



# 课程



吕洪魁

中科院高能所

校园宇宙线观测联盟技术组





# 校园宇宙线观测暑期学校

感受国之重器，从宇宙线观测开始

7月23-24日 北京

主办单位

校园宇宙线观测联盟

支持单位



中国科学院高能物理研究所  
Institute of High Energy Physics  
Chinese Academy of Sciences

国科大关心下一代工作委员会



中国科学院大学教育基金会  
University of Chinese Academy of Sciences Education Foundation



国家高能物理科学数据中心  
National HEP Data Center



# 来自宇宙的光速炮弹—— 宇宙线速度的测量

中国科学院高能物理研究所  
校园宇宙线观测联盟技术组  
吕洪魁 张笑鹏



# 速度——描述物体运动快慢的物理量

- 匀速直线运动中，速度的大小等于单位时间内经过的路程， $v = s/t$



光速~299,792 km/s



太阳神2号~70 km/s



声速~0.34 km/s



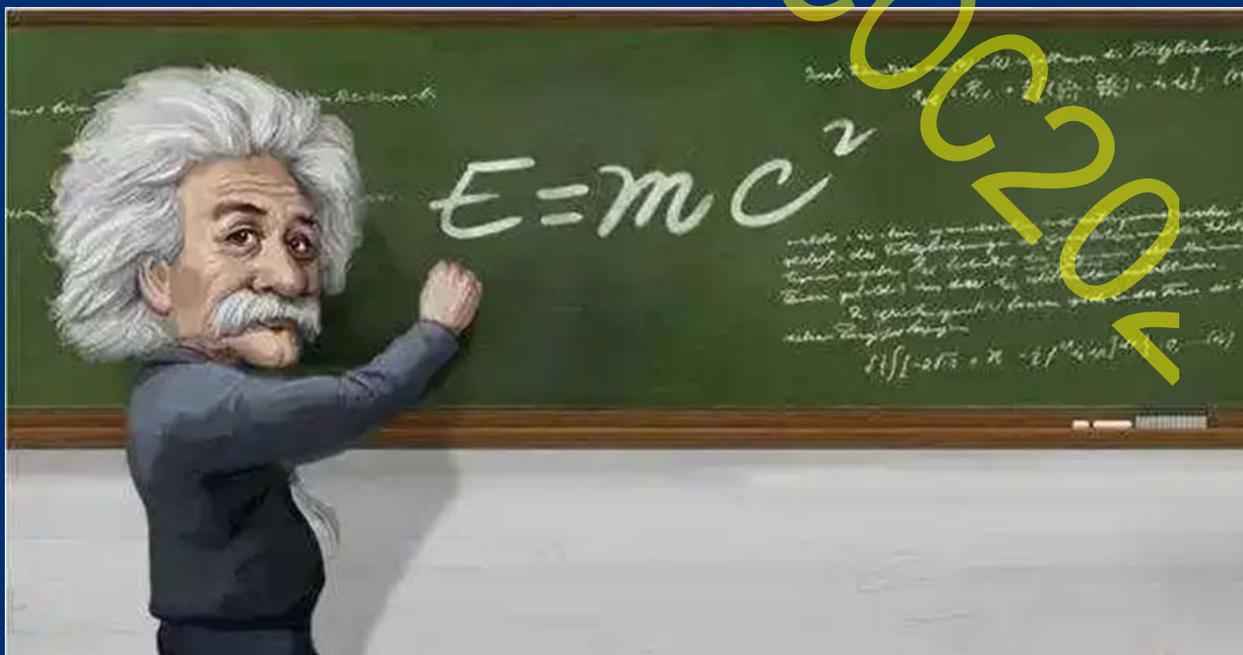
民航飞机~0.25 km/s

思考：物体的运动速度是否有极限？

# 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给出答案：

- 如果承认现实的因果性(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真空中的光速( $\sim 299,792,458 \text{ m/s}$ ，相当于1s跑过地球赤道的七圈半)。

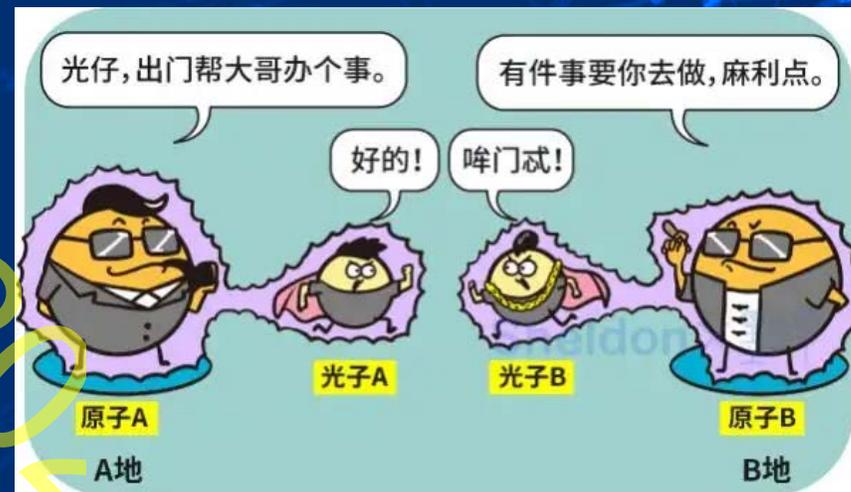


# 光速最快——光子是无质量粒子

- 费米子是构成物质原子的基本粒子，有质量，运动速度小于光速。
- 光子是无质量粒子，是传递相互作用的粒子。

**粒子物理标准模型**

		三代物质粒子 (费米子)				
		I	II	III		
夸克	质量	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$	标量玻色子
	电荷	2/3	2/3	2/3	0	
	自旋	1/2	1/2	1/2	0	
		<b>u</b> 上	<b>c</b> 粲	<b>t</b> 顶	<b>g</b> 胶子	<b>H</b> 希格斯玻色子
		$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$		
		-1/3	-1/3	-1/3	0	
		1/2	1/2	1/2	1	
		<b>d</b> 下	<b>s</b> 奇	<b>b</b> 底	<b>γ</b> 光子	
轻子		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	规范玻色子
		-1	-1	-1	0	
		1/2	1/2	1/2	1	
		<b>e</b> 电子	<b>μ</b> μ子	<b>τ</b> τ子	<b>Z</b> Z玻色子	
		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
		0	0	0	±1	
		1/2	1/2	1/2	1	
		<b>ν<sub>e</sub></b> 电中微子	<b>ν<sub>μ</sub></b> μ中微子	<b>ν<sub>τ</sub></b> τ中微子	<b>W</b> W玻色子	



