

第17章 狭义相对论基础

教学基本要求

一 **掌握**爱因斯坦狭义相对论的两条基本原理，以及在此基础上建立起来的洛伦兹变换式。

二 **掌握**狭义相对论中同时的相对性，以及长度收缩和时间延缓的概念，**掌握**牛顿力学的时空观和狭义相对论的时空观以及二者的差异。

三 **掌握**狭义相对论中质量、动量与速度的关系，以及质量与能量间的关系。

概述(Summarize)

19世纪末页，牛顿定律在各个领域里都取得了很大的成功：在机械运动方面不用说，在分子物理方面，成功地解释了温度、压强、气体的内能。在电磁学方面，建立了一个能推断一切电磁现象的 **Maxwell** 方程。另外还找到了力、电、光、声----等都遵循的规律---能量转化与守恒定律。当时许多物理学家都沉醉于这些成绩和胜利之中。他们认为物理学已经发展到头了。

正于是1900年英国物理学家开尔文在瞻望20世纪物理学的发展的文章中说到：

“在已经基本建成的科学大厦中，后辈的物理学家只要做一些零碎的修补工作就行了。”

--开尔文--



也就是说：物理学已经没有什么新东西了，后一辈只要把做过的实验再做一做，在实验数据的小数点后面在加几位罢了！

但开尔文毕竟是一位重视现实和有眼力的科学家，就在上面提到的文章中他还讲到：

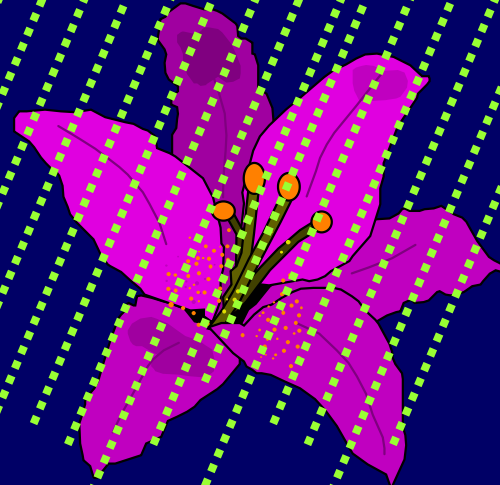
“但是，在物理学晴朗天空的远处，还有两朵令人不安的乌云，----”

这两朵乌云是指什么呢？

黑体辐射实验

迈克尔逊-
莫雷实验

后来的事实证明，正是这两朵乌云发展成为一场革命的风暴，乌云落地化为一场春雨，浇灌着两朵鲜花。





相对论问世



普朗克量子力学的诞生

这两朵乌云到底是什么回事呢？

经典力学

高速领域

相对论

微观领域

量子力学

今天来介绍相对论

相对论---关于时空观及时空与物质关系的理论。

（所谓经典力学遇到障碍就是经典力学的时空观出现了问题，相对论从根本上改变了经典的时空观。）

相对论有狭义相对论广义相对论之分：

狭义相对论 (special relativity)

关于惯性系时空观的理论；

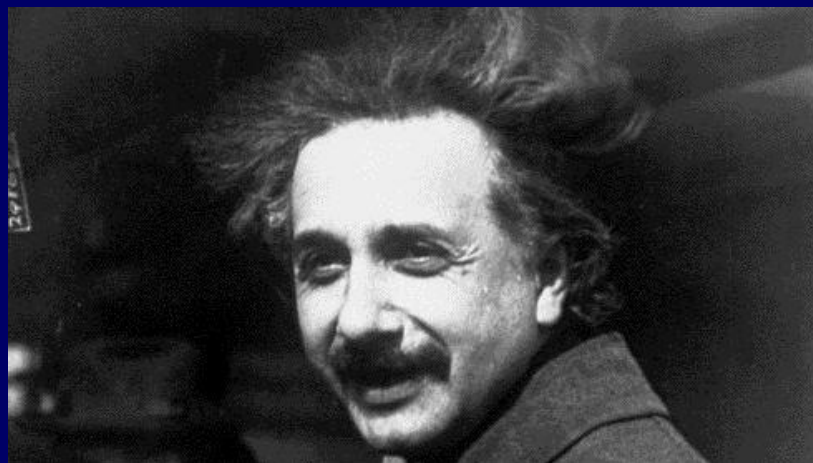
广义相对论 (General relativity)

