

狭义相对论的验证

李学生 (Li Xuesheng)

山东大学副教授, 理论物理教师, 中国管理科学院学术委员会特约研究员, 北京相对论研究联谊会会员, 中国民主同盟盟员 (作者为中国科学院高能物理所研究员)

xiandaiwulixue@21cn.com, 1922538071@qq.com

Abstract: 一部科学发展史就是实验(实践)——理论——再实验——再理论——再实验(实践)的历史。北大的傅鹰老教授说,“实验是最高法庭”。重大自然科学理论的创建,都是由于旧理论不能解释新的实验(观察)事实,重新进行归纳,建立新模型而发展起来的。托勒密的地心说无法说明众多天文观察资料,为哥白尼扬弃,创建了地动说;牛顿力学由于不能解释微观世界诸多实验,推动了量子力学的建立。相对论“并不是起源于思辨;它的创立完全是要使物理理论尽可能适应于观测到的事实。”“同空间、时间和运动有关的观念,决不能认为是随意的,而只能认为是由观测到的事实所决定的。”【1】由于 Einstein 深信相对论在逻辑上的完整性,即相对论的逻辑前提的“自然性”和“简单性”,因而他在提出相对论时,就对自己的理论满怀信心。

[Li X. 狭义相对论的验证. *Academ Arena* 2017;9(16s): 149-162]. (ISSN 1553-992X). <http://www.sciencepub.net/academia>, 4. doi:[10.7537/marsaaj0916s1704](https://doi.org/10.7537/marsaaj0916s1704).

Keywords: 物理学; 力学; 因果; 分析; 数学; 方法

1、质速关系的验证

一部科学发展史就是实验(实践)——理论——再实验——再理论——再实验(实践)的历史。北大的傅鹰老教授说,“实验是最高法庭”。重大自然科学理论的创建,都是由于旧理论不能解释新的实验(观察)事实,重新进行归纳,建立新模型而发展起来的。托勒密的地心说无法说明众多天文观察资料,为哥白尼扬弃,创建了地动说;牛顿力学由于不能解释微观世界诸多实验,推动了量子力学的建立。相对论“并不是起源于思辨;它的创立完全是要使物理理论尽可能适应于观测到的事实。”“同空间、时间和运动有关的观念,决不能认为是随意的,而只能认为是由观测到的事实所决定的。”【1】由于 Einstein 深信相对论在逻辑上的完整性,即相对论的逻辑前提的“自然性”和“简单性”,因而他在提出相对论时,就对自己的理论满怀信心。

1881年,约瑟夫·汤姆孙在发展他自己的麦克斯韦理论的时候发现,让带电体运动比不带电体更困难。他同样注意到“运动中”物体的质量会增加一个常量,便在电场中表现为他们似乎在机械质量的基础上增加了一个“电磁质量”。换句话说,根据汤姆孙说法,电磁能和一特定质量相对应,这和电磁场的自感形式类似。汤姆孙的这一成果后来由斐兹杰惹和赫维赛德(1888年),以及乔治·弗雷德里克·查尔斯·塞尔(1896年,1897年)继续推进和完善。用今天的数学符号,他们给出的电磁质量可以用公式描述,其中是电磁质量,也是电磁能。赫维赛德和塞尔还发现物体质量的增长并非一个常量,而是与其速度相关。塞尔于是注意到物体的速度是不可能超过光速,因为在光速下物体的质量会变成无穷大,因此需要施以无穷大的能量才能使其超过光速。同样对于洛仑兹来说(1899年),整合汤姆孙所发现的质量与速度相关变得非常重要。前者注意到,质量不仅仅和速度有关,还和与之对应的方向有关。他提出了后来马克斯·亚伯拉罕所说的“纵向质量”与“横向质量”,其中的横向质量正是后来狭义相对论中的质量。1900年,威廉·维恩在汤姆孙、赫维赛德以及塞尔工作成果的基础上,假设“整个”质量都是来自于电磁力的。这是一种基于所有自然界的力都是源自于电磁力的假设(“电磁世界观”)。维恩指出,如果假设引力也是一种电磁效应,那么电磁能、惯性质量和引力质量之间必然存在某种比例关系,而庞加莱在1900年发表的论文则发现了另一种将质量和能量结合在一起的方式,他发现电磁能表现为一个质量密度的虚拟流体(即),并为此定义了一个虚拟的电磁动量。然而,此时他遇到了一个后来被爱因斯坦于1905年完整诠释的辐射悖论。

1902年至1904年,支持电磁世界观的马克斯·亚伯拉罕,通过推导电磁质量的表达式,迅速的给出了关于考夫曼实验结果的解释。根据这些概念,亚伯拉罕提出了“电磁动量”概念。和庞加莱1900年所提出的概念类似,亚伯拉罕认为这不是一个虚拟场,而是一个“真实的”物理实体。并且亚伯拉罕还注意到洛仑兹与1899年所发现的质量与方向有关的现象,并分别命名为“纵向质量”与“横向质量”。和洛仑兹不同的是,亚伯拉罕并没有将收缩假设整合到他的理论当中。因此后者所描述的质量和洛仑兹所说的质量是有差别的。基于前面

这些关于电磁质量的工作成果，弗里德里希·哈泽内尔提出物体的部分质量（他成为表面质量），可以看作是在一个腔体内跳动的辐射。这个“表面”质量和温度有关（因为高于环境温度的物体会发出辐射），并且和它的能量成正比。哈泽内尔指出，只有发出辐射的物体，也就是温度高于 0K 的物体能维持这种能量-表面质量的关系。最初他给出的表面质量公式为，但后来亚伯拉罕和哈泽内尔在 1905 年将计算结果修改成，也就是和静止物体的电磁质量相同的值。

用量热法验证质速关系的实验方法，是美国麻省理工学院的贝托齐在 1964 年提出【2】，并在麻省理工学院物理系的核科学实验室实施的。该实验用直线加速器加速电子，然后测量电子的运动速度，以及电子撞击到铝盘产生的热量，证明相对论的质速关系成立。贝托齐当年用理论值为 0.5MeV, 1.0MeV, 1.5MeV, 4.5MeV, 15MeV 的五种能量的电子，并测量了它们的速度，在实验报告中给出 1.5MeV 和 4.5MeV 两种电子能量的实际测量值，但没有给出 15MeV 电子能量的实际测量值。

爱因斯坦为了证明他的相对论，1908 年提出电磁介质的电磁感应实验方案。1913 年，威尔逊完成这个实验（张元仲著《狭义相对论实验基础》）。介质是石蜡做的空心圆柱体，在石蜡内放入许多小钢球。空心柱体内外两侧各有金属外壳形成柱体电容器。跟两金属板滑动接触的两个电刷，串联一个电流计静止在实验室中。使电容器绕对称轴旋转，外加磁场 \vec{H} 的方向与转轴平行。当使外加磁场方向相反时，电流计上出现电流。