速度和光速之比  $\beta = \frac{v}{c} = \frac{\sqrt{E^2 - m_0^2}}{E}$

当  $m_0 > 0$ ,  $v < c$

当  $m_0 = 0$ ,  $v = c$

# 宇宙线的运动速度有多快？

- 宇宙线是来自宇宙的高能粒子。在海平面测量到的是宇宙线与地球大气中的原子核碰撞产生的次级粒子，到达地面时，以穿透力强的缪子为主。
- 缪子是有质量粒子( $105.7\text{MeV}$ ，约 $1.88 \times 10^{-28} \text{ kg}$ )，无论被加速到多快，速度不会超过光速。



粒子物理标准模型

三代物质粒子 (费米子)

	I	II	III	
质量	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0
电荷	$2/3$	$2/3$	$2/3$	$0$
自旋	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1$
	<b>u</b> 上	<b>c</b> 粲	<b>t</b> 顶	<b>g</b> 胶子
	<b>d</b> 下	<b>s</b> 奇	<b>b</b> 底	<b>γ</b> 光子
	<b>e</b> 电子	<b>μ</b> μ子	<b>τ</b> τ子	<b>Z</b> Z玻色子
	<b>ν<sub>e</sub></b> 电中微子	<b>ν<sub>μ</sub></b> μ中微子	<b>ν<sub>τ</sub></b> τ中微子	<b>W</b> W玻色子
				<b>H</b> 希格斯玻色子

夸克

轻子

标量玻色子

规范玻色子

# 宇宙线的运动速度有多快？

- 到达海平面的缪子平均能量约为**4 GeV** (eV是能量单位，表示一个电子经过1V的电位差加速后所获得的动能， $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ )。
- 按照狭义相对论，这些粒子的速度非常接近光速。

运动速度和光速之比

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{\sqrt{E^2 - m_0^2}}{E}$$

缪子能量	缪子速度/光速
1 GeV	99.44%
4 GeV	99.96%
10 GeV	99.99%

思考：如果狭义相对论正确，怎样精确测定宇宙线速度？

# 跨越300多年的探索—— 光速测量实验的历史

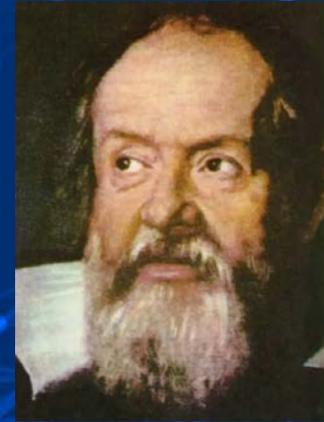


# 跨越300多年的探索——光速测量实验的历史

- 17世纪之前，人们普遍认为光的速度是无限的(开普勒和笛卡尔)，人一睁眼就可以看到宇宙最遥远的光。直到伽利略第一个提出光速测量实验。

时间	实验者	实验方法	测试结果
~1600年	伽利略	举灯法	未成功
~1676年	罗默	木星卫星蚀	$2.2 \times 10^8$ m/s
1849年	索菲	旋转齿轮法	$3.15 \times 10^8$ m/s
1850年	傅科	旋转镜法	$2.89 \times 10^8$ m/s
1877-1879年 /1923年	迈克尔逊	旋转棱镜法	$299,798 \pm 4$ km/s
1973年	美国国家标准局	激光	$299792.4574 \pm 0.001$ 1 km/s

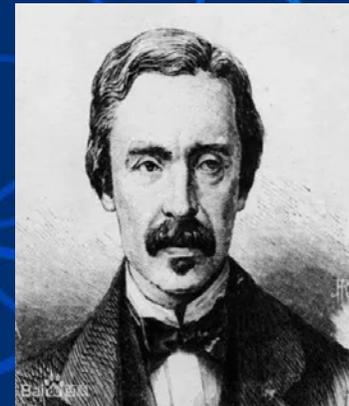
(仅列出部分代表性实验)



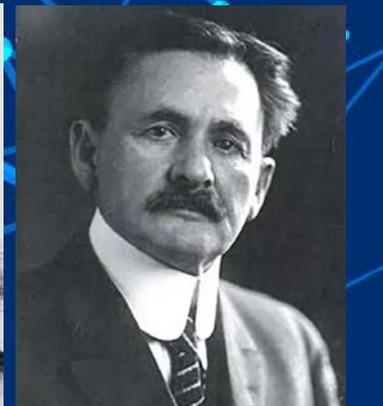
Galileo(1564-1642)



Romer(1644-1710)



