

# 宇宙线粒子运动速度的测量



吕洪魁

(中国科学院高能物理研究所 100049)

宇宙中所有物体的运动速度是否有极限? 爱因斯坦在1905年发表的狭义相对论中给出了答案, 如果我们承认现实的因果性, 也就是事件的原因必定在结果之前发生, 就必须接受一个基本的物理法则: 宇宙中任何有质量的物体的运动速度都必须小于 $299,792,458 \text{ m/s}$ , 即真空中的光速(在一秒钟时间里, 光子可以沿着地球赤道跑7圈半)。这一不可思议的理论在当时引起了很大轰动, 实验物理学家们设计了很多实验来验证爱因斯坦提出的理论, 结果都证明相对论是正确的。在这一百多年里, 相对论没有受到实质性的挑战。

当宇宙加速器加速宇宙线时, 宇宙线运动得越来越快, 运动速度会趋近于光速, 但不会超过光速。那么, 宇宙线的运动速度到底有多快呢? 通过“重走宇宙线发现之旅”系列课程“空气电离之谜”<sup>①</sup>, 我们已经知道, 在海平面测量到的是宇宙线与地球大气中氮、氧等的原子核碰撞产生的次级粒子, 到达地面时, 以穿透力强的 $\mu$ 子为主。这些 $\mu$ 子平均能量约为 $4 \text{ GeV}$  ( $\text{eV}$ 是能量单位, 表示一个电子经过 $1\text{V}$ 的电位差加速后所获得的动能,  $1 \text{ GeV}=10^9 \text{ eV}$ )<sup>②</sup>, 按照狭义相对论计算, 这些粒子的速度为光速的 $99.96\%$ , 非常接近光速。

宇宙线就像光速炮弹一样从外太空飞到地球上, 如果它的速度真的这么快, 我们怎样精确测定出来? 这要先从物质运动的最快速度——光速测量的历史谈起。

## 一、光速测量实验的历史

### 1. 伽利略的光速测量实验

17世纪之前, 狭义相对论尚未建立, 人们普遍认为光的速度是无限的, 开普勒和笛卡尔都对此深信不疑。意大利科学家伽利略却提出了不同的观点, 他认为光的速度虽然很快, 但仍是有限的, 并且是可以测量出来的。1600年左右, 伽利略设计了一个测量光速的实验, 让两个实验员A、B分别站在距离约 $1.5 \text{ km}$ 的两座山的山顶, 每个人手里拿着一盏灯。如图1所示, A首先遮住灯, B看到A遮住灯之后立刻遮住自己的灯。从A遮住灯到看到B遮住灯的时间间隔 $\Delta t$ 里, 光刚好在两人之间传播了一个来回, 传播距离 $l=2d$ , 通过测定距离和时间可以计算光速 $v=l/\Delta t$ 。然而, 这个实验没有成功, 这是因为人的反应时间(约为 $0.2 \text{ s}$ )和遮住灯的时间在秒量级, 而光在两山顶之间的传播时间只有 $10 \mu\text{s}$ 左右( $1 \mu\text{s}=10^{-6} \text{ s}$ ), 以至于这个实验不可能测出光速。伽利略也承认, 他没有通过这个实验测出光



图1 伽利略设计的光速测量实验原理图(为了更好的显示效果, 该图中人形比例经过放大)

速,也没有判断出光速是有限的还是无限的。

我们来定量分析一下这个实验的测量精度。按照误差传递公式,速度的误差 $\sigma_v$ 和距离的测定误差 $\sigma_l$ 及光传播时间的测定误差 $\sigma_{\Delta t}$ 直接相关,遵循关系如下:

$$\frac{\sigma_v}{v} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2} \quad (1)$$

假设距离测量误差足够小,若使速度的误差小于10%,时间测量误差必须要控制在光传播时间的10%以内。这意味着伽利略实验的计时精度至少要达到1 $\mu$ s,才能有效测定光速,伽利略设计的实验不可能达到这个精度。