在斯坦福德（Stanford）直线加速器中心（SLAC）的电子直线加速器中，电子沿一根三公里长的真空管飞行，被电磁场反复加速。每加速一次，电子的速度都增加一点，但随着电子速率越来越接近光速，所增加的速率越来越少，加速越来越困难。这直接验证了相对论的速度叠加法则。这个加速器可把电子加速到 20GeV。当把电子加速到 10GeV 时，电子速度达到 $(1-0.13 \times 10^{-8})c$ ，即只比光速小 0.39m/s。增加到 20GeV 时，电子的运动速度达到比光速小 0.10m/s。在以此速度随电子运动的参考系中，三公里长的加速器缩短到只有七八厘米”【3】。

最近欧洲建成的大型强子加速器，质子的能量已经达到 Mc^2 ，（M 代表质子的质量）的 4000 倍。如果用牛顿力学的能量公式 $Mv^2/2$ ，那末质子的速度 v 应当接近于光速 c 的 90 倍。可是测量到的 v 仍小于但非常接近于光速，与相对论符合。这个加速器以及已建成的许多高能粒子加速器都是按相对论的公式设计而制造。

由于电子的质量与其电荷相比，比值非常小。所以它很容易被加速到很高的速率。例如在真空管的两个电极之间加 100v 的电压，从阴极飞出的电子（设从静止出发），将以 6×10^6 米/秒的速率到达阳极：

$$qU = \frac{1}{2}mv^2, \therefore v = \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 100 \times 1.6 \times 10^{-19}}{9.1 \times 10^{-31}}} = 5.92 \times 10^6 \text{ 米/秒}$$

在这种情况下，牛顿定律成立。我们可以把速率的平方表为与电压的正比关系： $v^2 = \frac{2qU}{m} \propto U$ ，其图像如图 1 所示：

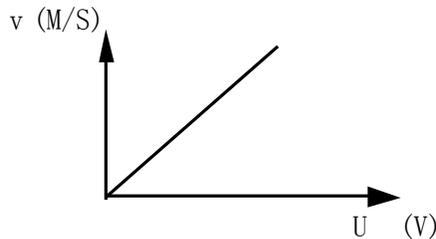


图 1

但把电子放在加速电压为几百万伏的情况下，用上述方法对电子速率的平方的计算结果，却与实验测量值产生了很大的偏差。实验采用范德格喇夫起电机使电子获得 1.5 兆电子伏特的能量，然后注入直线加速器，最终获得 15 兆电子伏特的能量，通过测量电子的飞行时间和路程可以计算出电子的速度。实验数据如

下表所示:

动能 (Mev)	飞行时间(10^{-8} s)	电子速率(10^8 m/s)	电子速率平方 [10^{16} (m/s) 2]
0.5	3.23	2.60	6.8
1.0	3.08	2.73	7.5
1.5	2.92	2.88	8.3
4.5	2.84	2.96	8.8
15	2.80	≈ 3	≈ 9

绘制成速率平方与电压的图像如图 2 所示为:

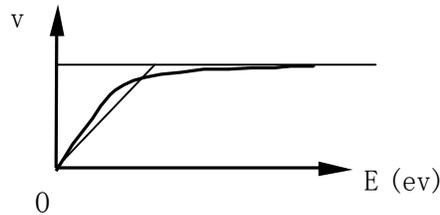


图 2

实验结果表明:

① 被加速电子的速率有个上限, $\sim 3 \times 10^8$ 米/秒.

$$\frac{2qU}{m}$$

② 电子的动能 $E_k=qU$ 是真实的, 但 v^2 达不到预期值, $v^2 = \frac{2qU}{m}$, 把此式变化一下可表为 $mv^2 = 2qU$. 只能是 m 的值在一定的范围内随速率的增大而增大. 这显然和牛顿力学的理论相违背.

参考文献:

【1】《关于相对论》, 1921 年.

【2】Willian Bertozzi, American Journal of Physics, Vol. 32, Issue 7, pp. 551-555, July 1964.

【3】王正行著, 《近代物理学》[M], 北京大学出版社,1995:p.30—31.

2、运动物体在运动方向上的收缩效应

1905 年, 德国实验物理学家考夫曼(W. Kaufmann)完成了关于高速电子(β 射线)的质量与速度相依关系的实验, 他于 1906 年宣布, 他的实验数据支持亚伯拉罕(M. Abraham)和布赫尔(A. H. Bucherer)的刚性球电子论, 而同洛伦兹和 Einstein 的基本结论(电子在运动方向的直径会随速度的增加而收缩)不相容. 当时, 早在 1902 年就明确提出了相对性原理的彭加勒马上动摇起来, 认为该原理并不具有我们先前赋予它的那样重要的价值(他在 1904 年把相对性原理作为物理学的六大基本原理之一). 洛伦兹更是十分悲观失望, 他在 1906 年 3 月 8 日给彭加勒的信中说: “不幸, 我的电子扁缩的假设同考夫曼的新结果发生了矛盾, 于是我必须放弃它. 因此, 我已到了山穷水尽的地步. 在我看来, 不可能建立起一种要求平移对电学和光学现象完全不产生影响的理论.”

面对考夫曼的实验否定, Einstein 并不以为然. 他在 1907 年发表的长篇论文中表示, 考夫曼的实验数据同相对论的“这种系统的偏离, 究竟是由于没有考虑到的误差, 还是由于相对论的基础不符合事实, 这个问题只有在有了多方面的观测资料以后, 才能够可靠地解决.”他进一步指出, 亚伯拉罕和布赫尔的理论“在很大程度上是由于偶然碰巧与实验结果相符, 因为他们关于运动电子质量的基本假设不是从总结了大量现象的理论体系得出来的.”事实果然不出 Einstein 的预料, 1916 年, 两位法国物理学家指出考夫曼的实验装置是有毛病的.

最新理论中认为时间是一种高频振动, 振动与物体的自身速度是有关的, 也就是说在光速不变的前提下会得到运动使得时间变慢的结论, 此时的相对速度实际上是相对于物体所在的空的速度.

3、光行差效应的解释

(1) 光行差效应提出

1725年,英国天文学家布莱德雷发现了恒星的"光行差"现象,以意外的方式证实了罗麦的理论.刚开始时,他无法解释这一现象,直到1728年,他在坐船时受到风向与船航向的相对关系的启发,认识到光的传播速度与地球公转共同引起了"光行差"的现象.他用地球公转的速度与光速的比例估算出了太阳光到达地球需要8分13秒.这个数值较罗麦法测定的要精确一些.莱德雷测定值证明了罗麦有关光速有限性的说法.光速的测定,成了十七世纪以来所展开的关于光的本性的争论的重要依据.但是,由于受当时实验环境的局限,科学家们只能以天文方法测定光在真空中的传播速度,还不能解决光受传播介质影响的问题,所以关于这一问题的争论始终悬而未决.

在地球上用望远镜观测遥远的任意一颗恒星,发现在地球轨道的不同位置上,我们用以观察的望远镜方向在一年内有周期性的变化.

