

光速

张天宇 金佳伟 冯光磊

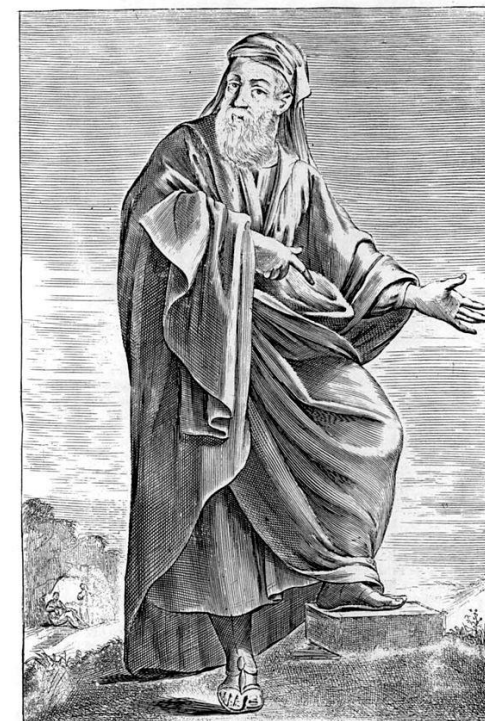
在开始谈历史之前



恩培多克勒 ~450 BC

希腊前苏格拉底哲学家**恩培多克勒(Empedocles)**是第一个提出关于光和视觉的全面理论的人，他提出：我们之所以能看到物体，是因为某些粒子(光)从眼睛中出来，与从物体中出来的类似粒子相遇，从而构成了视觉，而光从一个点传到另一个点需要时间。虽然有一定缺陷，但这成为后来的希腊哲学家和数学家(如欧几里德)构建光、视觉和光学理论的基础。

恩培多克勒的哲学最著名的是提出了四大古典元素(火、气、水、土)的宇宙论。他还提出了他称之为“爱”和“冲突”的力量，这两种力量将分别混合和分离这些元素。



Empedocles.

恩培多克勒

欧几里德、托勒密 ~290 BC

希腊数学家欧几里德(Euclid)与埃及法老托勒密一世(Ptolemy I Soter)共同推进了恩培多克勒的理论：光是从眼睛发射出来的，它将物体的信息传递给观察者，从而形成视觉；所见物体的尺寸和形状，由观察角度和距离共同决定。

此外，欧几里得还论证了：“较大角度下看到的東西看起来更大，较小角度下看到的東西看起来更小，而相同角度下看到的東西看起来相等”。

欧几里德被誉为“几何学的创始人”。

托勒密在当时的最重要贡献其实是一一大力资助欧几里得。



欧几里得雕像

希勒 ~50 AD

基于这一理论，希腊数学家、工程师希勒(Hero of Alexandria)推断，光速必须是无限的，因为遥远的物体(比如星星)一睁眼就会出现。他提出了光的最短路径原理：如果一束光在同一介质内从一点传播到另一点，所遵循的路径长度是最短的。

他被誉为古代最伟大的实验家。

近1000年后，阿尔哈肯才将他提出的这一原理扩展到反射和折射，后来费马在1662年以这种形式阐述了这一原理。



希勒

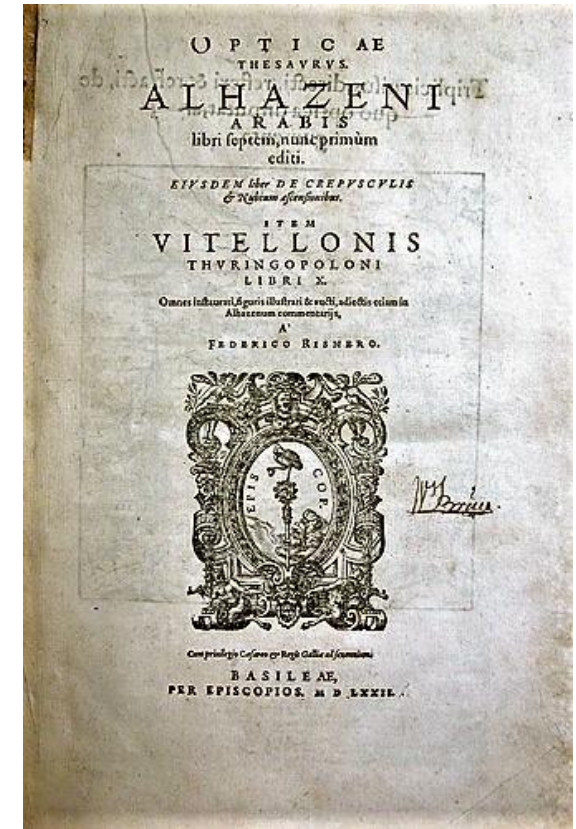
阿尔哈曾 ~1020 AD

1021年，阿拉伯数学家、天文学家和物理学家**阿尔哈曾 (Alhazen)**出版了《光学之书》。书中提出了一系列论据，否定了前人的视觉发射理论，而支持光从物体进入眼睛的观点。

此外他还提出：光是实在的物质，光速有限，而且在高密度的物体中会降低，只不过受感官所限无法察觉。

他认为，颜色的行为与光相似，也是一种独特的存在形式。他断言：在任何光照下，从有色物体的每一点，都会沿从该点出发的每条射线发出光线和颜色，与我们的眼睛和视觉无关。

他被誉为“现代光学之父”，在以视觉为主的多个方面发展了光学原理。他最有影响力的作品名为Kitāb al-Manāẓir（光学之书），写于1011-1021年，有一个拉丁文版本存世。

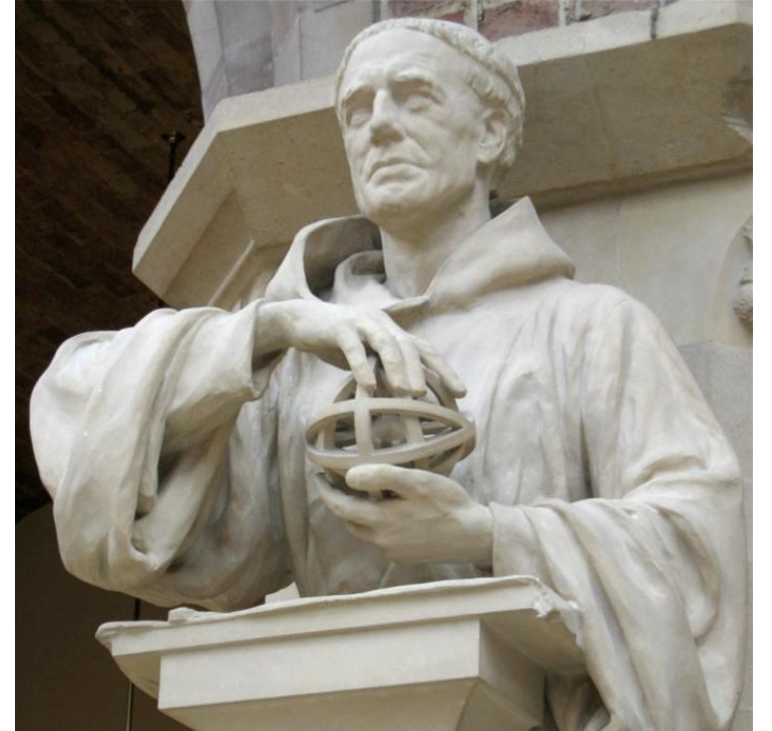


《光学之书》

罗杰·培根 ~1260 AD

中世纪英国哲学家罗杰·培根(Roger Bacon)也认为空气中的光速不是无限的，他使用了阿尔哈曾的著作中的哲学论据。

培根讨论了视力的生理学成因以及眼睛和大脑的解剖学，也对反射、折射、反射镜和透镜做了研究。他以(拉丁文翻译的)阿尔哈曾的《光学之书》为主要导向，也大量借鉴了(另一个)托勒密的《光学》(的阿拉伯文译本的拉丁文翻译)。



培根雕塑

约翰内斯·开普勒 ~1610 AD

德国天文学家、数学家、占星家、自然哲学家和音乐作家
约翰内斯·开普勒(Johannes Kepler)认为，光速是无限的，
因为空旷的空间对它没有任何障碍。

*他是17世纪科学革命的关键性人物，以他的行星运动定律和他的
《新天体》、《世界的和谐》和《哥白尼天体》而闻名。这些作
品也为牛顿的万有引力理论提供了基础。*



开普勒肖像(1620)

笛卡尔 ~1640 AD

法国哲学家、数学家、科学家笛卡尔(René Descartes)认为，如果光速是有限的，那么在月食期间，太阳、地球和月亮会出现明显错位。由于没有观察到这种错位，笛卡尔认为光速是无限的。笛卡尔猜测，如果光速有限，他整个哲学体系可能会被摧毁在对折射定律的推导中。他认为，(即使光速是无限的)介质越密，光速越快。

他通过几何构造和折射定律（也称为笛卡尔定律，在法国外更常见的是斯奈尔定律）算出了彩虹的角半径是42度（彩虹的边缘和从太阳发出、穿过彩虹中心的光线在眼睛处的夹角）
他独立发现了反射定律，并在科学史上首次发表这一定律的文章。他是第一批认为灵魂应该接受科学调查的科学家之一，宗教当局因此认为他的书是“危险的”。