关于一般参照系及引力的理论；

爱因斯坦——公众谓之人类最高智慧的象征

爱因斯坦的主要科学贡献：

光的量子论、狭义相对论和广义相对论。



阿尔伯特·爱因斯坦**1895**年在瑞士阿劳州立中学学习。**1900**年他在瑞士苏黎世联邦工业大学毕业。**1902**年在伯尔尼的瑞士专利局被聘为三级技术员。**1905**年，爱因斯坦发表了六篇论文，提出了有划时代意义的“光的量子论”、“狭义相对论”和“布朗运动理论”。

1、狭义相对论

仅限于惯性参照系，特别对微观高速运动的粒子

(1) 狭义相对论的两个基本原理

a、相对性原理

b、光速不变原理

(2) 洛伦兹变换

(3) 有关时空结构和物质、运动联系的一个时空观

(4) 相对论动力学和电动力学

(5) 质能关系

2、广义相对论

(1) 等效原理和广义相对性原理



加速场和与
引力场等效



非惯性系处理
成惯性参照系



所有物理学规律对所
有的参照系都成立

(2) 广义相对论揭示时空结构与物质的统一性

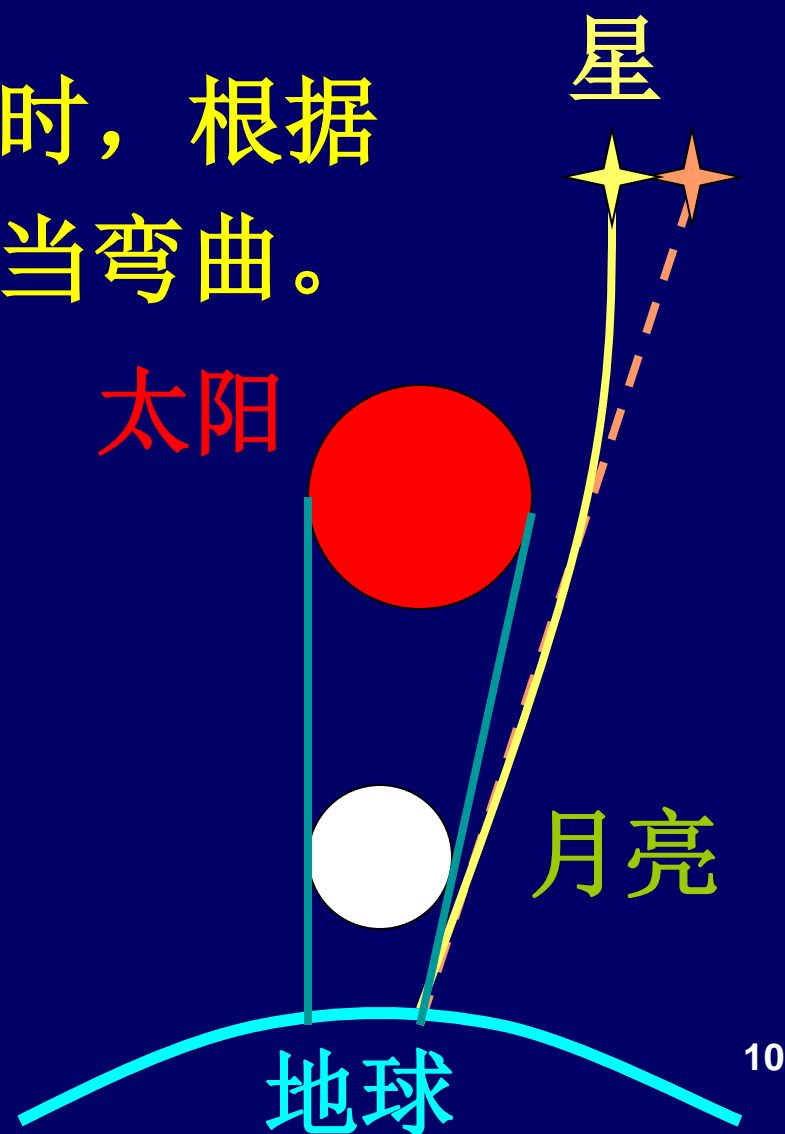
(3) 天体物理的基本理论基础

(4) 广义相对论的实验验证

a、光束弯曲

当光束通过引力场时，根据等效原理，它的轨道应当弯曲。

例如：星光经过太阳边缘时，我们应当观察到光束的“位移”，这种位移只有在日蚀时才可能发现。



1919年日全蚀期间，国际考察团对此进行了考察，考察人员在日蚀时刻拍摄了星空的照片，然后将这些照片与没有太阳时这同一部分星空的照片相比较，发现星的位置移动了。这就证实了爱因斯坦关于光束从太阳近旁通过时要发生偏移的预言（角度偏移约 $1.75''$ ）。