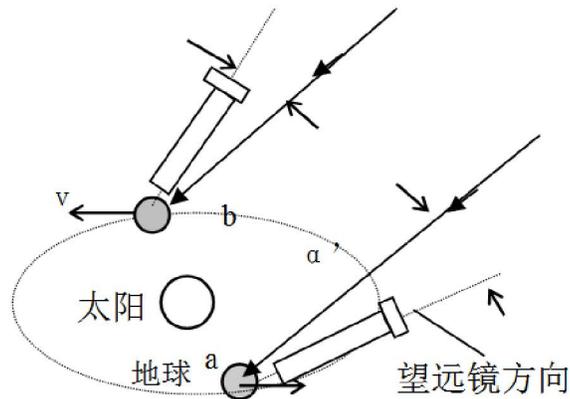


图 1

假如星光射来的方向固定,如图1所示,则当地球在位置a时,望远镜需朝下偏一个角度 α' ;当地球在位置b时,望远镜需朝上偏一个角度 α .如果a、b位置使星光与望远镜方向组成的平面都与地球轨道平面垂直,则 $\alpha=\alpha'$.在一般位置上, α 角的大小要变化.这在观测上表现为一颗恒星一年内在天球上画出一个很小的椭圆形轨迹,这就是光行差现象.

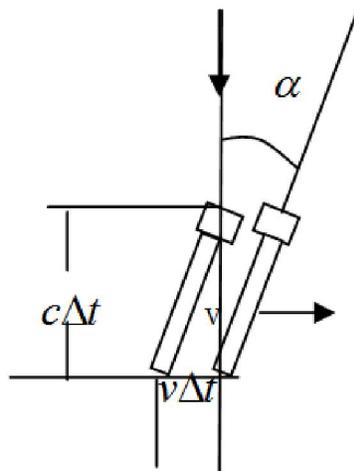


图 2

如图2所示,设恒星发出的光以速度 c 垂直与地球的轨道平面,则望远镜必须倾斜一个 α 角,以保证

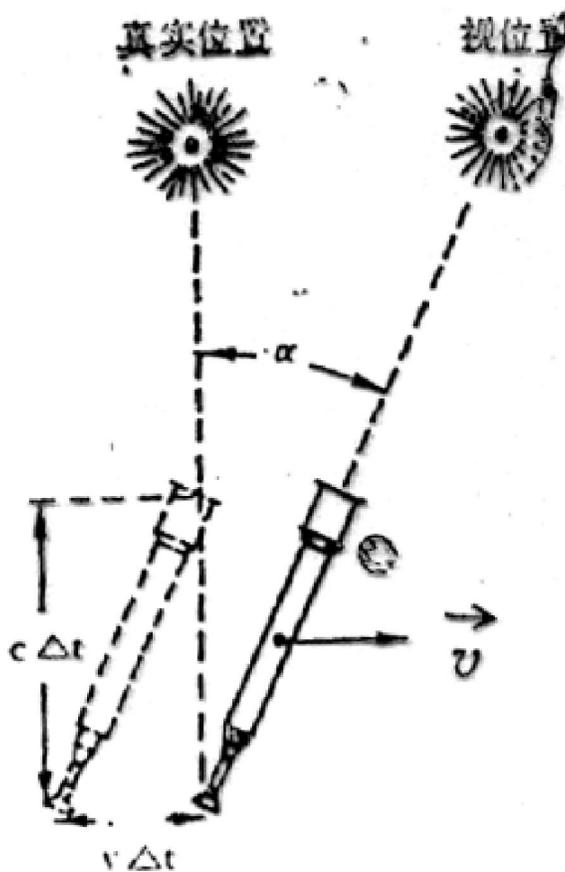
进入望远镜筒口的光经过 Δt 时间后到达筒底，被我们的眼睛看到，而不至于被筒壁挡掉。从图上可以看出：

$tg\alpha = \frac{v\Delta t}{c\Delta t} = \frac{v}{c}$ ，在实际观测中，这个最大的 α 角约等于 10^{-4} 弧度，刚好等于地球绕太阳的轨道运动速度除以光速。

2、实验结果

科学家们认为“以太”和绝对空间参考系是对应的，光相对“以太”的速度是恒定的 c 。所以人们不得不接受这样的图画：太阳系就是对应于以太静止的参考系，地球在这个以太海洋中以 30 公里/秒的速度运动，完全没有带动以太。

光行差现象首先由 J. Bradley 于 1727 年报道的。



如图：[布喇德雷光行差现象](1728)

- a) 地球相对与该恒星静止。
- b) 地球相对与该恒星与恒速率运动。

$$\alpha: \text{光行差角} \quad tg\alpha = \frac{v}{c} \Rightarrow \alpha = 20.5''$$

c) 太阳相对于以太是静止的

布喇德雷对天龙座 γ 星进行了一年的观测得到的结论是：以太相对于恒星静止。或者说：以太完全不被地球所拖拽。

迈克尔逊—莫雷实验各次结果

观测者	年份	l	δ 计算	δ 观测 (上限)	比值
迈克尔逊	1881	1. 2	0. 04	0. 02	2
迈克尔逊—莫雷	1887	11. 0	0. 4	0. 01	40
莫雷—米勒	1902—1904	32. 2	1. 13	0. 015	80
米勒	1921	32. 2	1. 12	0. 08	15
米勒	1924	32. 2	1. 12	0. 03	40
米勒 (太阳光)	1924	32. 2	1. 12	0. 014	80
托马歇克 (恒星光)	1924	8. 6	0. 3	0. 02	15
米勒	1925—1926	32	1. 12	0. 08	15
肯尼迪	1926	2. 0	0. 07	0. 002	35
伊林沃斯	1927	2. 0	0. 07	0. 0004	175
皮卡尔、斯塔埃尔	1927	2. 8	0. 13	0. 006	20
迈克尔逊等人	1929	25. 9	0. 9	0. 01	90
约斯	1930	21. 0	0. 75	0. 002	375
塞达罗姆、汤斯	1958				4500

摘自 Rev. Mod. phys. 27167(1995)