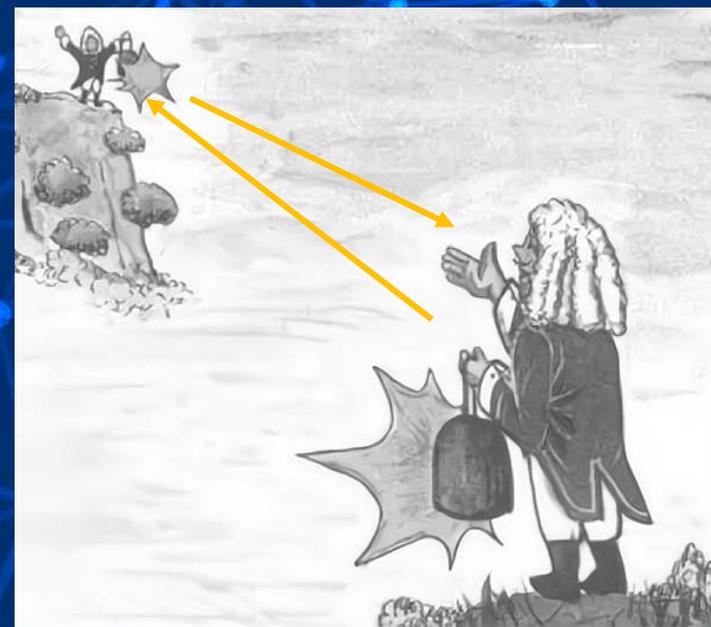
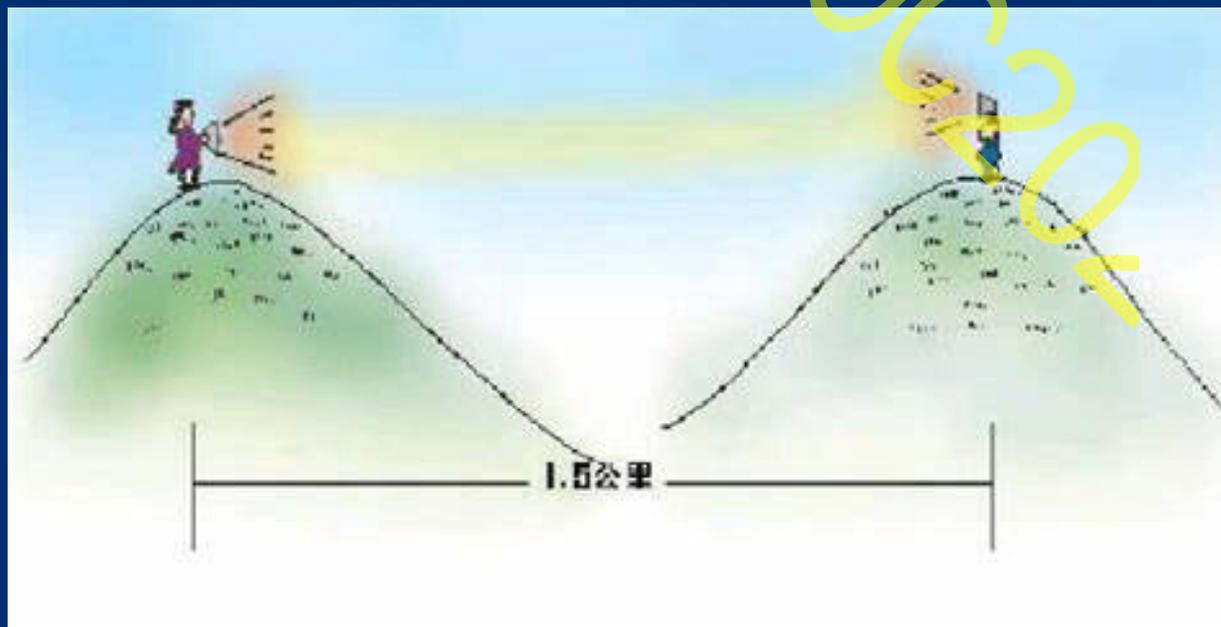
Foucault(1819-1868)



Michelson(1852-1931)

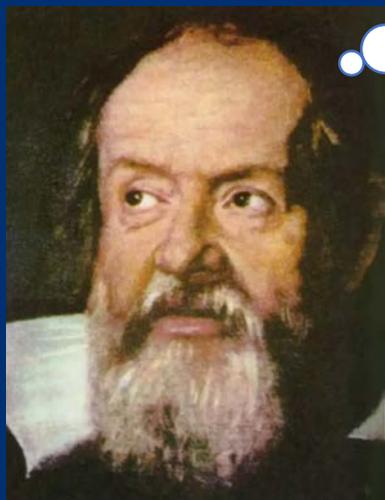
# 伽利略的实验设想(1600年左右)

- **实验方法:** 两个实验员A、B分别站在距离约1.5千米的山顶, 每个人拿着灯。A先遮住灯, B看到A遮住灯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, 通过测定距离和时间可以计算光速  $= \frac{2d}{\Delta t}$
- **实验结果:** 未测出光速。实验为什么没成功?



# 伽利略的实验设想

如果光速是有限的，那  
速度一定大到不可思议！



Galileo(1564-1642)

思考：如何解读这句话？

# 光速测量实验的误差分析

- 考虑人工计时存在误差 $\sigma_{\Delta t}$ 和距离测量误差 $\sigma_s$ 。这些误差会传递到速度，速度的误差 $\sigma_v$ 为：