光线在引力场中弯曲的一个必然推论是引力透镜成象问题。早在1920年爱丁顿就提出引力场会聚成象可作为广义相对论的一种检验；

b、引力红移

原子或光子的振动可以看作是最简单的时钟。光子振动频率的变动使光束的颜色向光谱的红色端偏移，因此把它称为引力红移。

原子在引力大的地方发出的光波长变长，频率变短

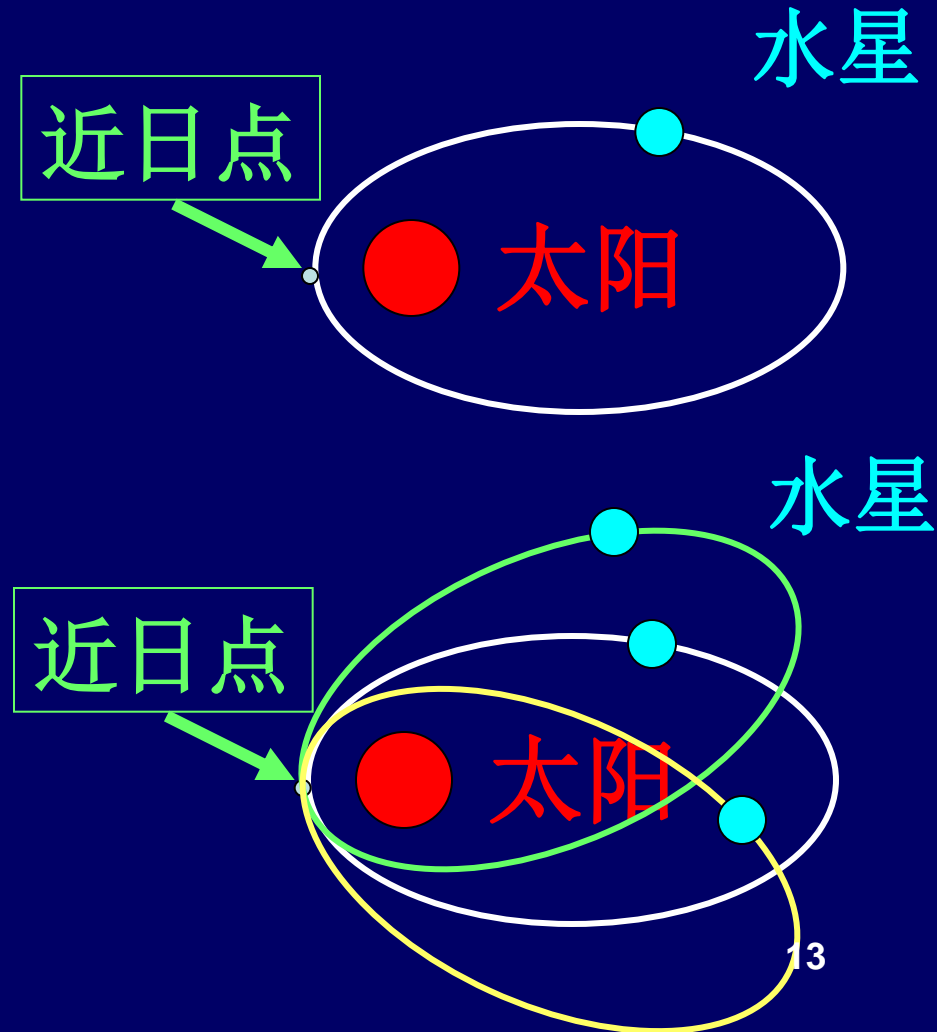
太阳是巨大的引力场

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} \text{ 的值: } \frac{\text{实验值}}{\text{理论值}} = 1.01 \pm 0.10$$

c、水星近日点的进动

行星实际上并不按椭圆运动，因为邻近天体的影响对这行星的运动产生摄动。

举例：水星特别明显地表现在所谓近日点的进动上。按照开普勒的理论，行星每年都应通过同一个近日点。但由观察得知，这个轨道点的位置相对于不动的恒星**每一百年约变化 $1^{\circ}33'20''$** 。