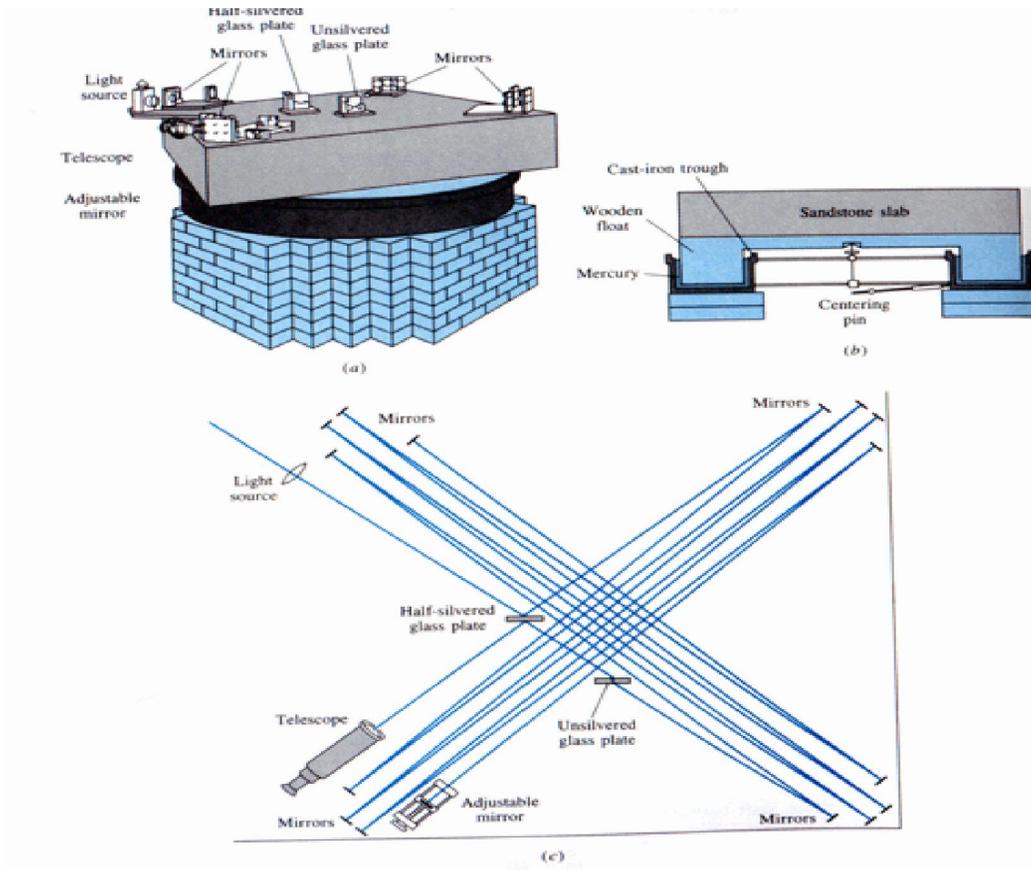
也可用 $\beta = (c_m/c_e)^2 - 1$ 来检验, c_m 允许物质的极限速度。

1887. michelson - morley. $|\beta| < 10^{-4}$ c_e 电磁波速度 c_e

1930

1980 华盛顿大学

1980 通过研究水银同位素的能级的各向同性 $\Rightarrow \beta < 10^{-21}$



3、Einstein 对于光行差现象的解释

Einstein 在《相对论的意义》中写道：“没有别的理论曾经满意地解释光行差的事实”。这就是说，光行差的解释，是带有检验性质的。[英]W. G. V. 罗瑟在《相对论导论》中，用洛伦兹变换 $(1-v^2/c^2)^{1/2}$ 得

出光行差：
$$\Delta\alpha_1 = -\frac{v}{c} \sin \alpha$$
 六个月后，
$$\Delta\alpha_1 = \frac{v}{c} \sin \alpha$$
 本文采用类似罗瑟方法将 $(1+v^2/c^2)^{1/2}$ 处理得到

光行差：
$$\Delta\alpha_2 = -\frac{v}{c} \sin \alpha$$
 -----(5), 六个月后
$$\Delta\alpha_2 = \frac{v}{c} \sin \alpha$$
 -----(6), 当恒星处在头顶上时, $\alpha = 90^\circ$,

$\Delta\alpha = 10^{-4}$ 弧度 = 20.5 弧秒，这与天体测量数据相符合。1958 年，有人改进了迈克耳孙-莫雷实验，得到了“以太风”小于地球轨道速度的 1 / 1000 的结论。后来利用穆斯堡尔效应，测得“以太风”的速度为 1.6±2.8 米/秒，远远小于期望值(30 公里 / 秒)。这既是对狭义相对论的验证，也证明根本不存在 19 世纪的作为电磁场载体的以太。

4、运动物体的时钟延缓效应

从宇宙线的探测到高能加速器以及对撞机的应用，几乎高能物理实验的各个方面都要涉及狭义相对论效应，可是随着加速能量的不断提高，现在已经确认在小到约为一个质子半径百分之一的距离内，没有观测到狭义相对论的破坏。有人进行了静止光子质量的实验及光速测定的实验，还有人进行了大量有关运动介质的电动力学实验和直接检验尺缩钟慢的相对论效应实验，甚至有人用高速喷气飞机上的原子钟验证运动时钟变慢的效应。所有这些实验都表明，无论在微观尺度还是在宏观尺度，还没有发现狭义相对论有破坏的迹象。

“我们并不知道 μ 子为何会衰变，或者它的内部机理是什么，不过我们确实知道它的行为符合相对性原理。”【1】1938 年，Ives 和 Stilwell 率先测量了氢原子精细光谱，证明了运动会导致时间变慢。

1955 年 chamberlam 等人测量了动量为 1.19Gev/c 的 π 介子和反质子走过 40 英尺的距离所用的时间，测得 π 介子的飞行时间是 (38×10^{-9}) 秒，反质子的飞行时间是 (51×10^{-9}) 秒，如果用狭义相对论的动量公式 = 1.19Gev/c，算出速度 v ，那么相应的飞行时间(40 英尺/ v)与实验测量的相符合。

参考文献：

【1】《费曼讲物理——相对论》，湖南科技出版社，2004 年，63 页。

附录 1：科学家称 Einstein 相对论百年后终获确证 2007-11-12 08: 53: 30 中国新闻网媒体称，Einstein 的相对论获得实证。

中新网 11 月 12 日电 香港《文汇报》报道，伟大科学家 Einstein 早于上世纪发表的“时间相对论”，一班国际科学家要 100 多年后的昨天才终于确证。据悉，1905 年，Einstein 订立著名的时间相对论，指一件对象相对于另一对象移动的速度，会使时间加快或减慢。根据这个假设，一个移动中的时钟秒针应比一个静止平放的时钟秒针跳动得快，这现象称为“时间稀释”。报道称，国际科学家昨天发表报告指出，他们利用分子加速器把原子打成两条光束，绕圈而行，模拟理论中较快的时钟，然后用高精密度的激光光谱测量时间，发现光束相较外界的确慢了一些。实验与 Einstein 的理论“完全吻合”。

5、相对论性多普勒公式的验证

美国大学物理教科书编者 R. Resnick 先生给出的如下评述：在经典力学中，运动影响测量也不是一个奇怪的概念。例如，由测量得到的声音或者光波的频率与声源或者光源相对于观测者的相对运动有关。这一现象称为 Doppler 效应，他是每一个人都熟悉的现象（比如汽车从身边驶过那个机声声调的变化）。

Einstein 在 1905 年建立狭义相对论的《论动体的电动力学》【1】一文中，得出了光学多普勒效应的频率变换式。当光源靠近观察者，频率变快为兰移；当光源远离观察者，频率变慢为红移；当光源作横向运动时，频率也变快为兰移： $M/M'=\gamma$ 。国外一些专著【2】，得出一致的结果。