笛卡尔肖像

费马~1650 AD

法国数学家皮埃尔·德·费马(Pierre de Fermat) 论证了光速的有限性。他认为，介质越密光速越慢。

费马原理的最初版本是由欧几里得阐明的；后来，希勒指出这条路径“给出了最短的长度和最短的时间”；费马将其完善并概括为“光传播的路径是两个定点间所有路径中所花时间最短的”。

他发现了一种方法来寻找曲线的最大和最小坐标，类似于当时还未发展出的微分计算方法，因此对微积分的早期发展功不可没。除了光学外，他对解析几何、概率论和数论都有很大贡献。他还有个身份是律师。

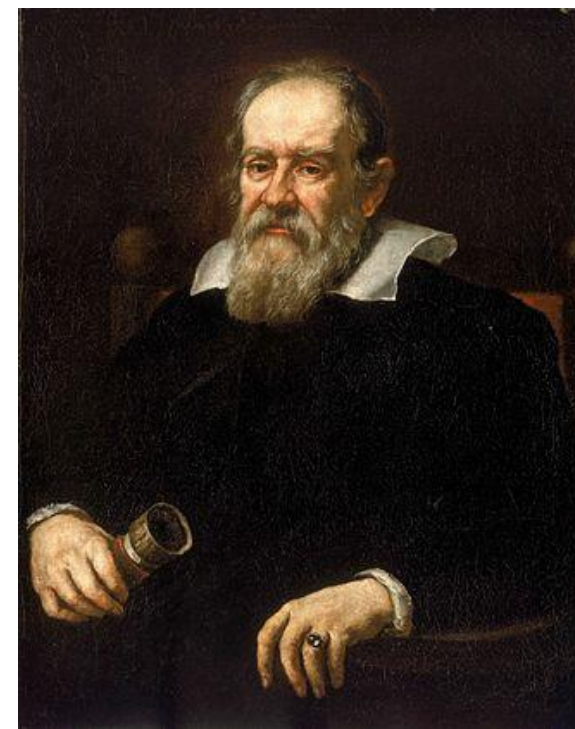


费马肖像

伽利略 ~1640 AD

1638年，意大利天文学家、物理学家和工程师**伽利略·伽利莱(Galileo Galilei)**提出了一个实验(并声称早在几年前就已经做了这个实验)，通过观察揭开灯笼和在一定距离外感知它之间的延迟来测量光速。结论是，光的传播要么是瞬时的，要么是特别快的。

他揭开了人类历史上对光速进行研究的序幕。



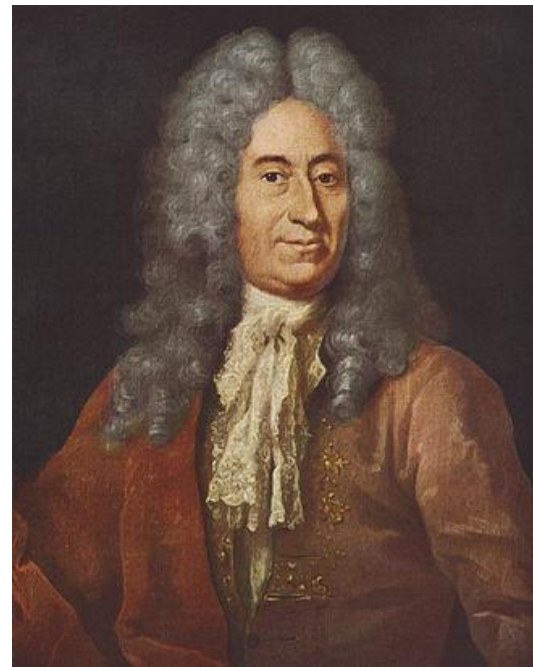
伽利略肖像

罗默~1670 AD

1676年，丹麦天文学家罗默(Rømer)首次对光速进行了定量估计：根据天文观察，当地球接近木星时，木星最内侧的卫星木卫一的轨道周期似乎比地球从木星退去时短。他将这一现象归因为：光的传播速度是有限的。经过八年的观察，他估计光穿过地球轨道的直径需要22分钟。但罗默光速有限的观点，直到1727年詹姆斯·布拉德利对所谓的光的畸变进行了测量才被完全接受。

他并未给出其他关于光的任何数值。荷兰数学家、物理学家克里斯蒂安·惠更斯(Christiaan Huygens)首先将这一估算与对地球轨道直径的估算结合起来，得到的光速估值为22万千米/秒。

“ $\Delta t = 22(\alpha/180^\circ)$ ”



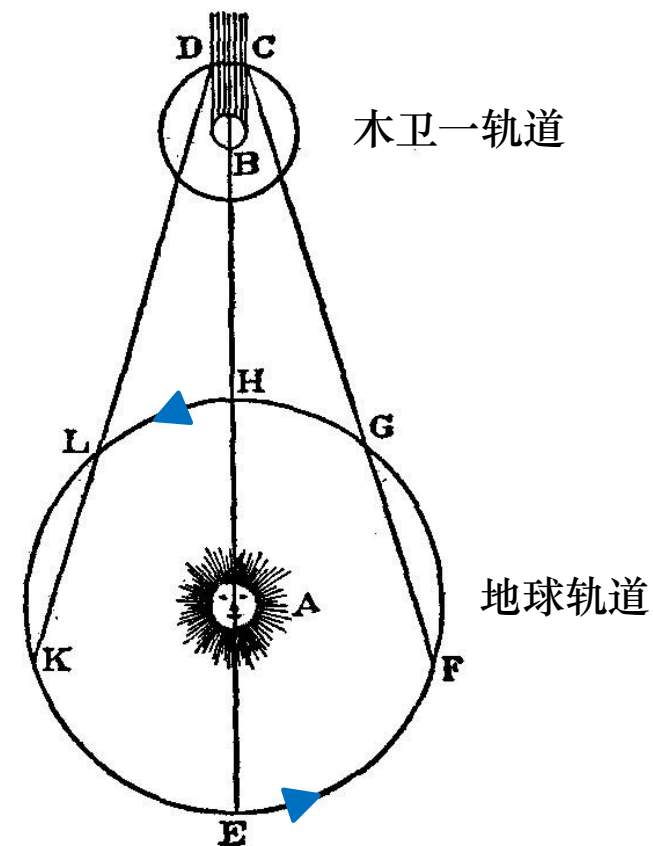
罗默肖像

罗默~1670 AD

The eclipses of Io recorded by Rømer in 1676

Time is normalized (hours since midnight rather than since noon); values on even rows are calculated from the original data.

Month	Day	Time	Tide	orbits	average (hours)
June	13	2:49:42	C		
		2,750,789s		18	42.45
May	13	22:56:11	C		
		4,747,719s		31	42.54
Aug	7	21:44:50	D		
		612,065s		4	42.50
Aug	14	23:45:55	D		
		764,718s		5	42.48
Aug	23	20:11:13	D		
		6,906,272s		45	42.63
Nov	9	17:35:45	D		