$$\text{光速 } v = s / \Delta t$$

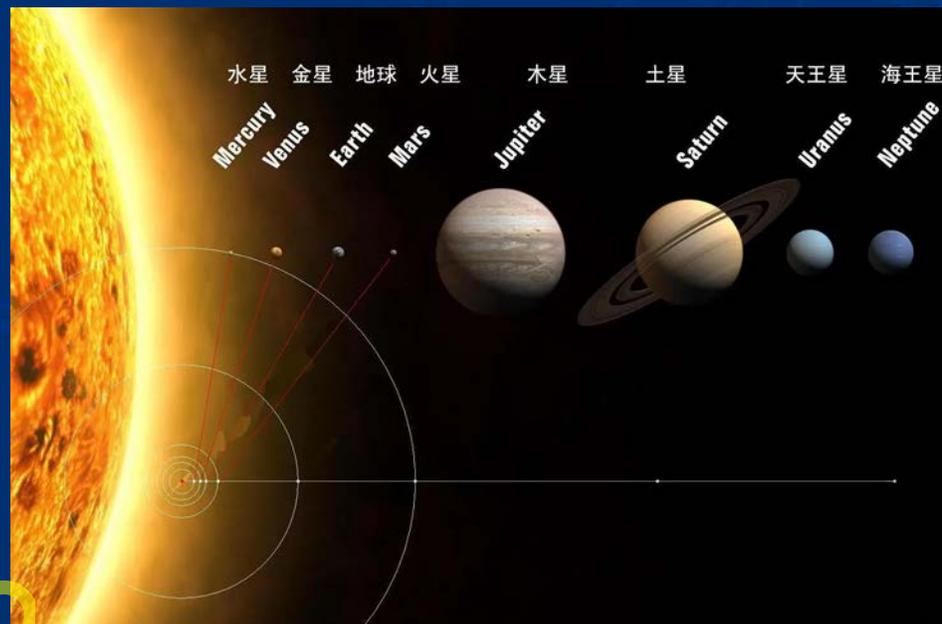
$$\text{相对误差 } \frac{\sigma_v}{v} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_s}{s}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2}$$



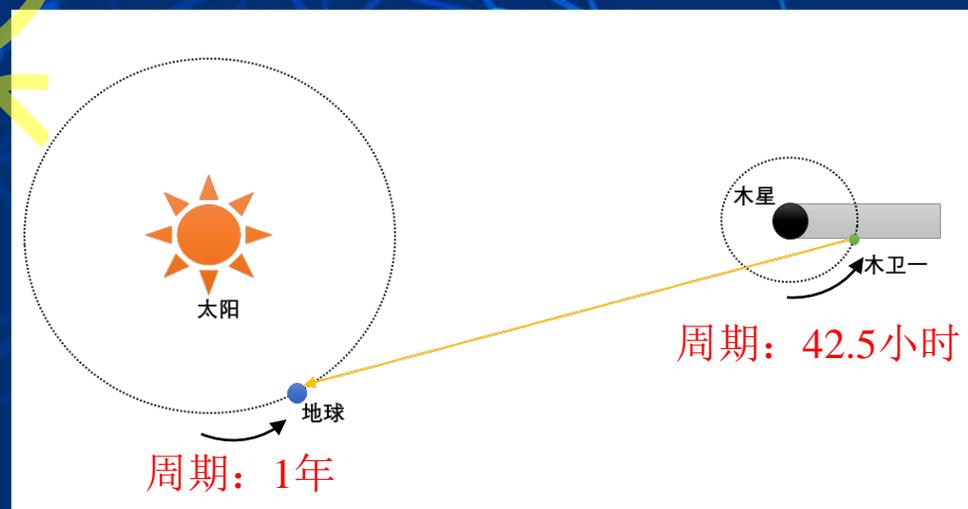
- 假设距离测量误差小到可以忽略，若要使速度的误差小于10%，时间测量误差必须要小于10%。
- 由于光速太快，光在两山顶之间的传播时间只有10  $\mu\text{s}$ 左右(1  $\mu\text{s} = 10^{-6} \text{s}$ )，伽利略实验的计时精度至少要达到1  $\mu\text{s}$ ，才能有效测定光速，人工计时不可能达到这个精度(人的反应时间大于0.2 s)。

# 木星卫星蚀

- **木星小知识：** 距离太阳第五近的行星，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。



- **木星卫星蚀：** 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。



# 一次意外的发现——光速有限(1671-1673年)

➤意外的发现：罗默发现在一年中不同时期，木卫一蚀出现的时间与固定周期42.5小时计算出的结果有些差异。他的观测数据显示，当地球和木星距离最近，木卫一蚀出现时间比平均值早约11分钟，当地球和木星距离最远，木卫一蚀出现的时间则比平均值晚了约11分钟(包含计时误差)。