Einstein 在 1952 年《狭义与广义相对论浅说》【3】一书中讲解动钟变慢时，给出了运动钟的时率变慢公式： $M/M'=1/\gamma$ 。与光源作横向运动时频率变快相比，此二者都是讲频率变化，从公式表达上看似乎有矛盾。但从后面的分析看，二者都可从光波的洛伦兹变换求得，二者都是正确的。国内一些专著，例如刘辽，费保俊，张允中编著的《狭义相对论》文献【4】。在讨论光学多普勒效应频率变换时，与 Einstein [1]给出的公式相比，当光源作横向运动时，得出了不同的结果：文献[1]为兰移 $M/M'=\gamma$ ，文献【4】为红移 $M/M'=1/\gamma$ 。这是因为文献[4]的频率变化公式中用 θ 角作变量，而文献【1】是用 θ' 角作变量。不能由此判断何对何错，二者均为正确的，并且反映出不同的物理意义。

学界大多数人都承认, 1994 年 R. Grieser 等人所做的实验 (Grieser et al, 1994), 证明“相对论性多普勒公式是正确的”【5】. 该实验使用电子在锂离子中有 3 个能级的特点, 采用频率可调的激光束轰击静止的锂离子, 使得不太稳定的第 3 能级上的电子数目增多; 最终在第 3 能级上的电子自动跃迁回第 2 能级时将发出荧光. 由于这种荧光的光谱线频率是已知的, 实验在测出锂离子以 0.064c 的速度运动时所发出荧光的频率, 两相比较即可以得出最后的结论.

时钟变慢直接导致相对论性的多普勒频移. 当光源同观察者之间有相对运动时, 观察者测到的光波频率将同光源静止时的光频有差别, 这种差别称为多普勒频移. 经典理论也预言了多普勒频移, 但狭义相对论的预言同经典理论的预言不同. 这两种预言之间的差别是由运动时钟的速率不同于静止时钟的速率造成的, 也就是时钟变慢效应造成的. 一个特例是横向情况, 即观察者运动的方向同光线垂直. 按照经典理论, 没有频移; 按狭义相对论, 则有频移, 称为横向多普勒频移, 它已为许多实验所证实.

参考文献:

【1】爱因斯坦, 《论动体的电动力学》, 1905 年, 《爱因斯坦文集》, 第二卷, 商务印书馆, 1977 年 3 月, 103 页.

【2】G. Stephenson, C. W. Kilmister, <SPECIAL RELATIVITY FOR PHYSICISTS>§21, Longmans, Green and Co. 1960.

【3】爱因斯坦, 《狭义与广义相对论浅说》, 上海科学技术出版社 1964 年 8 月, 31 页.

【4】刘辽等, 《狭义相对论》(第二版), 科学出版社, 2008 年

【5】马青平著相对论逻辑自治性探疑上海科学技术文献出版社 2004 年

6、相对性原理的检验——特鲁顿—诺伯尔实验

朗道在他的《场论》写到: “所有自然规律在所有惯性系中都一样, 换句话说, 表达自然规律的方程式对于从一个惯性系到另一惯性系的左边、时间变换是不变的. 这就是说, 描述自然界某个定律的方程式, 若用不同惯性参照系的坐标和时间来表述, 具有一样的形式.”

特鲁顿—诺伯尔实验最初是用来测定地球的绝对速度的, 实验以失败告终. 如图, 一根绝缘杆两头各有一个金属球 A 或 B , 球 A 和球 B 大小相同且带等量异种电荷 q 和 $-q$, 二球相距为 r . 绝缘杆用悬丝悬挂. 设电荷随地球运动, 绝对速度为 v , v 的方向与杆的方向成 θ 角. 两个运动电荷除去相互的库仑力之外, 还有磁场力的作用.

设从 A 球到 B 球为 r 的正方向. A 球上电荷在 B 球处产生的电场强度为 E_B , 磁感应强度为 B_B , B

$$\begin{aligned} \text{球受到 } A \text{ 球的作用力 } F_B \text{ . 则 } E_B &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} r, & B_B &= \frac{\mu_0 q}{4\pi r^3} (v \times r), \text{ 则} \\ F_B &= -qE_B - qv \times B_B = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^3} r - \frac{\mu_0 q^2}{4\pi r^3} v \times (v \times r) \\ &= -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^3} r - \frac{\mu_0 q^2}{4\pi r^3} [(v \cdot r)v - v^2 r] \end{aligned} \quad (1)$$

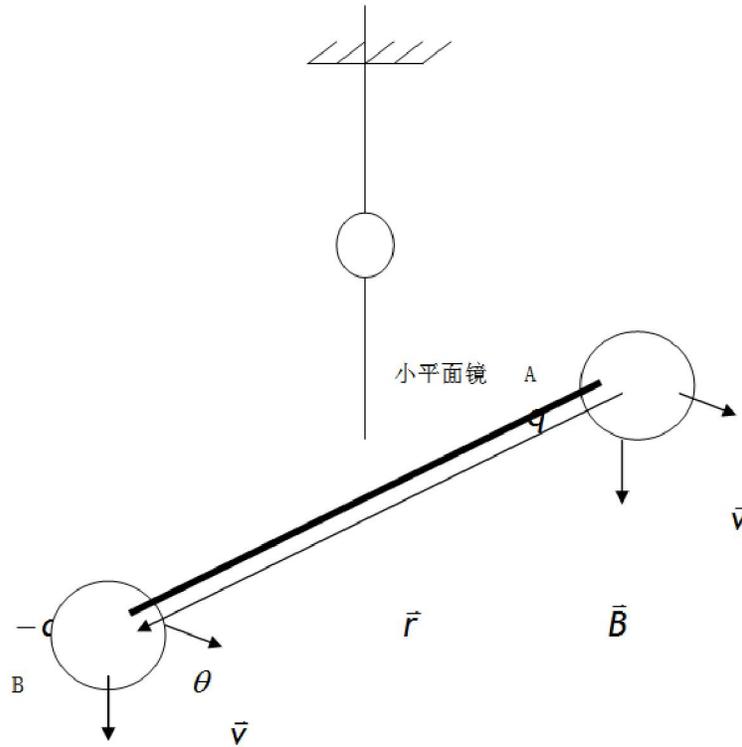
同理, 可求得 A 球受到 B 球的作用力 F_A , $E_A = \frac{-q}{4\pi\epsilon_0 r^3} (-r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} r$,

$$\begin{aligned} B_A &= \frac{\mu_0 (-q)}{4\pi r^3} [v \times (-r)] = \frac{\mu_0 q}{4\pi r^3} (v \times r), \\ F_A &= qE_A + qv \times B_A = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^3} r + \frac{\mu_0 q^2}{4\pi r^3} v \times (v \times r) \\ &= \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^3} r + \frac{\mu_0 q^2}{4\pi r^3} [(v \cdot r)v - v^2 r] \end{aligned} \quad (2)$$

由于在 (1)、(2) 式的中括号内有 $-v(v \cdot r), v(v \cdot r)$ 项, 因此, 力 F_{-q}, F_{+q} 对悬线有力矩, 力矩大小

$$\text{为: } M = r \times F_B = \frac{\mu_0 q^2}{8\pi r^3} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{r})(\mathbf{r} \times \mathbf{v}),$$

$M = \frac{\mu_0 q^2}{8\pi r} v^2 \sin 2\theta$, 当 $\mathbf{v} \neq 0, \sin 2\theta \neq 0$ 时, 杆应转动. 但实验结果是无论杆的起如位置如何, 杆都没有发生转动. 实验者得出即使用电磁学实验也无法测得地球的绝对速度, 说明电磁运动也遵守相对性原理.