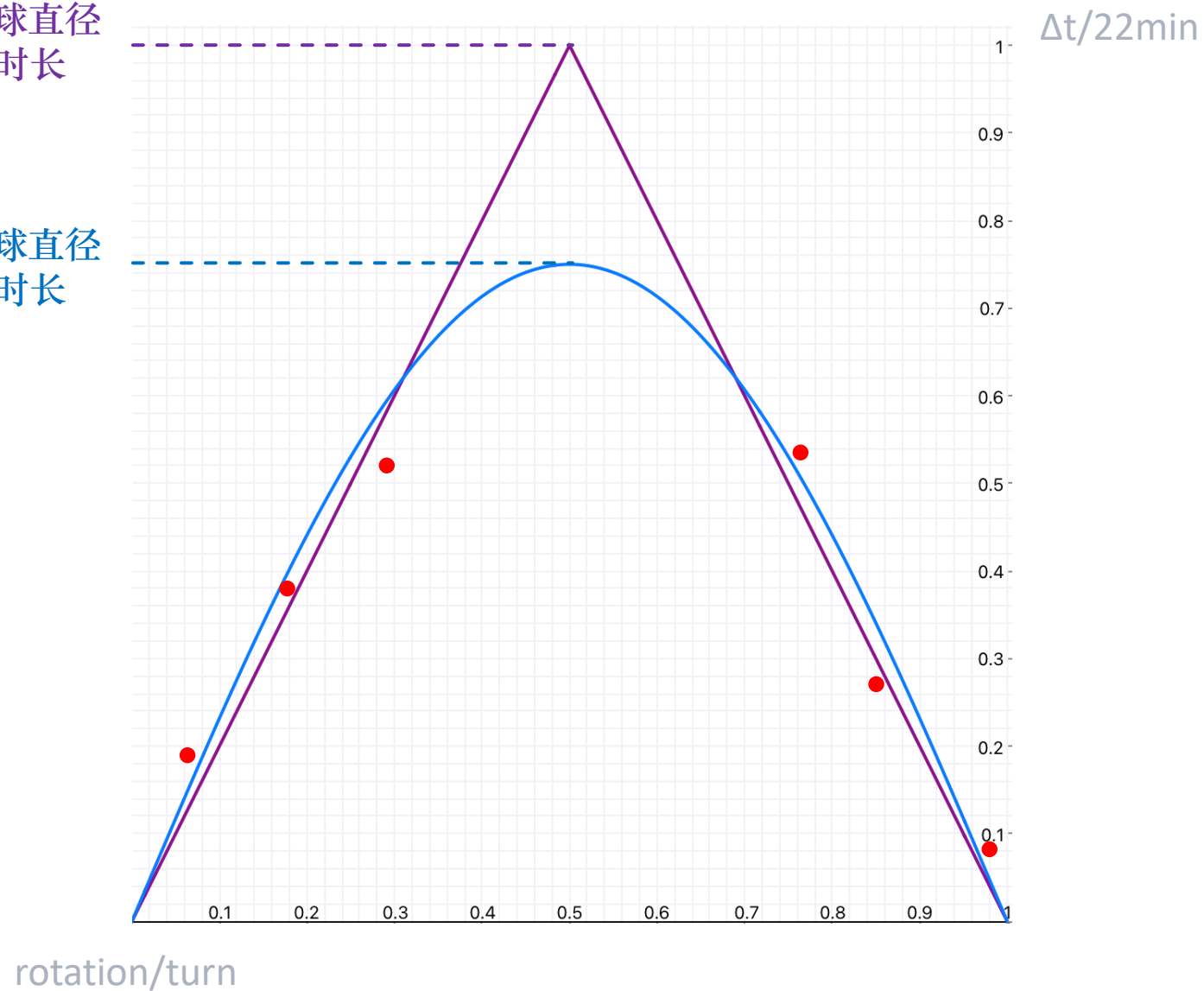


示意图

罗默 ~1670 AD

光穿越地球直径
的估计时长

光穿越地球直径
的估计时长

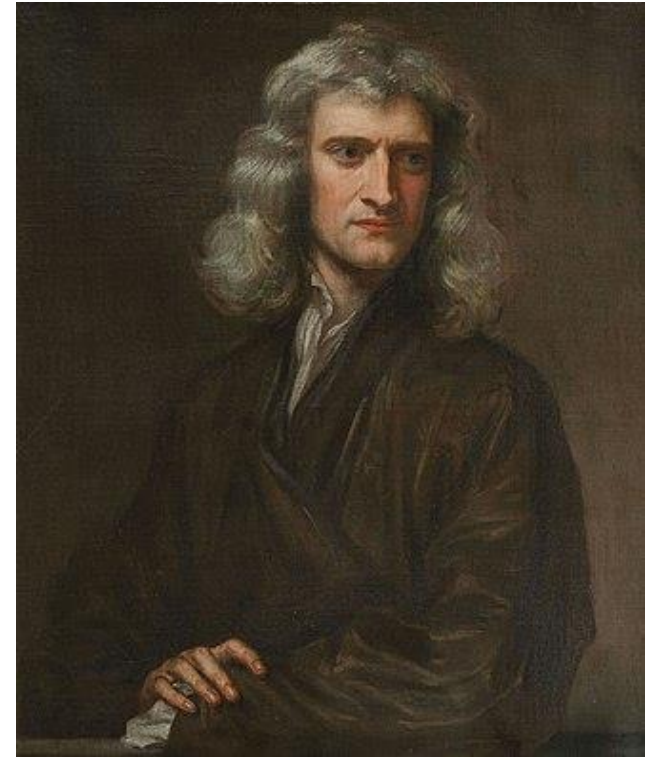


牛顿 ~1700 AD

英国数学家、物理学家艾萨克·牛顿(Isaac Newton)在1704年出版的《光学》一书中详述了罗默对光速的计算，并修正了光从太阳到地球的时间至“7或8分钟”的数值（现代为8分19秒）。

牛顿询问了罗默的日食阴影是否是彩色的；回答为不是。于是，他得到结论：不同颜色的光以相同的速度传播。

1666年，牛顿观察到，即使入射棱镜的光线是圆形的，从最小偏向角离开棱镜的光谱也是长方形的。也就是说，棱镜以不同的角度折射不同的颜色。他得出结论：颜色是光的内在属性。而在此之前，这一点一直是个争论不休的问题。



牛顿肖像

布拉德利 ~1730 AD

1729年，英国天文学家詹姆斯·布拉德利(James Bradley)发现了恒星的角位置会以年为周期发生变化，并将它归因于光行差。根据这一效应，他确定光的速度必须是地球公转速度的10210倍(现代测量值：10066倍)，或者说，光从太阳到地球需要8分12秒，仅有2%的相对误差。

他是第三任皇家天文学家，以天文学中的两个发现而闻名：光的畸变和地轴的旋转。这两个发现当时被誉为是“本世纪最杰出、最有用的发现”。

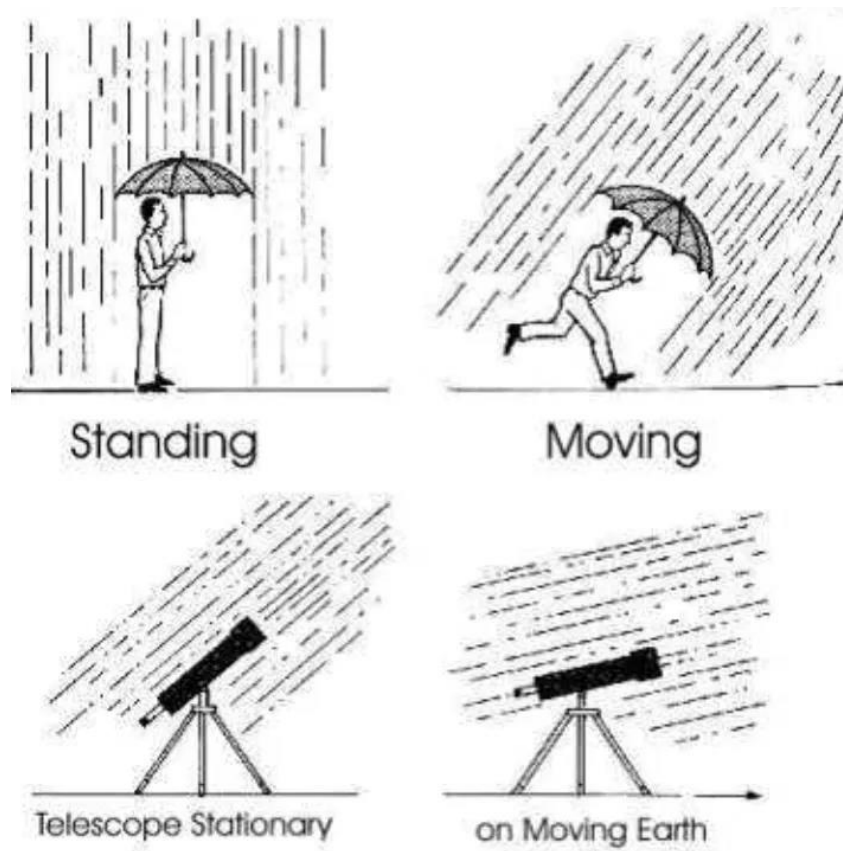
他的观察结果由于所有权的争议而耽搁了出版；幸而，它最终由牛津的克拉伦登出版社分为两卷（1798，1805）成功发表。

他的另一个身份是牧师。



布拉德利肖像(1744)

光行差



光行差的直观解释

光行差

地球绕着太阳运动，因而地球上观察到的远处恒星的星光方向，与太阳参考系中观察到的星光方向是略有不同的。由于只受地球运动方向影响，星光的方向偏差以一年为变化周期。

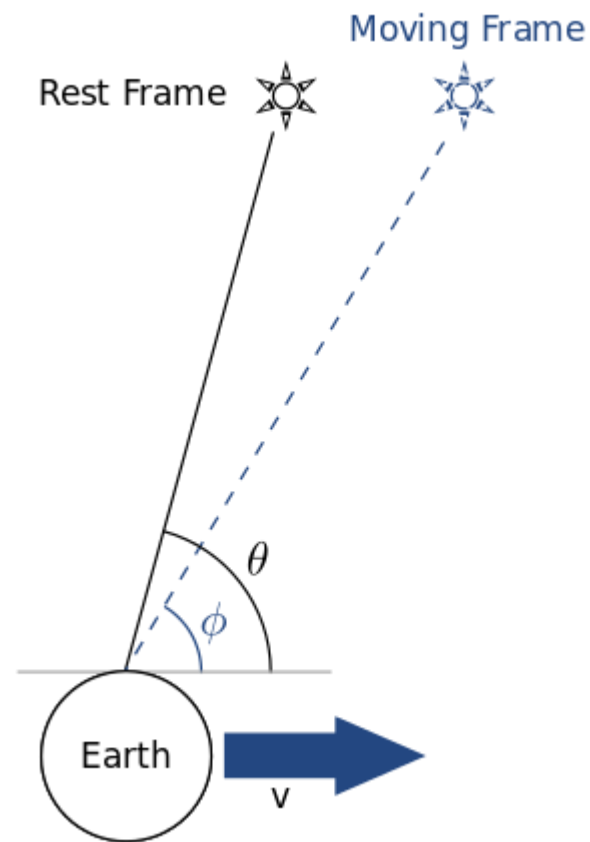
考虑二维情况，经典理论下，我们可以方便地算出太阳参考系中的角度 ϕ 与地球上观测角度 θ 的关系

$$\tan \phi = \frac{\sin \theta}{v/c + \cos \theta}$$

而相对论情况下的精确值为

$$\tan \phi_0 = \frac{1}{\gamma} \frac{\sin \theta}{v/c + \cos \theta}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