## 2. 木星卫星测量法

木星是距离太阳第五近的行星,也是太阳系中体积最大的行星,它周围环绕着数十颗卫星。其中木卫一最靠近木星,每42.5小时绕木星一圈,木卫一的轨道平面非常接近木星绕太阳公转的轨道。如图2所示,地球绕着太阳在公转轨道上逆时针运动,木卫一也绕着木星逆时针运动。每当木卫一转到木星背面,太阳光无法照射到木卫一,地球上的观测者就看不到这颗卫星了,称为木卫一蚀。

在17世纪,天文学的发展已经使得人们可以计算出这颗卫星围绕木星运行的周期,并计算出它在地球上可以被观测到的时间。1671年到1673年,丹麦天文学家罗默对木星的这颗卫星进行了多次观测。他发现在一年中的不同时期,木卫一蚀出现的时间总会与计算出的结果有一些差异。他的观测数据显示,当地球和木星距离最近的时候,木卫一蚀出现的时间比平均值早了约11分钟,而当地球

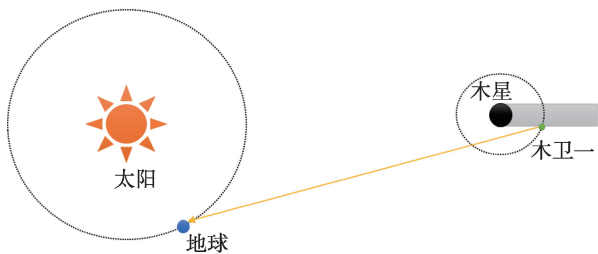


图2 木星卫星蚀现象的原理示意图

和木星距离最远的时候,木卫一蚀出现的时间则比平均值晚了约11分钟。

罗默通过这个现象推断光速是有限的。他意识到在一年之中,地球和木星之间的距离是在不断变化的,因此木卫一蚀的光传播到地球所需的时间也是不同的,这22分钟的差值就是光线走过地球和木星间最大和最小距离(等于地球公转轨道直径)的时间差。在1676年罗默公开了这个推测以及相应的观测数据,虽然他本人并没有亲自算出光速的数值,但是其他天文学家利用他的数据进行了计算,得出光速约为 $2.2 \times 10^8$  m/s。由于计时误差,以及这时人们还无法准确地计算出地球公转轨道直径,这一测量值和现代精确测量值相去甚远,误差高达30%。但这仍然是一个了不起的成就,人类第一次观察到光是有速度的,并且正确地估算出光速的数量级。

## 3. 旋转棱镜测量法

1877到1879年,美国物理学家迈克尔逊改进了傅科发明的旋转棱镜,利用这套装置精确测量了光速。图3为实验装置的示意图,在相隔较远的两处分别放置八面镜 $M_1$ 和反射装置 $M_2$ 、 $M_3$ ,当一束光从光源S发出,经过八面镜中的镜面1反射后传播到远处的反射装置 $M_2$ ,再通过 $M_2$ 和 $M_3$ 反射回八面镜,最终经过镜面3反射后进入观察目镜R。只有棱镜在如图所示的特定角度时,观察目镜处才会有光。由于装置 $M_1$ 和 $M_2$ 、 $M_3$ 之间相距千米量级,如果八面镜转动一个微小角度,镜面1反射光就无法照射到 $M_2$ ,观察目镜上看不到光。

如果让八面镜旋转起来,旋转角速度逐渐增大,会发现在某个角速度下又可以从观察目镜中看到光了。这是因为光线从镜面1反射到达 $M_2$ 再返回八面镜时,八面镜刚好转动1/8周期(即45度),镜面2刚好转到镜面3的位置,将光线反射到观察目镜。由于人眼在光线消失时存在“视觉暂留”,观察者从观察目镜中会一直看到光。假设 $M_1$ 、 $M_2$ 两套装置相距为 $d$ ,八面镜转动周期为 $T$ 。由于 $d$ 远大于