特鲁顿—诺伯尔实验

7、真空光速不变性原理的验证

Faraday 1852: 假如我们承认了光媒介以太的存在, 那么这种媒介也可能是磁作用力的平台, 因为以太在传播辐射之外应别有用途. Maxwell 1865: 光是一种电磁波, 它在真空中以常数速度 $c=1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$. Lorentz 1895: 存在不被运动物体拖曳的静止以太, 光在其中以常数速度 c 传播. Poincare 1898: “他(即测光速者)以假定光速为常数开始, 特别地, 假定它的速度是各向相同的. 这是这样的一个假设, 即离开了它测量光速的尝试便无法进行. 这一假设逻辑上永远也无法由实验直接验证, 但是它却可以被实验证否——前提是不同的实验导致了不一致的结果. 我们应该庆幸这种矛盾尚未发生, 而那些轻微的不一致即便出现了, 也可以得到轻松的解释. Abraham 1904: “电磁理论解决了光的绝对运动问题, 它表明, 光将沿着各个方向以相同的速度 c 向前传播.”

1905 年, 爱因斯坦发表相对论强调, “谈论绝对空间是没有意义的, 地球自转引起力学上的差别是微小的, 按照麦克斯韦电动力学, 当磁铁运动时在空间产生了感应电场, 于是线圈中有了电流; 而当线圈运动时在空间没有产生感应电场, 可是线圈中照样有电流, 可见空间本不该对称(号称相对性原理); James 实验表明相对于以太的运动可测, 而 Michelson-Morley 实验表明相对于以太的运动不可测, 我们可以假设光速不变(号称光速不变原理)”.

根据相对论, 任何物质的运动速度都不可能超过 c , 即光在真空中的速度. 但是, 这一理论并没有阻止物理学家在近 20 年的时间里去有关超光速光脉冲的实验, 尽管光的极端再成形或吸收等复杂问题常常使得对这些实验的解释显得模棱两可. 现在, 这一在原子铯蒸气室中演示的超光速光传播实验看起来就要比以前

的实验明确多了：在入射激光脉冲的波峰进入蒸气室的入口面之前，一束激光脉冲的波峰离开了该蒸气室的出口面。结果先于原因应当是不可能的，这里的解释也许应当是，实际上并没有出现超过光速的信号，而是该原子体系的电磁响应给人产生了这样一种印象。

科学家研究表明信息传输速率不可能超过光速：美国东部时间 2005 年 10 月 15 日(北京时间 10 月 16 日)消息，10 月 16 日，美国杜克大学丹尼尔-高希尔等人将在《自然》发表研究文章。他们进行了设计最完美的实验，希望用比光速更快的速度传输信息，结果失败了，从而也提示 Einstein 的速度极限理论无懈可击。在过去的几年里，科学家采用量子作用、特制镜片、和充满钾蒸汽的腔室进行“超光速”实验，结果表明，比光速更快的观念并不合适宜。

[美]D. 哈里德 R. 瑞斯尼克著的《物理学》第二卷第二册中，引录了从 1675 年法国天文学家罗麦开始，到 1956 年瑞典的艾奇止，281 年中光速测定的结果，其值为 $C = 2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。中国计量科学院赵克功和倪育才，在《物理》1979 年 4 期上，发表的《光速测定现状》更具有代表性。世界各国用先进激光测量仪，测得的光速值均在 299792460 m/s 左右，光速为一恒定值。关于光速与光源状态无关的论证，张元仲在《狭义相对论实验基础》中，引录了从 1913 年到 1966 年间，世界各国科学家实验结果表明，光的传播速度的确与光源的状态无关。英国《卫报》2005 年 4 月 11 日消息，Einstein 发表他的狭义相对论一个世纪了，11 日，天文学家们聚集在英国华威大学举行 2005 物理学会议，在纪念这一科学巨匠的同时，科学家们也提出一个惊人论点：Einstein 的狭义相对论建立的基础，Einstein 的众多理论中不变的准绳——光速可能正在变慢，因此 Einstein 狭义相对论可能不成立了。剑桥大学天文学院的迈克尔·墨菲教授说：“我们将在这里宣布一些惊人的发现。这些发现暗示出宇宙间存在一种关于光和物质相互作用的更基本的理论，而狭义相对论作为它的基础实际上是错误的。”Einstein 认为光的速度是恒定不变的，而这一前提支撑了他的许多伟大的理论包括狭义相对论，同时也是现代物理学的根基，但是墨菲却认为光的速度不是恒定不变的，他说：“事实证明，狭义相对论可能非常接近真理，但是它错过了一些东西，而这些东西可能就是通向一个全新的宇宙和一套新的基本原理的门把手。”在研究过程中，墨菲的科研小组并没有直接测定出光速的改变，而是分析了来自遥远恒星的光。这些光到达地球需要经过数十亿年的时间，因此科学家们可以观测到光传播的早期，宇宙的基本原理是怎样起作用的。天文学家们通过夏威夷的凯克望远镜观测发现在光传播到地球的过程中，某一波段的光被吸收的情况发生了改变。如果精细结构恒量随着时间发生变化，那么光速也可能发生了变化，也就是说，Einstein 可能错了。目前，墨菲领导的科研小组仍在分析来自 143 颗恒星的光的观测结果。不过，也有许多天文学家对墨菲的这种理论提出了质疑，因为他们使用其他望远镜观测到的结论是光的传播速度并没有发生改变。

人们曾经猜想，是否存在违背 Einstein 相对论的超光速，并且可以采用这些超光速技术，以比光速更快的速度传输信息。最为著名的超光速实验，鉴用了含有著名“异常色散”原理的气体腔室。当将一束重叠光波所组成的脉冲，照射穿过该腔室时，腔室内的气体使光波漂移，从而使得光脉冲的速度看起来比光速还快。高希尔等在所进行的实验中，就是采用了这种超光速实验腔室，其腔室充满的是钾蒸汽。结果初看起来，好像是光脉冲的传播时间比光速快了大约 270 亿分之一秒。但是，当高希尔等通过改变光脉冲振幅，从而加载 1 或 0 的数据信息，以快于光速的速度传输信息时，则加载信息所修饰的光脉冲，通过钾蒸汽腔室的传播速度比光速要慢。而且，即使光脉冲本身以比光速更快的速度通过腔室时，结果也是如此。高希尔认为，即使能接收到更快的光子，也得不到那些光子中所包含的信息，其结论与相对论是一致的。多伦多大学物理学家阿普拉尔姆-斯坦贝格认为该实验是美妙的。但是，尽管主流科学家相信不可能用超光速信号来传输信息，但任何实验都可能有微小的误差，从而造成允许超光速传输信息的可能性结果。尽管本实验并不见得能使固执己见者完全信服，但高希尔等确实做了一个可以想像得到的最好实验。吕锦华先生认为：所谓看到的比传输光更快的光脉冲，并非是“被加速”的传输光的光脉冲，而是钾蒸汽在度作用下发的光脉冲，所以，它超前于传输光的光脉冲，但它不包含传输信息。包含传输信息的光脉冲实际上并没被加速，仍按相光速传播。因而，信息传输没有能“超光速”。