用经典理论给出的相对误差仅有 $\pm 0.000001\%$ ，可略！



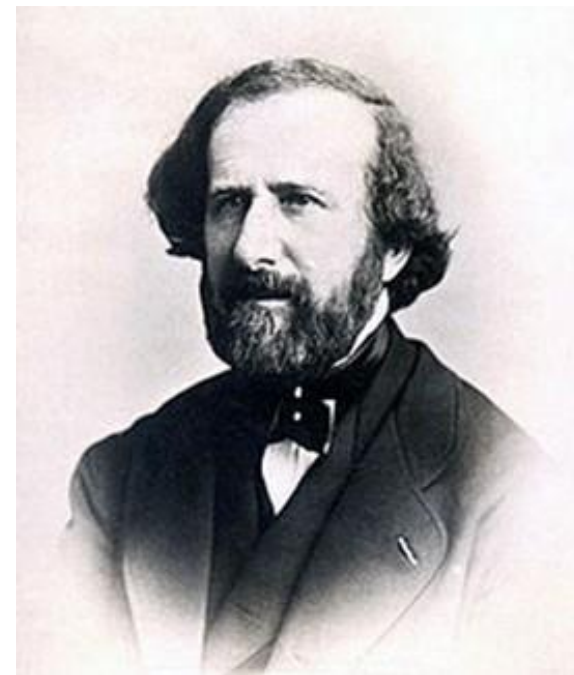
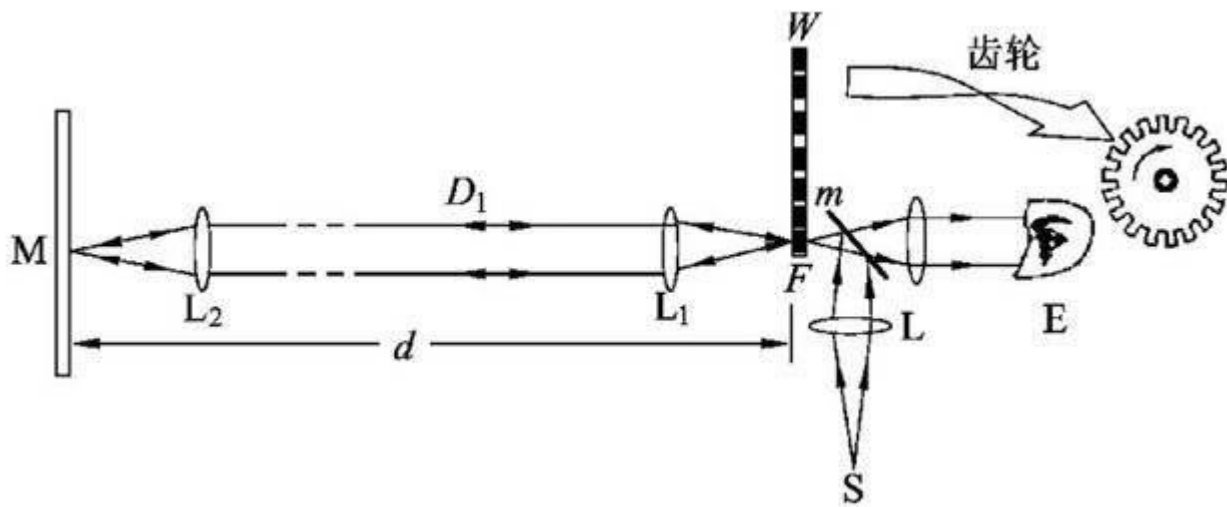
光行差

Star	Maximum deviation in declination of a star in the pole of the ecliptic (")
γ Draconis	40.4
β Draconis	40.2
η Ursa Maj.	40.4
α Cass.	40.8
τ Persei	41.0
α Persei	40.2
35 Camel.	40.2
Capella	40.0
MEAN	40.4

由于公转，远方恒星相对原来的位置的最大偏差为20.2角秒(现代测量值：20.49552角秒)，称为光行差常数(**the constant of aberration**)，它的正弦值就是地球公转速度与光速的比值。

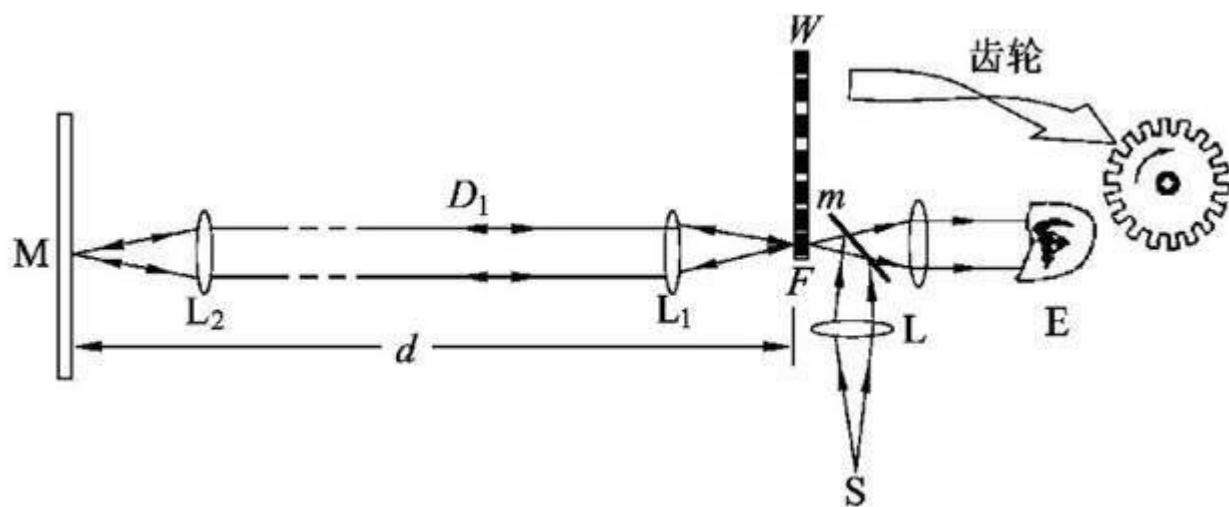
斐索 ~1849 AD

1849年，法国物理学家斐索第一次在地面上设计实验装置来测定光速。



Hippolyte Fizeau

齿轮法



① 齿轮将连续光线切割为“光脉冲”构成一“机械开关”

② 转速 n 可调，形成三种状态
全挡光光强为零——“关”

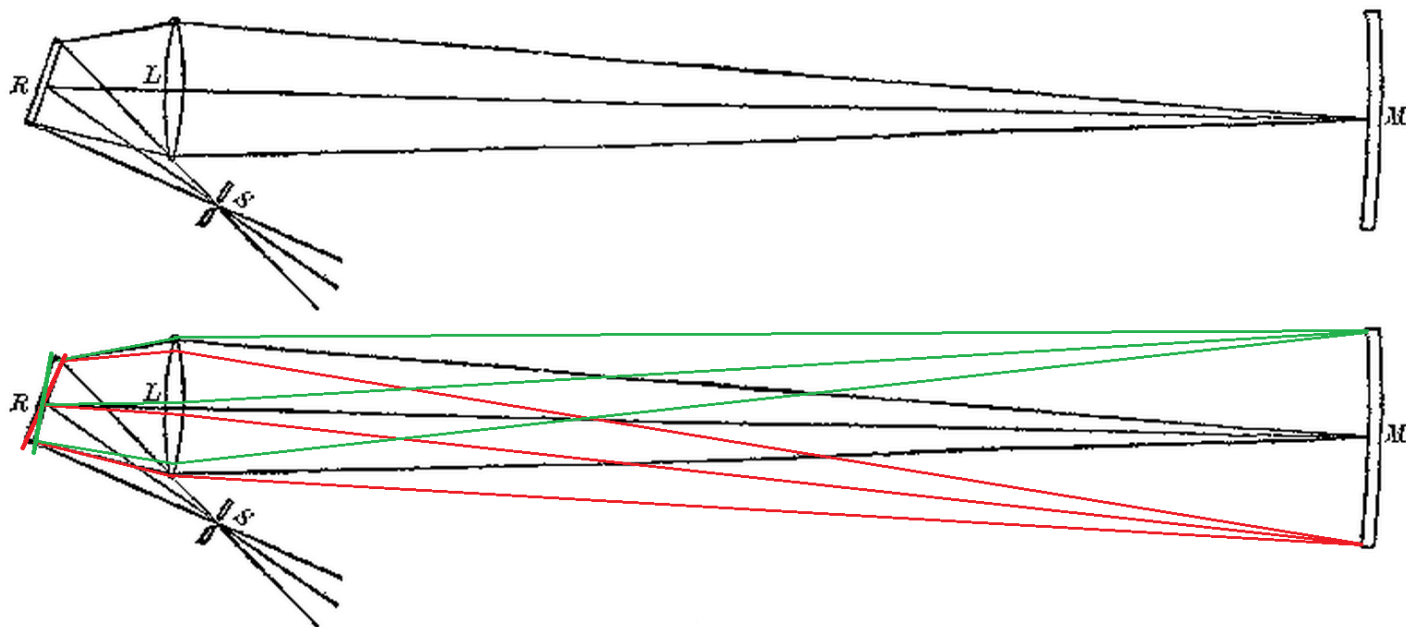
部分挡光，光强较弱——半“开” 半“关”

