领导的一个国际研究小组,破解了之前阻碍分解这些难降解塑料的密码。

塑料中的化学键需要高温裂解,意味着高能耗和高成本。新方法让烷基催化反应立即发生在裂解之后,在打破系统中的一个键时,会立即有针对性地制造另一个键,从而在低温下转化成所需的最终产品。

不过,该工艺也有局限性,它适用于低密度聚乙烯产品(LDPE,塑料树脂代码为4),如塑料薄膜和可挤压瓶,通常不会在美国路边回收项目中收集。而高密度聚乙烯(HPDE,塑料树脂代码为2)需要预处理,以使催化剂能够接触到需要断裂的键。

基于石油的塑料垃圾是一种未开发的资源,可以作为耐用材料和燃料的起始材料。解决废弃塑料问



题,需要处理废弃塑料比使用一次性塑料更具性价比,在接近室温的条件下快速进行这种转换,无疑离这个目标更近了。

(高凌云编译自 2023 年 2 月 23 日 SciTechDaily 网站)