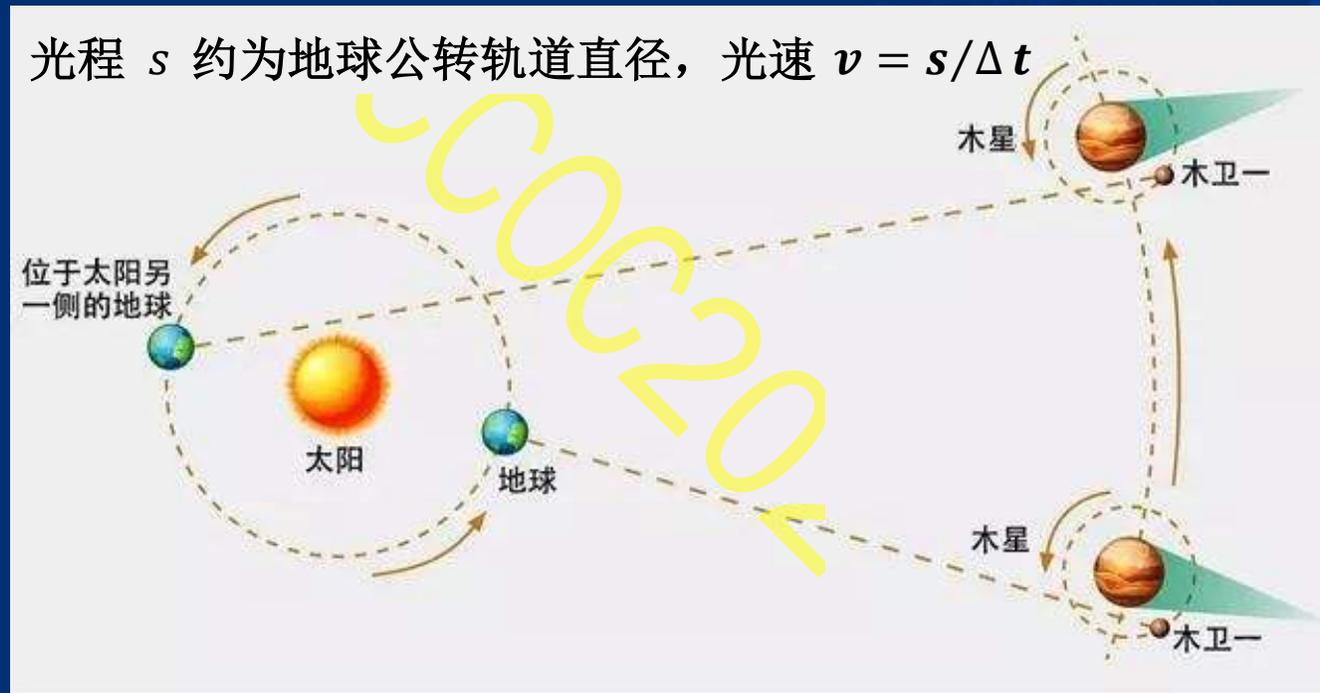


Romer(1644-1710)

●内在原因：**光速有限**！在一年中，地球和木星的距离不断变化，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(包含计时误差)就是光线走过地球和木星间最大和最小距离(约等于地球公转轨道直径)的时间差。

# 利用木星卫星蚀测光速

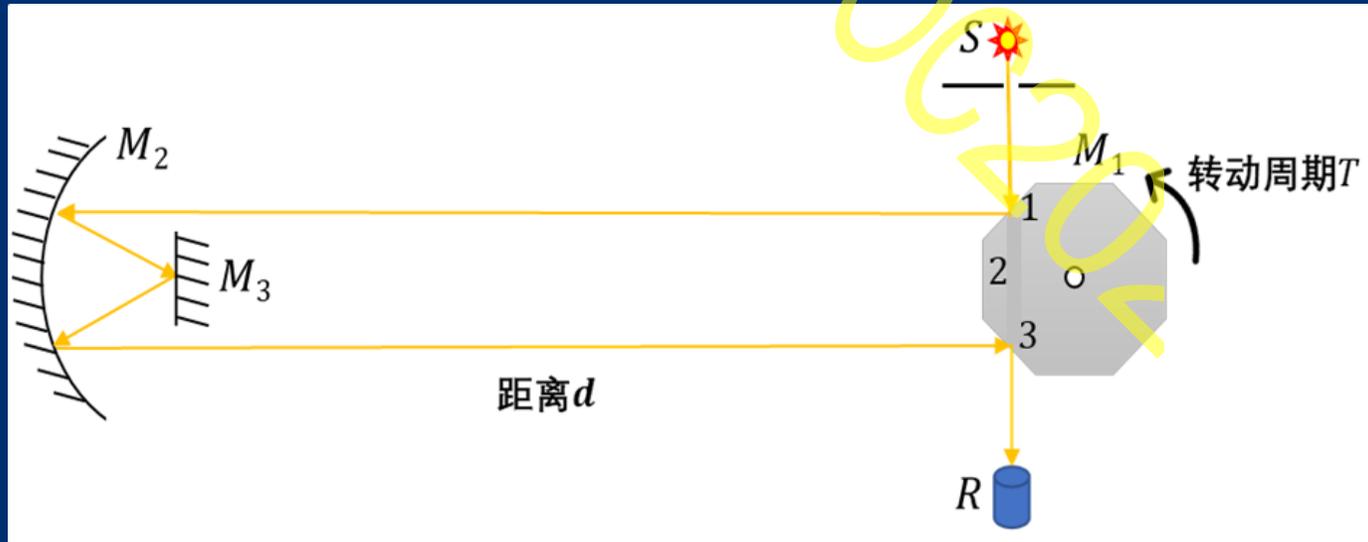
- 1676年，罗默公开了光速有限的推测以及观测数据，其他天文学家利用他的数据计算得出光速约为  $2.2 \times 10^8$  m/s。



- 和现代光速测量结果相比，这个结果的误差高达30%(计时误差较大)。但仍然是了不起的成就，**人类**第一次观察到光速有限，并且正确地估算出光速的数量级。

# 旋转棱镜法测光速 (1877-1879年)

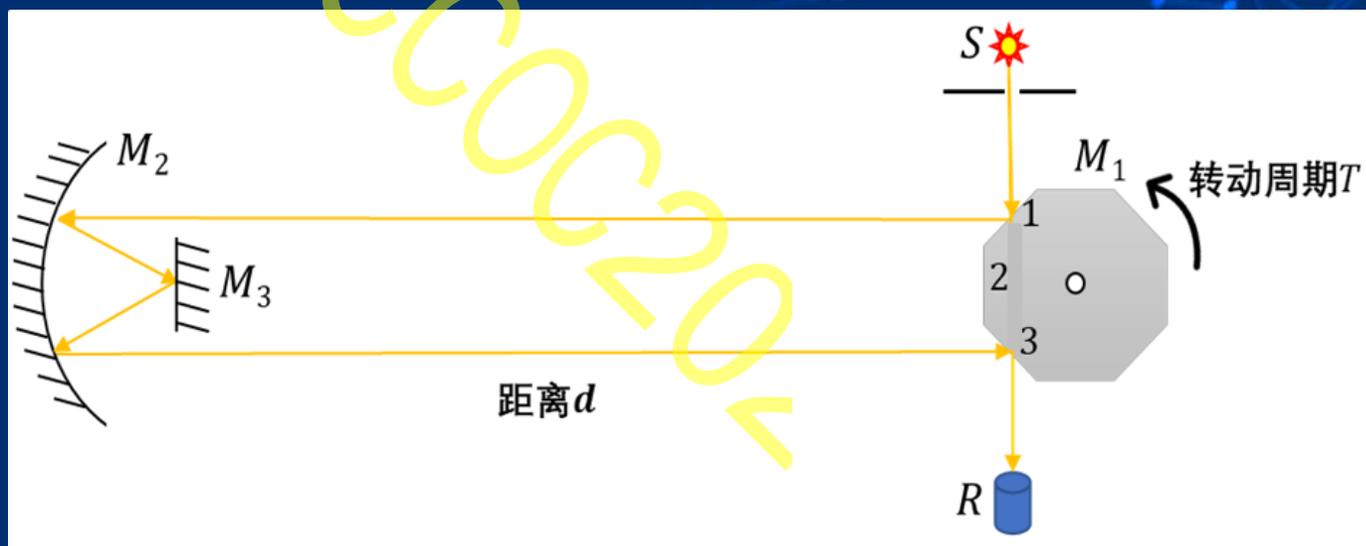
- 迈克尔逊的实验装置：在相隔较远的两处放置八面镜 $M_1$ 和反射装置 $M_2$ 、 $M_3$ ，光从光源 $S$ 发出，经过八面镜反射后传播到远处的反射装置 $M_2$ 、 $M_3$ ，再反射回八面镜，最终进入观察目镜 $R$ 。
- 只有棱镜在特定角度时，观察目镜处才会有光。由于装置 $M_1$ 和 $M_2$ 之间相距公里量级，如果八面镜转动一个微小角度，反射光就无法照射到 $M_2$ ，观察目镜上看不到光。