透光，光强最强——“开”

根据齿轮的转速以及齿轮与反射镜之间的距离，斐索计算出 **315000 km/s** 的光速值。由于斐索很难目视估计被相邻齿阻挡的光的强度最小值，他的光速值高了约 **5%**。

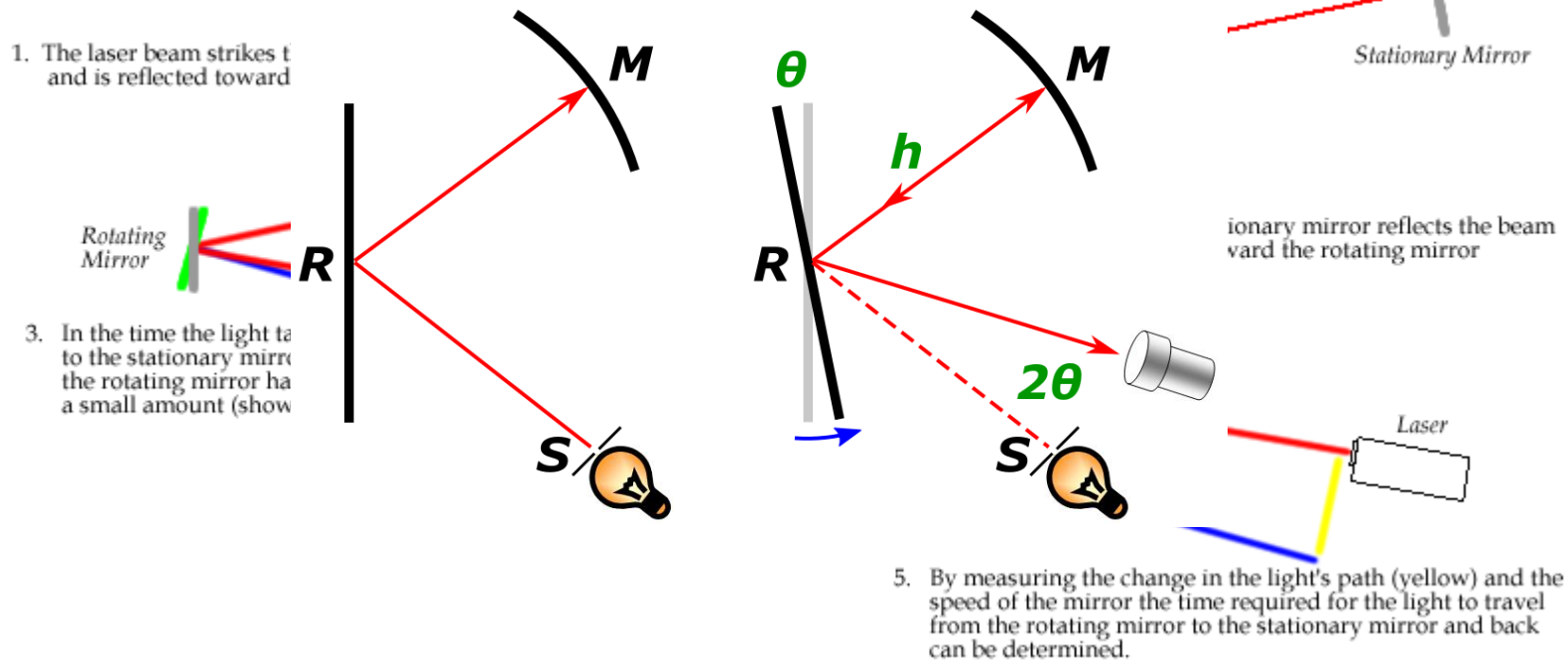
傅科 ~1850 AD

1850年，法国物理学家傅科改进了斐索的方法，只用一个透镜、一面旋转的平面镜和一个凹面镜。



Léon Foucault

旋转镜法



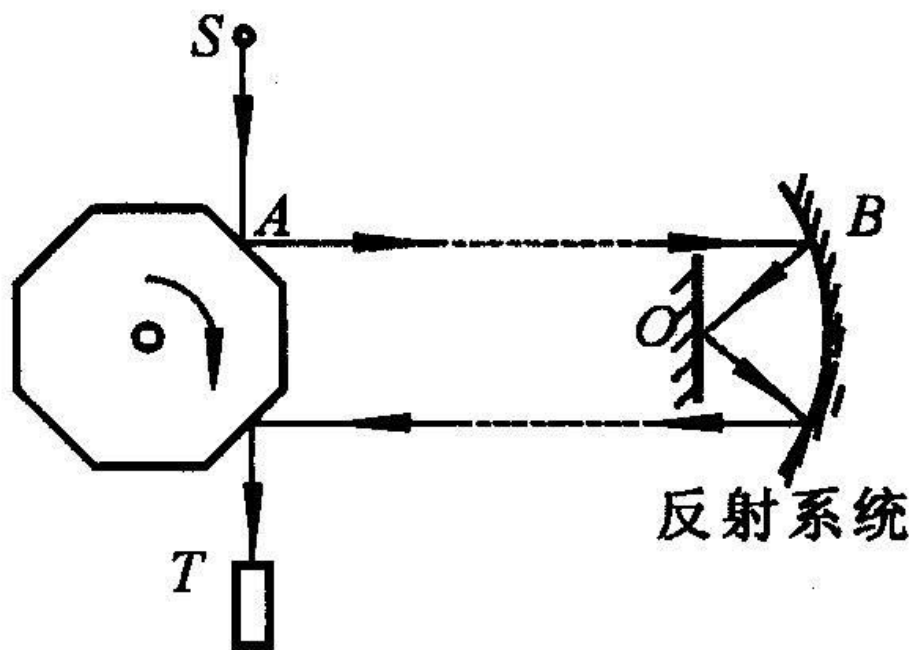
$$\theta = \omega \Delta t$$

$$c = \frac{2h}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow c = \frac{2h\omega}{\theta}$$