如果把所有看得见的已知行星的影响都考虑在内，则我们得到的水星近日点进动的数值为**每一百年约 $1^{\circ} 32' 37''$** 。

牛顿万有定律预言的结果与天文观察的结果**每一百年相差 $43''$** ，产生原因未能获得解释。

起初曾把这个现象归结于另一行星的影响，并预先把它命名为**火神星**，但一直没有发现这个行星。

广义相对论可以导出牛顿万有定律所涉及的其他行星的一切结论，而且也能给出水星近日点进行**每百年所缺少的 $43''$** 。

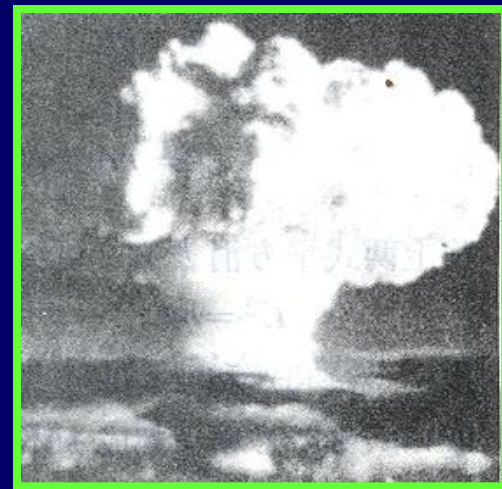
第17章 狭义相对论基础

§ 17---1伽利略变换 经典力学的旧时空观

§ 17---2爱因斯坦假设 洛仑兹坐标变换

§ 17---3 狭义相对论的时空观；

§ 17---4狭义相对论动力学基础



17-1 伽利略坐标变换 经典力学时空观

- 一) 伽利略坐标变换 (简称 “GT”) 及经典时空观
- 二) 伽利略相对性原理 (Galileo relativity principle)