Michelson(1852-1931)

# 旋转棱镜法测光速

- **实验方法：**让八面镜旋转起来，旋转角速度逐渐增大，在某些特定角速度下可以从观察目镜中看到光。由于光线从镜面1反射到达M2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。



- $M_1$ 、 $M_2$ 两套装置相距为 $d$ ，八面镜转动周期为 $T$ 。由于 $d$ 远大于实验装置的尺度，光传播距离近似为 $s=2d$ ，光传播时间 $\Delta t=T/8$ 。光速  $v = 16d/T$

# 锲而不舍——测量精度再次提升

- **实验结果：**迈克尔逊将这套装置分别安装在相距很远的位置，只有在一年中天气好和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(1877-1879年)，共得到几百多组数据，测得的光速值为 $299,853 \pm 60 \text{ km/s}$ 。
- **再次挑战：**1923年，迈克尔逊用改进的旋转棱镜，在加利福尼亚的两个相距约35公里的山头之间重做了这个实验，把光速的精度提高到 $299,798 \pm 4 \text{ km/s}$  (和现代物理采用的光速值仅差十万分之二)。

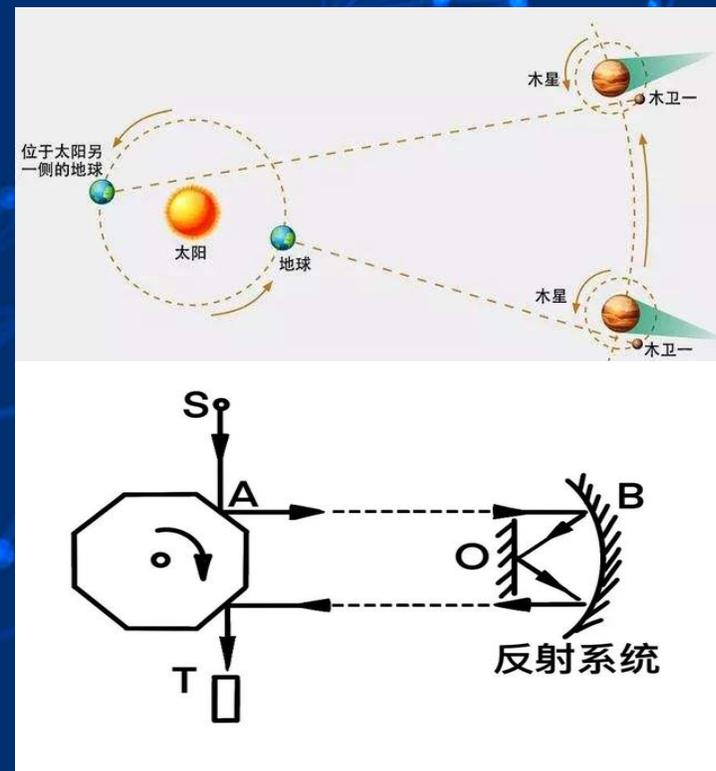
# 小结——光速测量实验的历史

- 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。
- 因为光速太快，实验设计者都不约而同的把光源和接收装置的距离拉大，让光传播得远一些，传播时间长一些，降低时间测量的误差。

$$v = s / \Delta t$$

$$\frac{\sigma_v}{v} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_s}{s}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2}$$