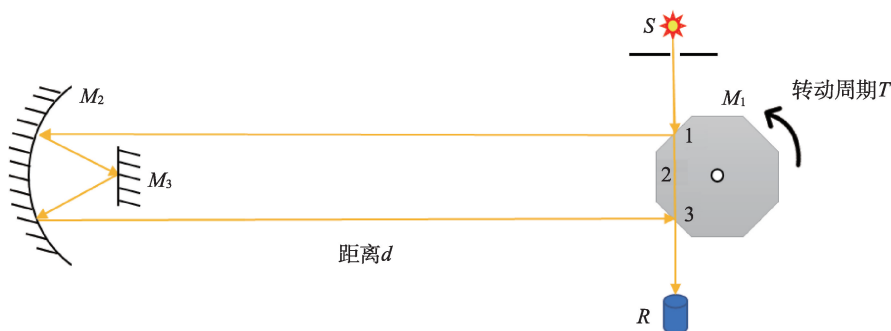


图3 迈克尔逊测量光速装置示意图的原理图(为了更好的显示效果,该图中实验装置的比例经过放大)

装置部分的尺度,所以光传播的距离近似为  $l=2d$ , 光传播的时间间隔  $\Delta t=T/8$ , 可以计算光速  $v=l/\Delta t=16d/T$ 。

根据这个原理,迈克尔逊将这套旋转棱镜装置分别安装在相距很远的位置,只有在一年中天气最好的时候,并且在日出后一小时和日落前一小时大气条件最佳的情况下,才能在目镜中得到稳定的像。这个实验历时3年多,共得到五百多组数据,最终测得的光速值为  $299853\pm 60$  km/s。1923年,迈克尔逊利用新改进的旋转棱镜,在加利福尼亚的两个相距约35千米的山头之间重做了这个实验,把光速的精度提高到  $299798\pm 4$  km/s,这是当时得到的最精确值,和现代物理采用的光速值仅差十万分之二。

## 二、如何测量宇宙线速度

回顾这段历史不难发现,无论是木星卫星测量法还是旋转棱镜法,原理都是通过光的传播距离和传播时间之比得到光速。这一类实验的测量精度都可以通过公式(1)确定,只有将距离测量的相对误差和时间测量的相对误差都控制在合理的范围,测量结果才是有效的。因为光速实在太快了,实验设计者都不约而同的把设备的距离尺度拉大,让光传播得远一些,传播时间长一些,降低时间测量的误差。

高能宇宙线粒子的速度非常接近光速,按照光速估计,粒子穿过1 m距离的飞行时间仅为3.3 ns ( $\text{ns}=10^{-9}$  s)。要使速度的测量误差小于5%,时间间隔的测量误差必须控制在0.16 ns以下,时间测量需

要相当精确。通过“重走宇宙线发现之旅”课程<sup>③</sup>,我们对闪烁体探测器已经有所了解,项目组制作的闪烁体探测器时间分辨率在1 ns左右。这使我们很自然地想到利用 $\mu$ 子望远镜(图4所示)完成这个实验,测量粒子在相距为 $d$ 的两台探测器之间的飞行时间来确定粒子速度。

当 $\mu$ 子进入闪烁体探测器D1时,会将自己的一部分能量沉积在闪烁体中,将闪烁体的原子或分子激发,这些受激原子或分子自发退激时会发出荧光,这些光被光电倍增管收集,经光电效应转换为电子,然后进行几百万倍放大。这个电脉冲信号经过约3 m长的电缆线传输到电子学,电子学计时器将这个信号的到达时间记为 $t_1$ 。当 $\mu$ 子贯穿了上下两台探测器D1、D2时,电子学会相应地记录到达时间 $t_1$ 、 $t_2$ ,这个粒子的速度就是飞行距离和飞行时间之比。我们将探测器的间距调到最远(约2 m),按照公式(1)估算,如果飞行距离误差控制在2 cm以内,飞行时间测量误差控制在0.3 ns以内,就可以将光速测量误差控制在5%以内。

我们很自然地想到粒子的飞行时间就是电子学记录的到达时间之差,即  $\Delta t=t_2-t_1$ ,但是这样做会得到错误的结果,因为我们忽略了一个主要的计时误差。如图4所示,从粒子击中闪烁体探测器到光电倍增管收集到闪烁体发出的光,光电子在光电倍增管中逐级传输并放大,再经过信号线缆传输到电子学计时器,这一系列过程需要几十纳秒量级的时间。电子学记录的时间是有延迟的,不等于粒子击中探测器的时间。