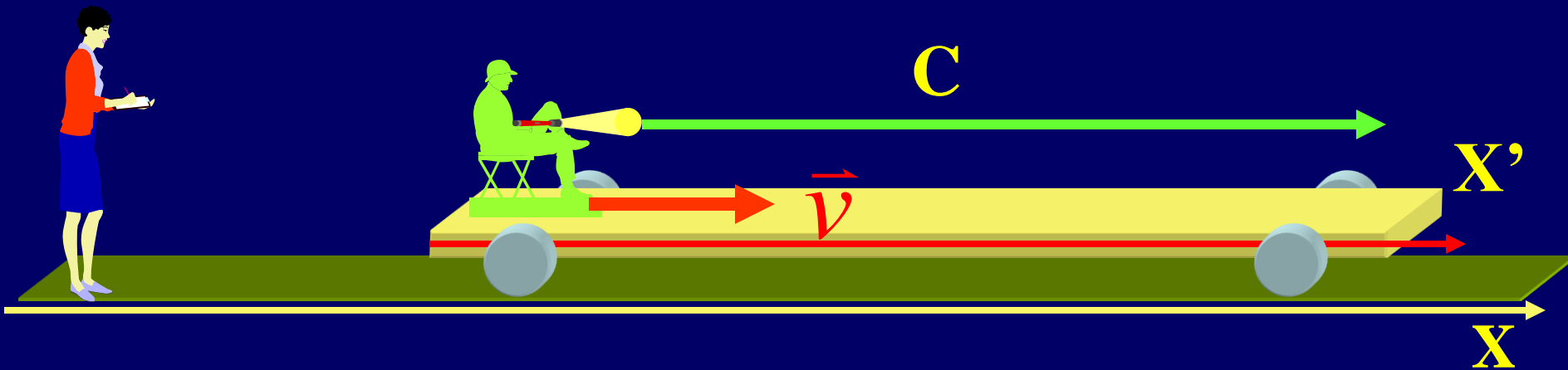


应用程序



应用程序

例) 一小车以速度 \vec{v} 沿X轴运动, 人在小车上打开手电筒, 灯光在小车中 (K' 系) 以光速C传播, 则地面上的人 (K 系) 测得的光速为多大?



由“GT”地面上的人测得的光速为:

$$u_c = C + v > C$$

可见在“GT”下光速是没有任何限度的

或

$$\begin{cases} u_x = u'_x + v \\ u_y = u'_y \\ u_z = u'_z \end{cases}$$

迈克耳逊—莫雷实验

—麦克斯韦方程组对伽利略变换不协变

自牛顿定律建立起来以后，人们成功地解释了力、热、电、光、声等现象，牛顿定律已达到了登峰造极的程度，人们对牛顿定律可以说是已经达到了顶礼膜拜、乃至迷信的程度。普遍认为牛顿定律是万能的。

19世纪60年代麦克斯韦建立了解释电磁现象的方程---Maxwell Equation。并导出了电磁波的方程。

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

式中：C为真空中的光速

$$C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3.0 \times 10^8 m / s$$

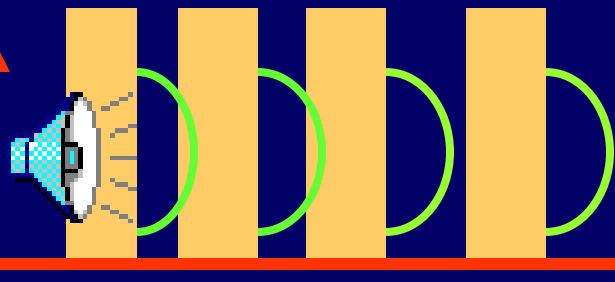
如何看待这个电磁波和光速呢？由于牛顿定律在人们头脑中的统治地位。人们很自然地要与曾用牛顿定律成功解释过的机械波来类比。

机械波

1) 依靠弹性媒质传播, 其波速由弹性模量和媒质密度决定。

$$u = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

如声波在空气中传播



2) 波速是相对于和静止媒质保持相对静止的参照系的波速。

电磁波(光)

1) 依靠弥漫宇宙的“以太” (Aether) 传播。 $C = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$