8、光速与光源速度无关的验证

(一)、双星现象：

在离我们地球遥远的星际空间里，存在着一种被称为双星的天体系统，它由两个恒星 A 和 B 组成，相互绕着它们的质心 O 转动，对其中每一颗星来说，都在做近似圆周运动，如图 1-1 所示。

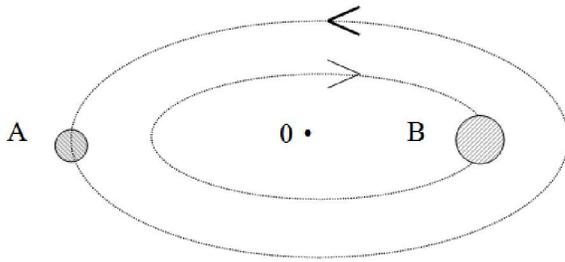


图 1-1

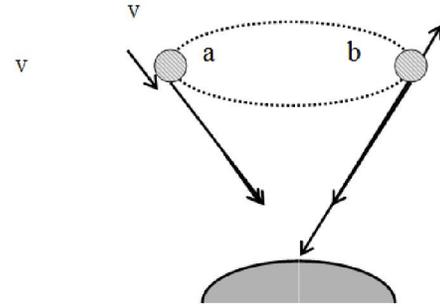


图 1-2

现在观察 A 星（图 1-2），当它在位置 a 时，是朝我们地球而来；在 b 时，离我们而去。如果 A 星的轨道速度为 V ，并且假设光传播时带有光源的速度，那么，在地球上测到的 A 星在 a 点发出的光相对于地球的速度为 $C+V$ ，而 A 星在 b 点发出的光相对于地球的速度为 $C-V$ 。

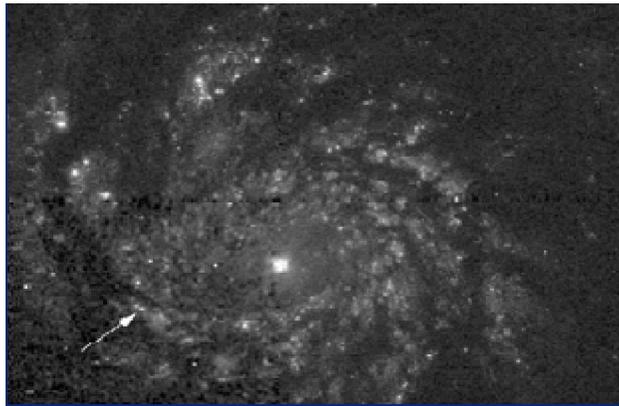
可见，在 a 点发出的光将比在 b 点发出的光跑得快。就算 V 不太大（比 C 小得多），但因 A 星离我们很远，因此，总可以假定 A 星在 b 点发出的光到达我们的眼睛时，它从 b 点经过一段时间（半周期）运动到 a 点时所发出的光也赶到了，我们将同时在 a、b 位置上看到有两颗 A 星。

假如在某一时刻在两个不同的地方看到同一颗星，这就是所谓“魅星”。一般情况下不一定同一颗 A 星在轨道两端出现，但只要光速依赖于光源速度，则我们预期总能看到“魅星”出现，并且会观察到双星轨道有明显的畸变。事实上，天文观察到的双星系统都很正常，从未看到过“魅星”，这表明图 1-2 中 A 星在 a 和 b 点发出的光相对地球的速度是一样的。所以根据观察，人们断定光速与光源的速度无关。

(2) 脉冲星的周期

脉冲星是上个世纪六十年代后期发现的一种天体（天文学四大发现之一），到目前位置人类已经发现了 1500 多颗脉冲星。所谓的脉冲星就是中子星，由于它的高速旋转，使它的高能电磁辐射周期性地扫过地球，因此有“宇宙灯塔”之称。

在超新星爆发的中心物质，坍塌形成的中子星时，由于物质的强烈收缩而引起的加速自转，使直径一般都在 20 千米上下的中子星（质量一般都为 1.35 个太阳左右），自转周期以秒、毫秒计。而且周期的稳定性，就是人类精确的计时器也无法与之相比，如毫秒脉冲星的周期“变化”，竟然达到小于每 10 亿年减少一秒的程度。就是我们称之为“周期有明显变化率”的蟹状星云脉冲星（每秒自转 30 周），也达到每亿年减少一秒的精度。我们知道地球（相对太阳）的轨道速度约为 30 千米/秒，在相隔半年时，其轨道速度变化达到约 60 千米/秒，这可是光速的万分之二！！假如光速与观测者的运动有关，那么我们能得到所有脉冲星，在一年四季里，都具有的“恒定不变”周期吗？我国古代超新星爆炸记录，同样可说明真空光速不变。



Vii)真空光速不变原理仍然是个未经完全证实的假定；

A. D. 1054年超新星爆炸 作为光速不变原理的佐证

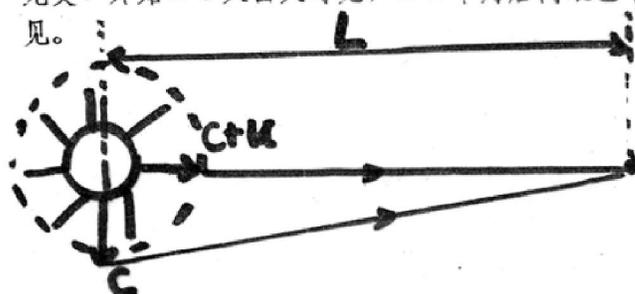
《宋会要》：嘉祐元年三月，司天监言：“客星没，客去之兆也。初，至和元年五月，晨出东方，守天关，昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十三日。”

方位：金牛座ζ星附近；

颜色：赤白；

星等：白天看有金星那么亮（视星等达 -5^m ）

光变：开始23天白天可见，22个月后肉眼已不可见。



$$L = 5000 \text{ 光年}$$

$$V = 1500 \text{ 千米每秒}$$

$$t' - t = L/C - L/(C+V) = 7.87 \times 10^8 \text{ 秒} \\ = 24.9 \text{ 年}$$

$$23 \text{ 天} \ll 24.9 \text{ 年}$$

3、河外星系与恒星的校差光行差

由于地球有环绕太阳的公转速度 $v = 29.75$ 公里/秒，按照光行差角的公式，可求出光行差角的最大值为 $\alpha = 20''.47$ 。对各种恒星进行观测，所得到的光行差角都与 $20''.47$ 相符合。如果光速与光源速度有关，则 $\alpha = \tan^{-1} v/c$ ，也应与光源速度有关，即 α 不再是常数。考虑到河外星系有很大的退行速度，有人认为，如果光速与源速有关，则应观察到 α 值的变化，但观察结果不能发现这个变化【1】【2】。因此，这个现象被认为是光速与源速无关的证明。