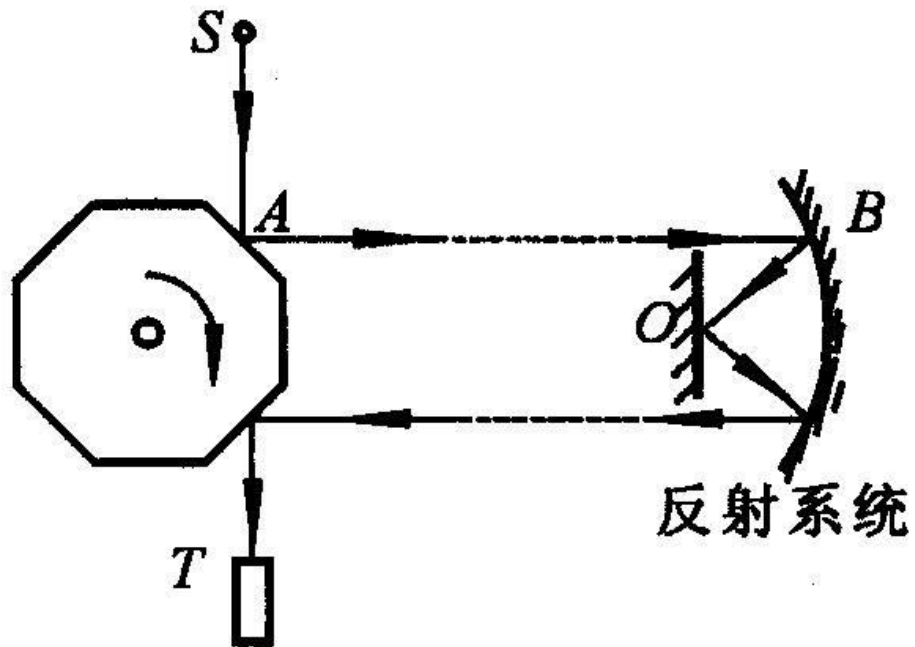
迈克尔逊 ~1879 AD

1879年，美国物理学家迈克尔逊设计旋转八面镜实验装置来测定光速。



Albert A. Michelson

旋转八面镜法



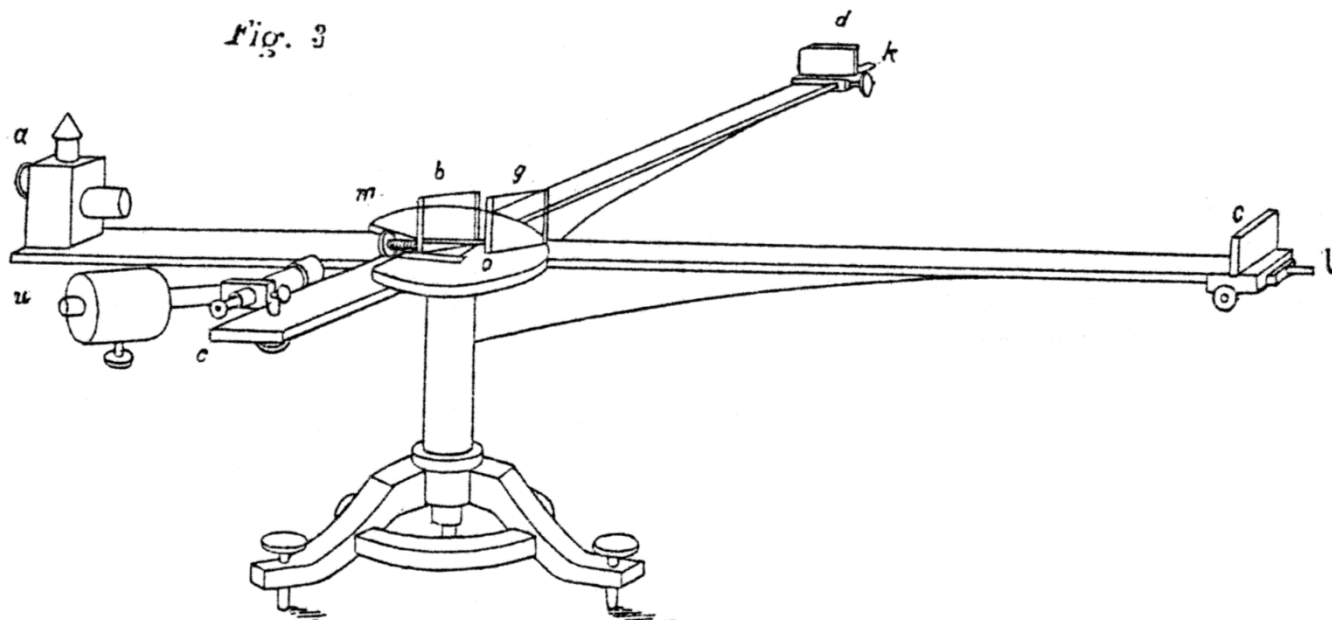
$$\Delta t = \frac{1}{8}T = \frac{1}{8n}$$

$$c = \frac{2L}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow c \approx 299740 \text{ km/s}$$

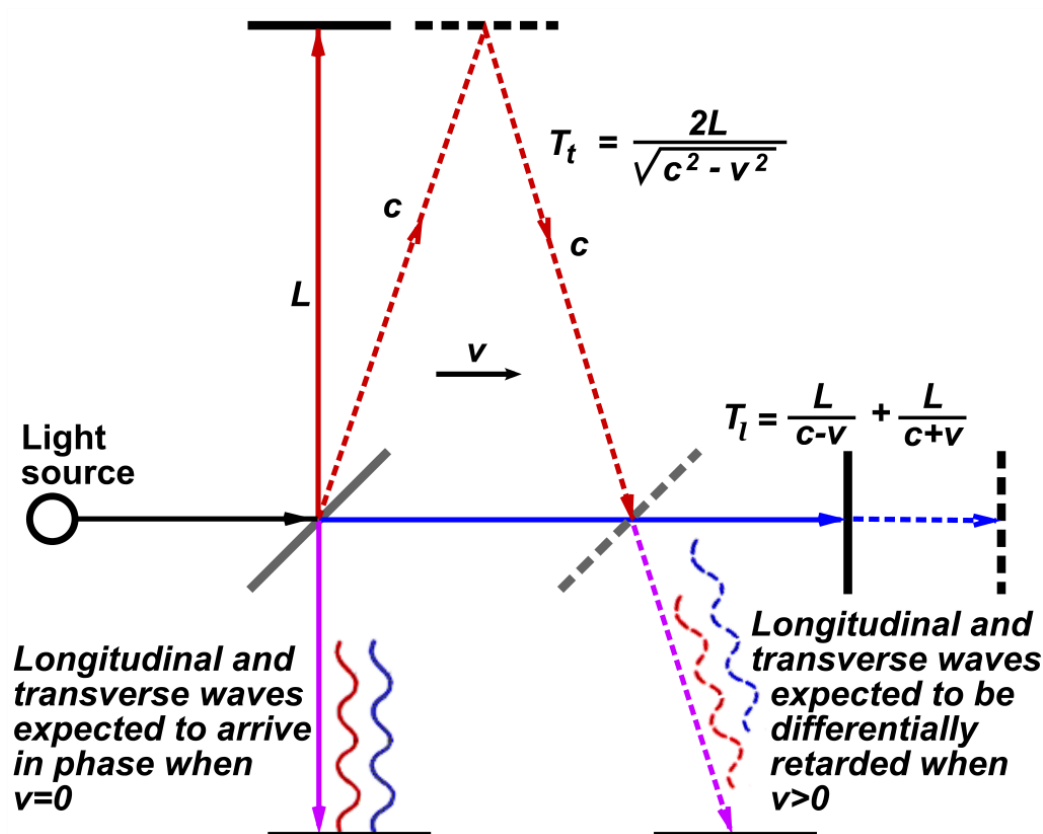
迈克尔逊-莫雷 ~1887 AD

1887年，迈克尔逊和莫雷用迈克尔逊干涉仪测量两垂直光的光速差值。



Albert A. Michelson

迈克尔逊-莫雷实验



T_l , T_t 不同，产生光程差

$$\delta = c(T_l - T_t)$$

预期：让实验仪器整体旋转**90度**，则光束**1**和光束**2**到达观测屏的时间互换，使得已经形成的干涉条纹产生移动 **2δ** 。

迈克尔逊-莫雷实验

历史上最著名的失败实验！

实验结果是:未发现任何条纹移动。否定了以太的存在，证明光速不变性原理：光在任何惯性参考系中速度相同。
从而动摇了经典物理学基础，是狭义相对论的基本检验之一，成为近代物理学的一个开端。

路易斯·艾森 (Louis Essen) 和A·C·戈登-史密斯 (A.C.Gordon-Smith)

1950年，艾森空腔共振法测量光速。原理：微波通过空腔时，当频率为某一值时发生共振。根据空腔的长度可以求出共振腔的波长，在把共振腔的波长换算成光在真空中的波长，由波长和频率可计算出光速。