光速太快，计时精度要求高



# 实验设计——宇宙线速度 测量



2024

# 实验设计——宇宙线运动速度测量

● **实验原理：**测量宇宙线粒子在相距为 $d$ 的两台探测器之间的飞行时间 $\Delta t$ 。

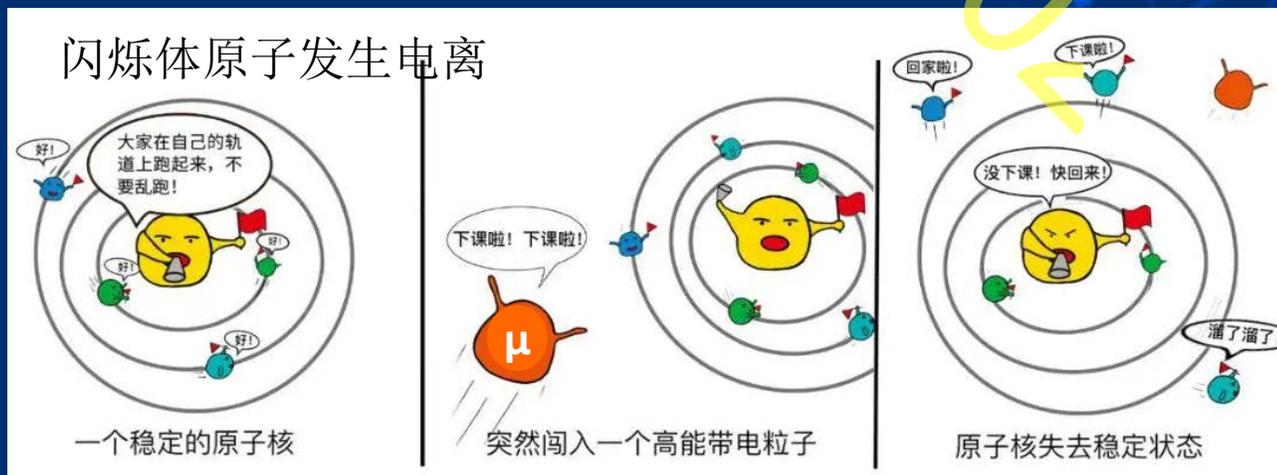
➤ **思考：**在教室内开展实验，计时精度有要多高？

高能粒子的速度非常接近光速，粒子飞行2 m的时间仅为6.6 ns ( $1 \text{ ns}=10^{-9} \text{ s}$ )。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0.33 ns以下，时间测量需要相当精确！



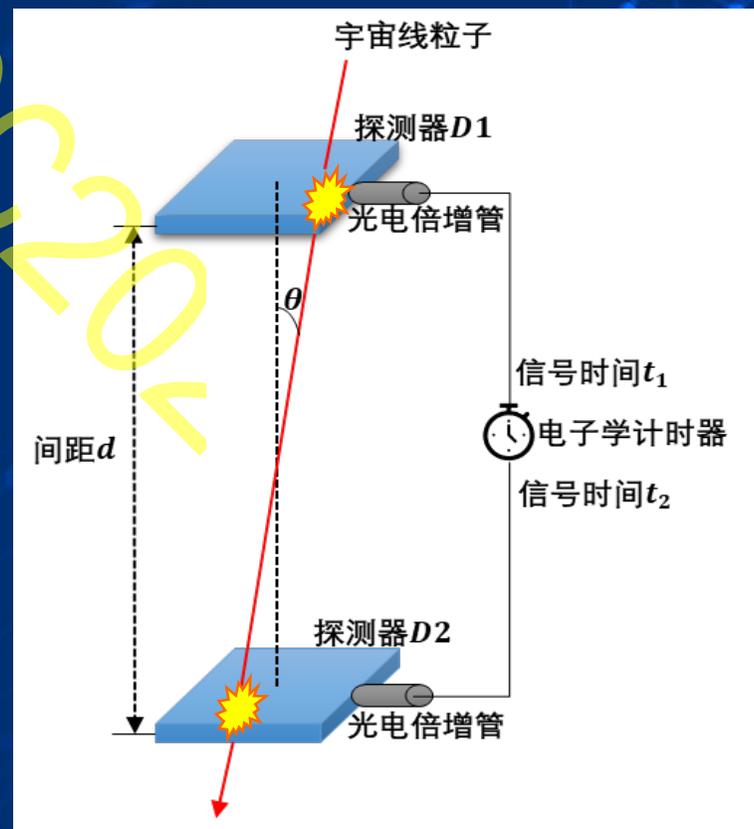
# 实验设计——宇宙线运动速度测量

- 实验装置：缪子望远镜
- 探测器原理：缪子望远镜由上下两层探测器组成，当缪子进入闪烁体探测器时，将一部分能量沉积在闪烁体中，闪烁体原子或分子发生电离或激发，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并转换为电信号。经过电缆线传输到电子学，电子学计时器将记录这个信号的到达时间。



# 实验设计——宇宙线运动速度测量

- 当缪子贯穿了上下两台探测器D1、D2时(飞行距离  $s = d/\cos\theta$ )，电子学记录相应信号到达时间 $t_1$ 、 $t_2$ 。
- 思考：电子学记录的信号达到时间等于粒子击中探测器的时间吗？飞行时间  $\Delta t = t_2 - t_1$  ？



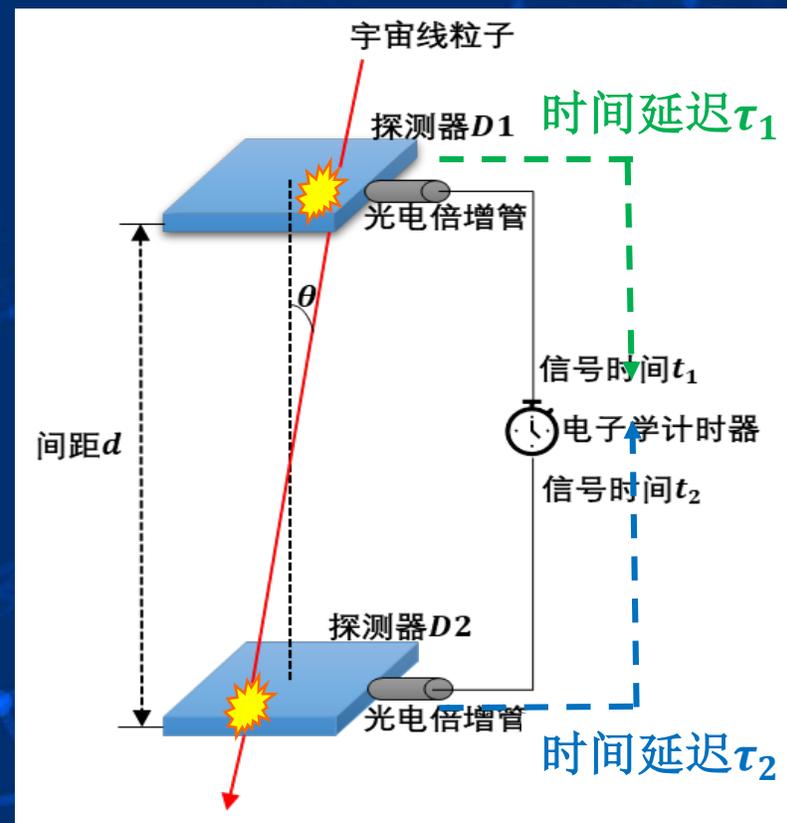
# 实验设计——宇宙线运动速度测量

- 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极传输并放大，再经过信号线缆传输到电子学计时器，这些过程需要几十纳秒量级的**时间延迟**。
- 考虑这段时间延迟后，飞行时间为