4、Saden, Alväger 等人的实验【3】【4】【5】

这些实验采用了新的实验手段。例如： π 介子蜕变成 γ 光子，其相对于观察者（或仪器）的速度仍为 c ，即与 π 介子的运动速度无关。这类实验被看作为光速与源速无关的新验证。

5、Tolman 实验【6】

1910年 Tolman 使用洛埃镜观测过太阳光线，认为如果入射光是 $c \pm v$ ，而反射光是 c ，将要观察到两套条纹之间的相对位移，但这种相对位移没有观察到，因此，得到的结论是，反射镜不能作为新光源，因而入射光速与源速运动速度无关。

6、Beckmann 和 Madics【7】

该实验和 Tolman 实验基本相同，但实验条件较严格，采用单色光，实验安排时避免采用窄缝，以排除窄缝起次光源的疑问（见图2）。

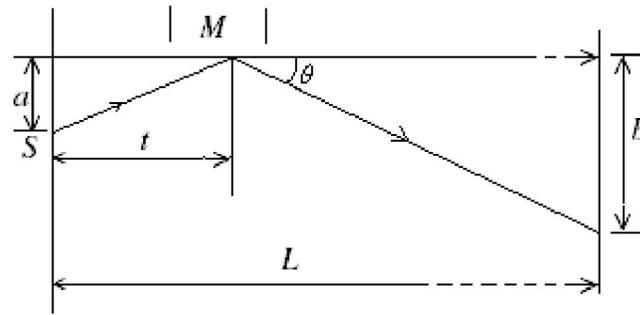


图 2

实验者假定反射光为 c ，略去小量后得到

$$\Delta = [2\beta L / \lambda] [b / (a + b)] \text{-----(16)}$$

因为激光波长 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ ； $L = 400$ 厘米； $\beta = 1.528 \times 10^{-7}$ ， $(a/b) = 10^4$ ，求得 $\Delta = 1.92$ 条纹移动。

因为实验装置可观测到 0.1 条纹位移，但是实验结果是零。因此实验者认为该实验证明了反射光与反射镜的运动速度无关。

7、Ciadea 【8】

该实验将两个激光器安装在可转动台上相应的两边，激光器 L_1 的光束经过反射镜 M_1 反射后，通过半透射镜 M_2 ，然后与激光器 L_2 的光束会合。将装置转动时，没有发现差频的周期改变，该装置被看作为精度很高的单项实验（见图 3）。

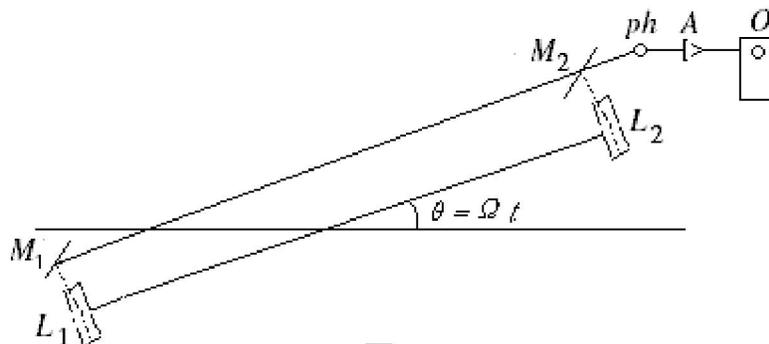


图 3

8、最新的进展：

1964 年在西欧核子中心 (CERN)，利用高能质子 (19.2 GeV) 打靶，产生的中性介子 π^0 ，具有速度 $V_s = 0.99975c$ ， π^0 立即 ($\tau_0 = 0.8 \times 10^{-16} \text{ s}$) 衰变为光子 (6 GeV)，光子从产生靶处飞到光子探测器路程达 80m，记录 π^0 产生和到达光子探测器时间为 $\Delta t \sim 267 \text{ ns}$ 。结果表明，由 $V_s = 0.99975c$ 的光源 (π^0) 发射的光的速度还是 c 。这是实验室规模第一次精确证明真空光速不变。日前，美国圣克劳德州立大学 (St. Cloud State University) 王汝勇和美国导航学会 (Institute of Navigation) 主席 Ronald Hatch 在美国导航学会 58 届年会撰文指出，可以利用 GPS 提供的大实验室进行真空光速不变原理的判决实验：让两架相距几百公里的飞机向同一方向，以相同的速度在两个 GPS 卫星的连线上飞行。两架飞机上的钟不用事先对准，他们各自记录 GPS 信号到达的时间并计算出它们的差别。这个差别就是 GPS 电磁波从一架飞机到另一架飞机所需的时间。而比较所需的时间是否与飞机的飞行速度有关就能确定光速是否与观测者相对于地球的运动有关，因此这个判决实验将首次检验对相对于地球运动的观测者来说，光速是否是不变的。他们还指出：不论飞机的飞行速度和 GPS 技术已足够用来鉴别光速是变还是不变的，而且根据现有成熟的 GPS 理论可以预计这个实验会出现不同的飞行速度会得出不同的结果，即真空光速不变原理将被证伪。这个实验不论有重大的理论意义，而且

有巨大的实际意义。迄今为止，物理学家都认为在一个封闭系统中速度是不可能被直接测量的。因此惯性导航系统用的是加速度计，速度是由对加速度的积分来得到的。如果通过实验证明不同速度的观测者得到的光速是不同的，那么反过来就能利用光速的不同来测量者的速度，而这将是导航领域的一次革命。它对不能接收到 GPS 信号的系统，如水下的潜艇则更为重要，为此，王汝勇已设计了速度计，并申请了专利。（笔者认为实验可能出现与预期相反的效果）。

参考文献：

- 【1】 G. van Bieshroeck, 1932, *Astrophys.*, 75,64.
- 【2】 O. Heckmann, 1960, *Ann. D. Astrophys.*, 23,410.
- 【3】 R. Cialdea, 1972, *Lett. Nuovo Cimento*, 4 Ser., 2.821.
- 【4】 O. Sadeh, 1963, *Phys. Rev. Lett.*, 10,271.
- 【5】 T. Alväges et al., 1963, *Nature*, 197,1191. 1964, *Arkiv Fysik*, 26,209.
- 【6】 R. C. Tolman, 1910, *Phys. Rev.*, 31,33.
- 【7】 W. Kantor. 1972, *Nuovo Cimento*, Ser., 2,9B,69
- 【8】 P. Beckmann and P. Mandics, 1964, *Radio Sci.*, 68D,1265

5/6/2017