$$c = f\lambda$$
$$\approx 299792.5 \pm 3.0 \text{ km/s}$$

$$c=f\lambda$$

谐振腔法

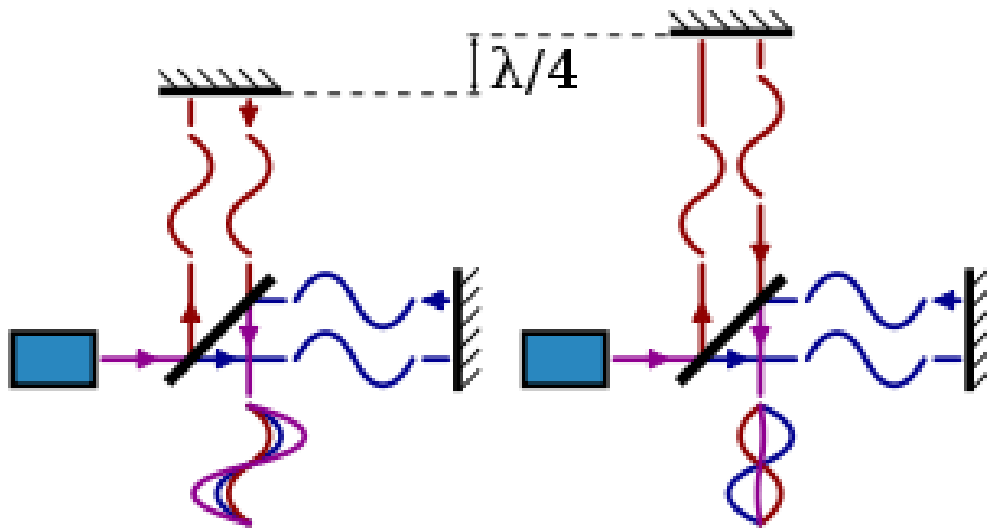
这种方法可以用家居微波炉和棉花糖或牛油等食物来示范。



$$c \equiv f\lambda$$

埃文森 ~1972 AD

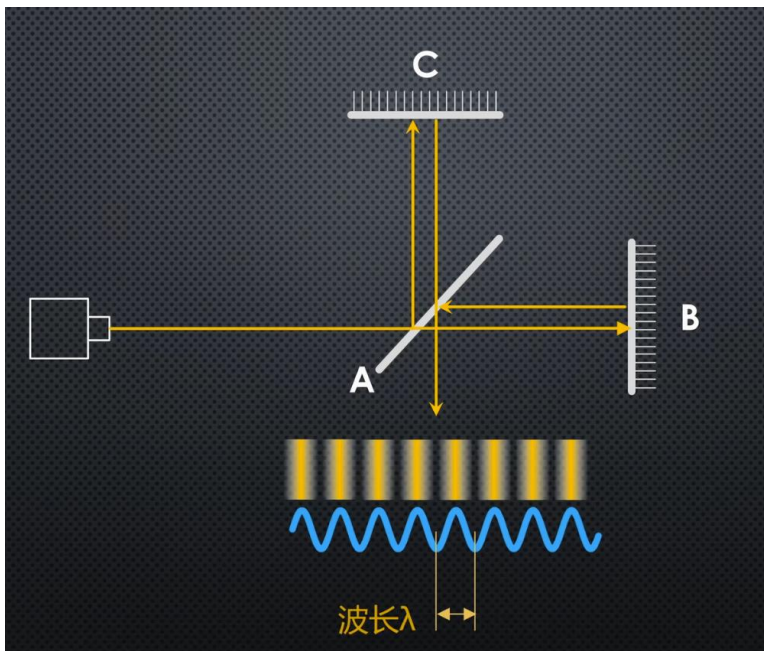
1972年，美国物理学家埃文森采用激光干涉法来测定光速。



K. M. Evenson

激光干涉法

测量已知频率的激光的波长



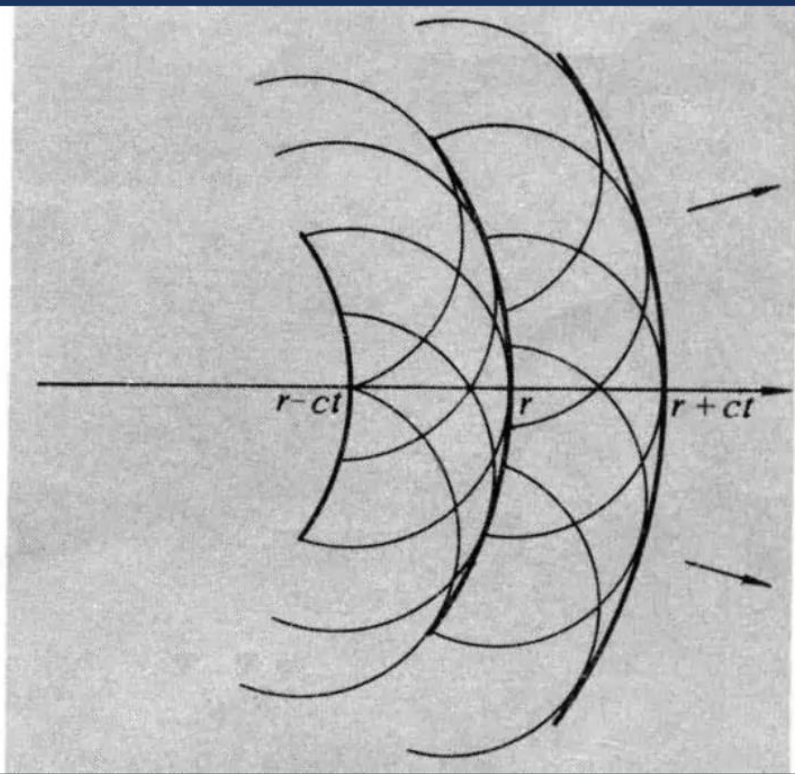
$$c = f\lambda$$
$$\approx 299792.4562 \pm 0.0011 \text{ km/s}$$

光速测量的意义

- 1、光速测量对光学发展的意义
- 2、光速测量对相对论建立的意义
- 3、光速在定义物理单位中的作用

光速测量对光学发展的意义

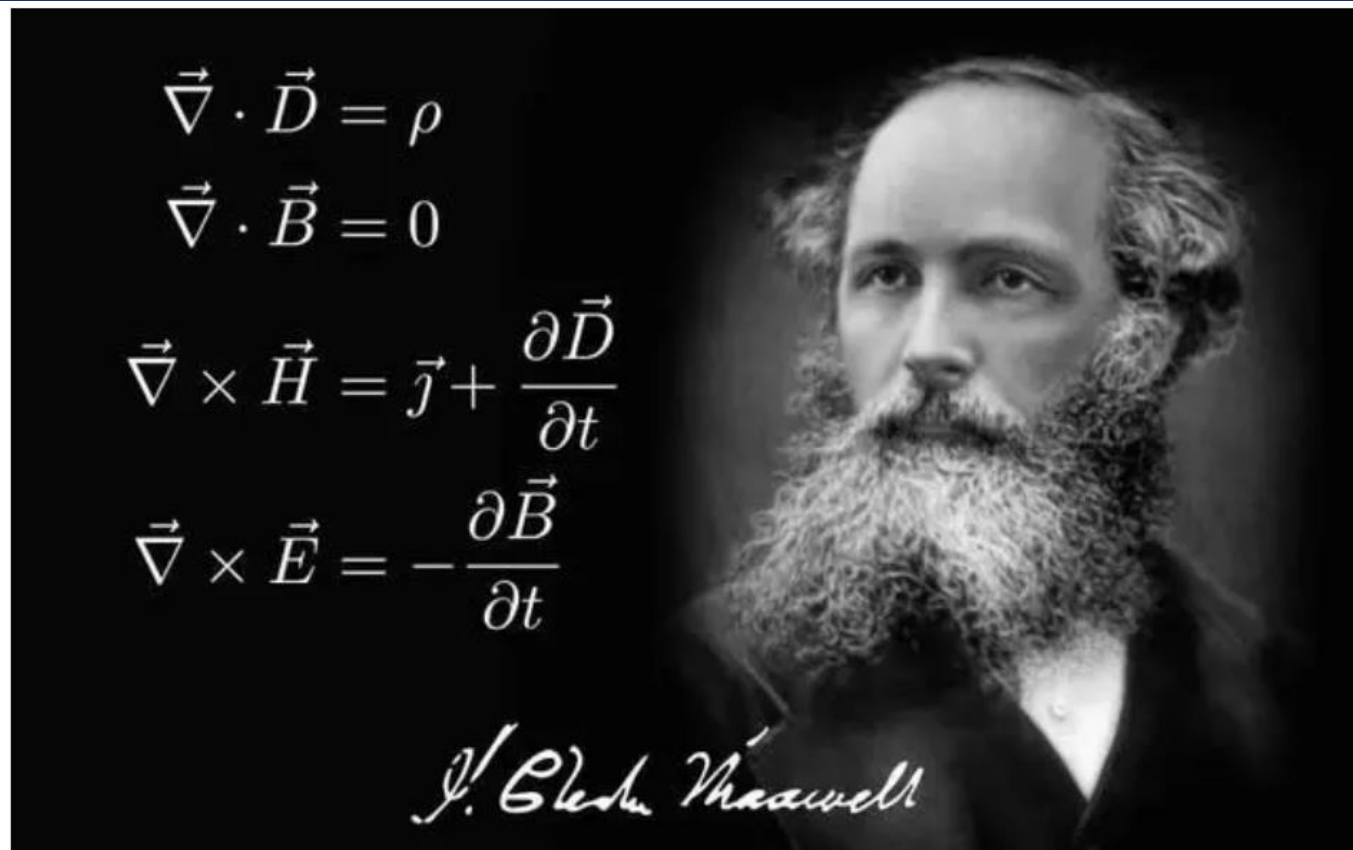
图3 惠更斯原理示意图



- 光速测量为光本性的争论提供了重要的判据。在光学的发展史中，对光本性的早期探索存在着两大学说的论争：一种是惠更斯提出的波动学说，另一种是笛卡儿和牛顿的微粒学说，在两种学说所提出的各自证据中，傅科对光速的测量——即测出光在水中的速度小于空气中的速度，则是对波动理论最有力和最直接的支持。