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

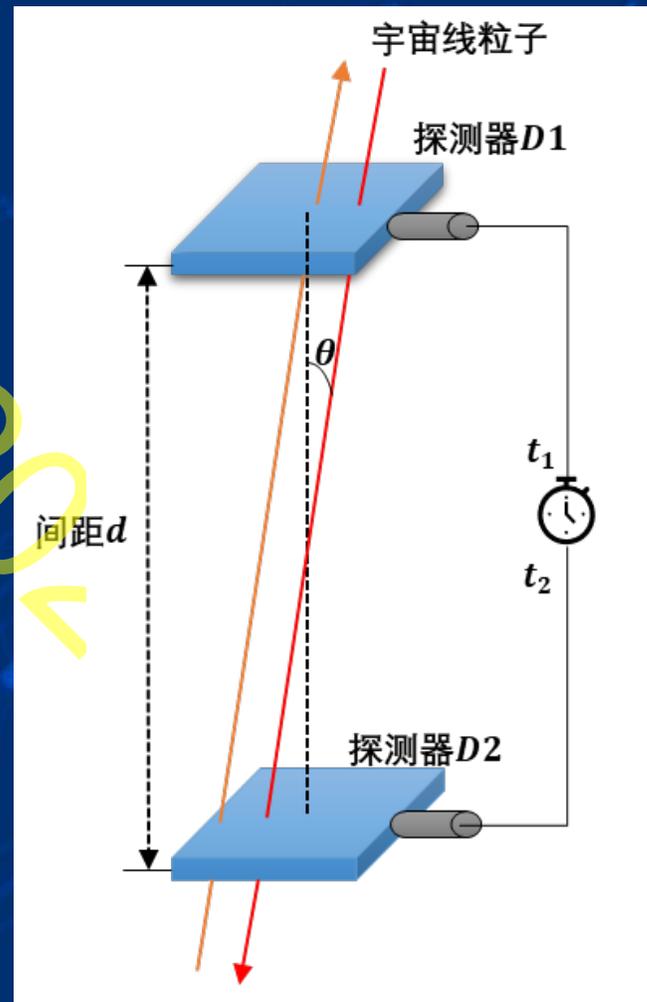
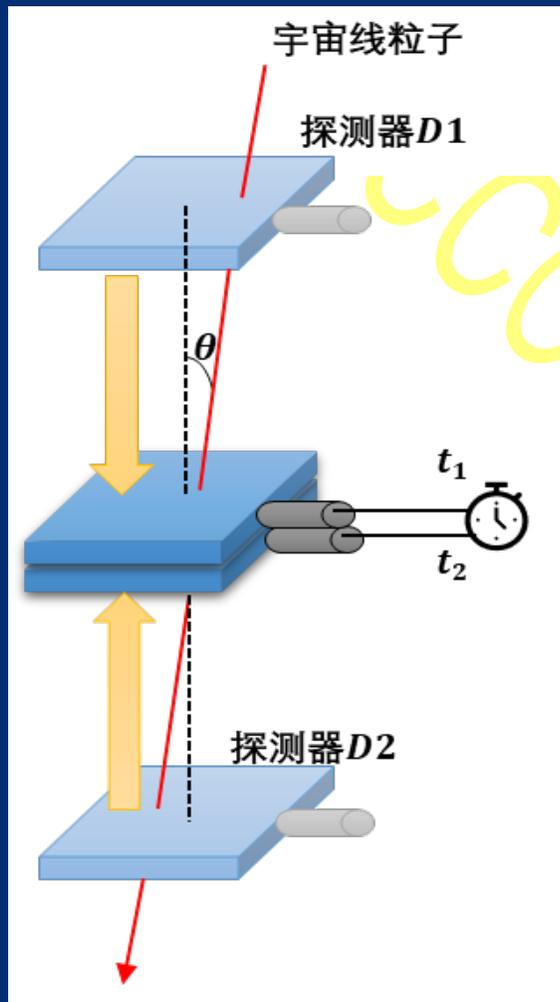
当 $\tau_2 - \tau_1 \neq 0$ ， $\Delta t \neq t_2 - t_1$  (时钟不同步)

- 怎样测定并消除  $\tau_2 - \tau_1$ ? (对时, 参考实验视频讲解)



# 对齐时钟(参考视频讲解)

- 方法：1. 相对校准；2. 交互消除法；



# 实验后的思考

1. 测到的粒子来自天上还是地下？
2. 宇宙线速度在误差范围内是不是近似等于光速？
3. 怎样继续提高精度？

# 课程知识点

1. 高能宇宙线的速度非常接近光速。
2. 宇宙线速度测量的实验方法。
3. 速度测量实验的误差分析方法。
4. 利用宇宙线望远镜装置进行宇宙线速度测量实验。

## 课后题目：

1. 到达海平面宇宙线 $\mu$ 的平均能量约为4GeV，相应速度的大小是？  
A. 299672.5 km/s    B. 299672.5 m/s    C. 30 km/s
2. 实验员通过测量宇宙线穿过一段距离的飞行时间来测定宇宙线速度。如果距离测量的相对误差为1%，时间测量的相对误差为5%，那么宇宙线速度的相对误差是多少？