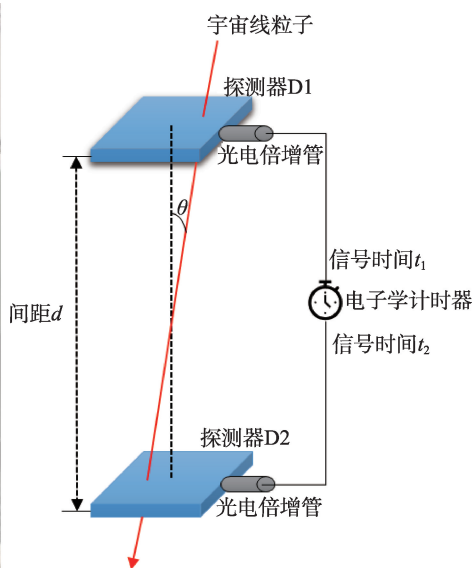


图4  $\mu$ 子望远镜(左)及其结构示意图(右)

将两路探测器的时间延迟分别记为  $\tau_1$ 、 $\tau_2$ ，飞行时间应该是

$$\Delta t = (t_2 - t_1) - (\tau_2 - \tau_1) \quad (2)$$

上式中第一项就是电子学计时之差，第二项  $\tau_2 - \tau_1$  是 D1、D2 延迟时间之差，这一项数值往往大于 0.3 ns，是不能忽略的。换言之，只有精确测定了这一项才能得到正确的飞行时间，这一过程就像把两块走针不同步的手表“对时”。

### 三、对齐时钟

我们介绍两种操作简单但非常有效的方法。第一种方法是相对校准，如图 5 所示，将探测器 D1 放在 D2 上面紧紧贴合，当  $\mu$  子同时穿过 D1、D2 时，粒子飞行时间表示为  $\Delta t = (t_2 - t_1) - (\tau_2 - \tau_1)$ 。由于 D1 到 D2 的间距是 0，粒子几乎同时击中两台探测器，飞行时间  $\Delta t \approx 0$  (这里的约等于是因为忽略了探测器自身的厚度)，因此有  $\tau_2 - \tau_1 \approx t_2 - t_1$ 。这个式子表示通过电子学计时差值可以计算出 D1、D2 的延迟时间之差，再把这一数值代入到公式 2 中就可以把时间算准了。

第二种方法为交互消除法，先将 D1、D2 间距拉到最远且 D1 位于 D2 上方。当  $\mu$  子同时穿过 D1、D2

时 (图 5 红色线)，粒子飞行时间表示为  $\Delta t = (t_2 - t_1) - (\tau_2 - \tau_1)$ 。然后将这套装置旋转 180 度，让 D2 位于 D1 上方。当  $\mu$  子同时穿过 D2、D1 时，粒子先击中 D2 后击中 D1 (图 5 橙色线，相当于粒子飞行方向相反)，电子学时间分别记为  $t_2'$ 、 $t_1'$ ，粒子飞行时间表示为  $\Delta t = (t_1' - t_2') - (\tau_1 - \tau_2)$ 。将上面两个式子相加得到  $\Delta t = [(t_1' - t_2') + (t_2 - t_1)]/2$ ，这个式子表示通过交换位置前后电子学计时差值可以直接算出飞行时间，探测器时间延迟项被消除了。

由于这些测量值都有大量统计误差，所以不管用哪种方法，都要很多次的测量结果求平均值。

### 四、宇宙线飞行距离

探测器经过“对时”后时间测量就准确了，剩下的问题是粒子的飞行距离怎么测量。如果探测器的横向尺寸想象得无穷小，粒子的穿行距离约等于  $d$ ，但这样计算的误差较大。如图 4 所示， $\mu$  子望远镜的探测器 D1、D2 间隔  $d = 2$  m，探测器的长和宽为  $s = 0.4$  m， $\mu$  子最大倾斜角  $\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{2}s}{d}\right) \approx 15.8^\circ$ ， $\mu$  子飞行距离应为  $l = d / \cos \theta$ 。考虑  $\mu$  子的方向不固定，飞行距离需要用大量  $\mu$  子事例飞行距离的统计平均