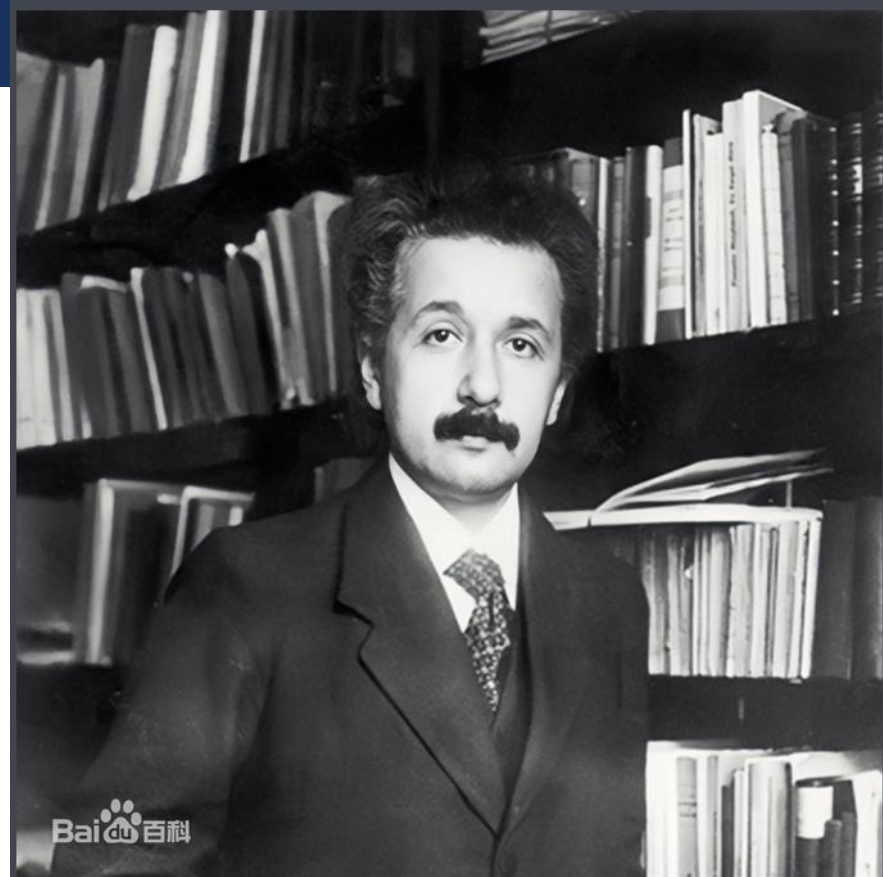
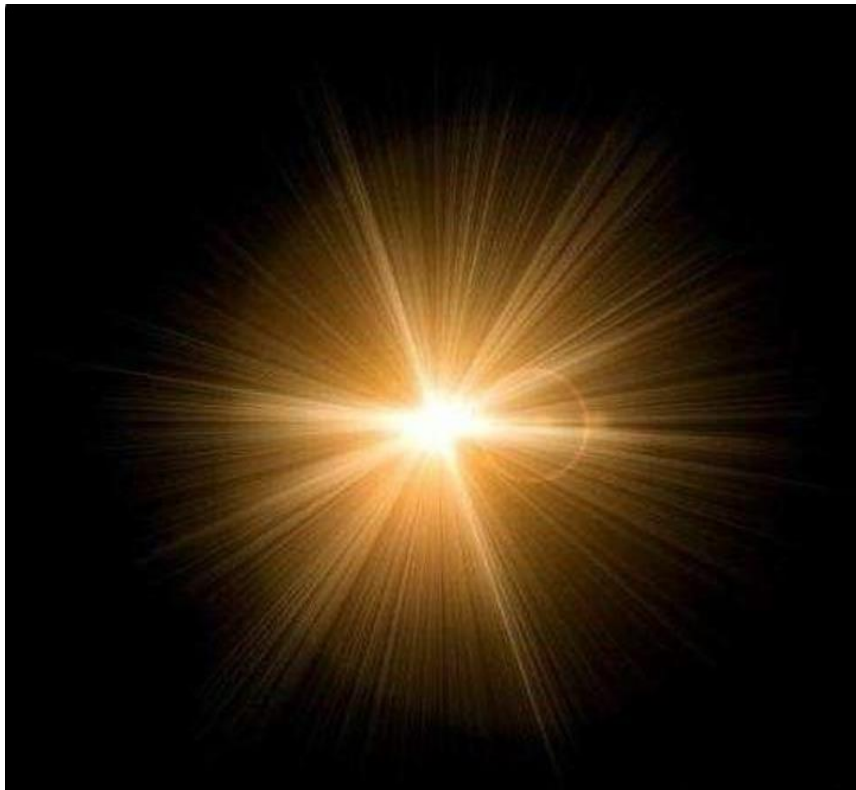


光速测量对光学发展的意义



- 光速测量对光的电磁理论的建立 also 具有重要意义。首先，关于光的本性，认识到光是电磁波，这一结论在开始恰恰是由对光速的测定而得到的。其次，在此基础上，它促进了麦克斯韦对电磁场的研究，并从理论上预言了电磁波的存在。最后，麦克斯韦推出波动方程组，从而真正建立了经典电磁理论体系。电磁理论的建立揭示了光、电、磁现象本质的统一性，完成了物理学的又一次大综合。

光速测量对相对论建立的意义



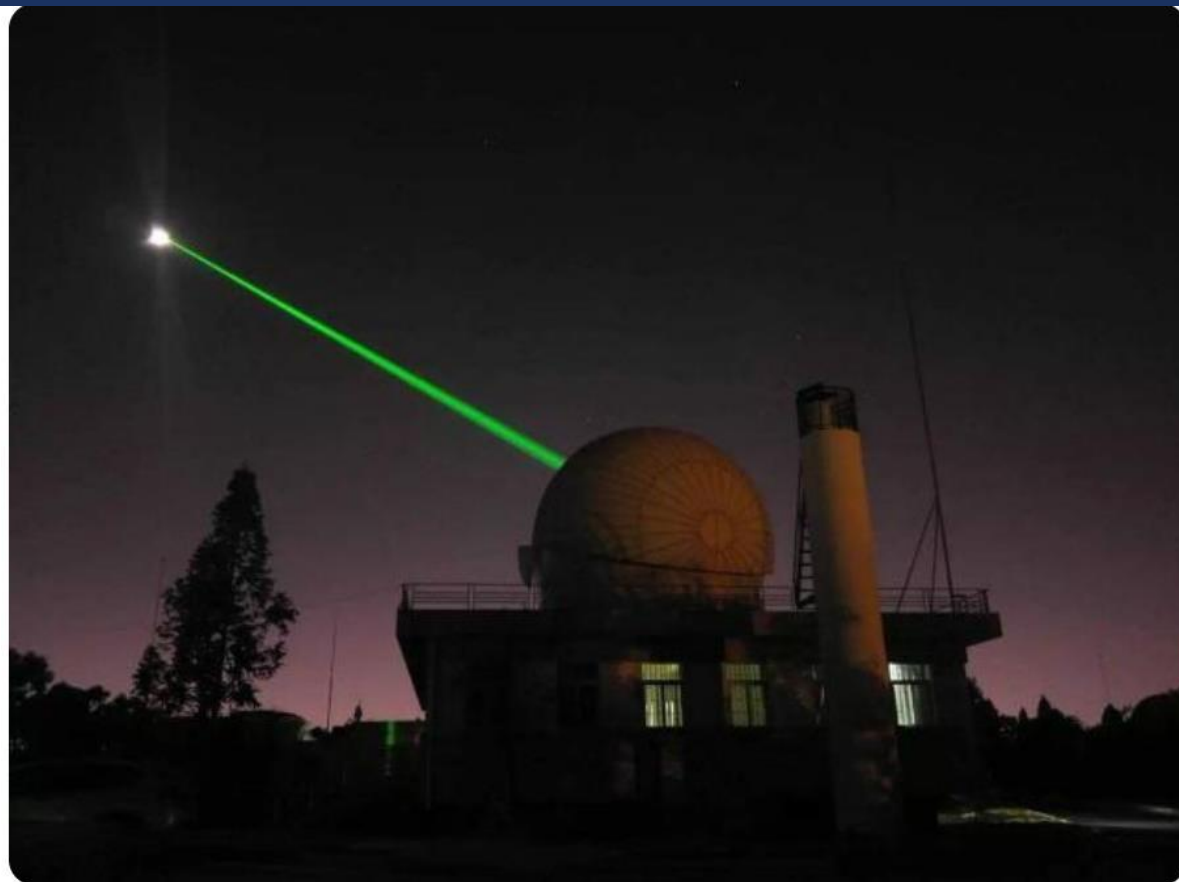
- 光速不变性原理，是爱因斯坦创立狭义相对论的基本出发点之一，它指出无论在何种惯性系中观察，光在真空中的传播速度都是一个常量，不随光源和观察者所在参考系的相对运动而改变。在理论上它虽是由联立求解麦克斯韦方程组得到的，并为迈克尔逊—莫雷实验所证实，但前期光速测量的长期探索，尤其是19世纪后的精确测定则为光速的不变性原理提供了丰富的实验积累。
- 除此之外，爱因斯坦著名的质能方程式 $E=mc^2$ ，深刻地揭示了物质与能量的关系.而光速同样是维系这种关系的关键所在。

光速在定义物理单位中的作用



- 光速的意义莫过于在物理单位“米”定义上的贡献了。**1983**年第十七届国际计量大会通过：**1米**是光在真空中 **$1/299\,792\,458$** 秒的时间间隔内所传播的路径长度，从而使得长度的单位实质上不再是独立的基本单位而是由时间或频率通过光速 **c** 来导出的单位。
- 重新定义米的意义在于：把真空光速值规定为 **$c=299\,792\,458\text{ m/s}$** 这个固定常量，真空光速值在物理学中不再作为一个可以测量的量，而是作为一个换算常量。并把他作为物理学中的一个基本常量规定下来。“米”新定义的采用提高了测量其他基本物理常量的精度。

光速的应用——测量距离



- 用雷达探测目标的距离，就是一个例子。如果雷达发出脉冲和收到回波的时间差是 t ，那么，目标的距离就是 $s=tc/2$ 。在实际使用雷达的时候，从来不管是固定在地面上的雷达，或是装在高速前进的舰艇上的雷达，都用同一个光速值来计算，其实这就是暗含地使用了光速不变原理。
- 除此之外，地球到月球的距离是这样测的。