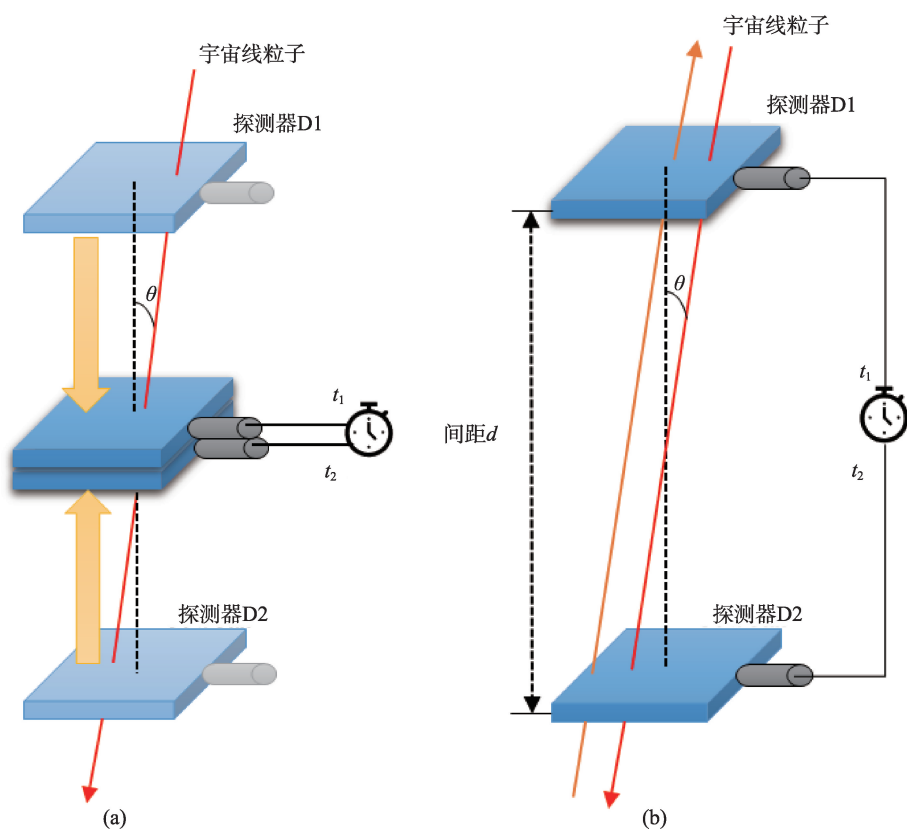


图5 “对时”方法:相对校准(a)和交互消除法(b)

值代替,即  $\bar{l} = d / \overline{\cos \theta}$  (上画线表示统计平均值)。

“空气电离之谜”课程中已经讲述过利用 $\mu$ 子望远镜测量不同天顶角  $\theta$  的 $\mu$ 子流量的方法,根据这个实验的数据就可以找到 $\mu$ 子随天顶角  $\theta$  的变化规律并计算出  $\overline{\cos \theta}$ 。最终根据大量事例测量数据计算出平均的  $\Delta t$  值,计算出宇宙线 $\mu$ 子的运动速度  $v = \bar{l} / \Delta t = d / (\overline{\cos \theta} \cdot \Delta t)$ ,我们再看这个结果是不是非常接近光速。

## 五、小结

本门课程的主要目标是引导大家利用先进的粒子探测设备,设计并完成宇宙线速度测量实验,体验科学实验的探索过程。实验方法是五花八门的,但是大家的目标和方向是一致的,那就是小心检查和仔细消除实验中遇到的各种各样的误差,尤其是对结果影响大的误差项。大家可以自行设计

各种实验解决科学问题,希望这一课程能够为进一步的科学探索打开通道。

## 参考文献

- ① 熊峥,刘佳,空气电离之谜,现代物理知识,2022
- ② <https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/rpp2022-rev-cosmic-rays.pdf>
- ③ 刘佳,重走宇宙线发现之旅,现代物理知识,2022