C很大, 故“以太”应比钢还硬且星体在其中运动时要畅行无阻。

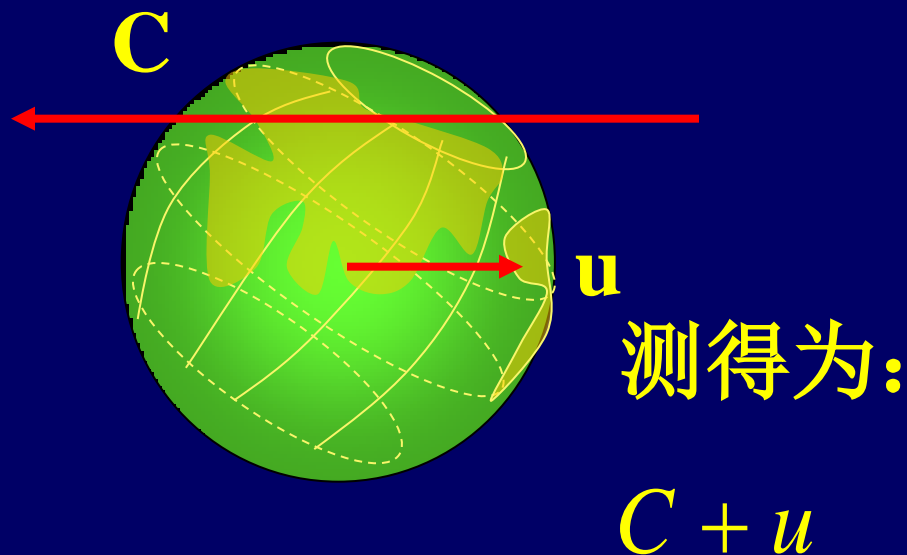
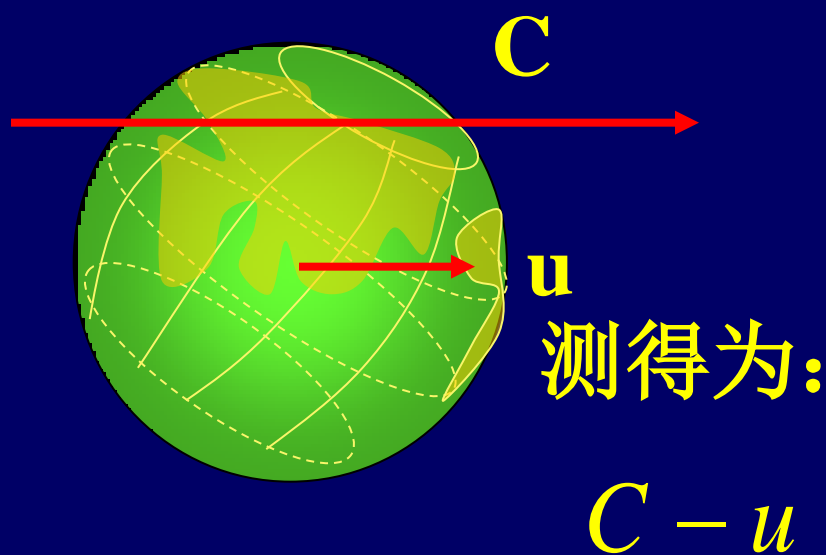
2) C是相对“以太”参照系的速度
“以太”是宇宙间的绝对静止参照系。

按照以上分析，Maxwell方程只对绝对静止的“以太”参照系成立，并且依照“GT”，在不同的参照系中应测出不同的光速。这意味着宇宙间存在一特殊的参照系---以太参照系，在这个参照系中光速是C，其它惯性系中将测出不同的光速。

但是仅仅这样认为还是不行的，因为物理学是一门实验的科学。只有用实验证明了这一观点，才能算真正找到了这个绝对静止的参照系。

而且如果真正找到了这个绝对静止的参照系，那么物质世界的图象更清楚了---所有的物质都是在这绝对静止的参照系中作绝对运动。整个宇宙是一个充满“以太”的绝对空间。

当时很多科学家都力图证实这个绝对静止的参照系，而结果呢？大家费了九牛二虎之力，这种参照系却没有找到，却为相对论的产生提供了实验基础。这些实验都是一些电磁学方面的实验，其中最出名的是迈克尔逊--莫雷（Amichelson--Morley）实验。其实验大致思路是：光对以太的速度为 C ，地球在以太系中运动，依伽俐略速度变换：地球上测出的光速不是 C 而是另一值。



正于顺风与顶风骑自行车感觉风速不一样一样。

迈克尔逊干涉仪



迈克尔逊(A. Michelson 1852—1931)

美国实验物理学家，毕业于安那坦利斯海军学院，在该院任物理教官，退役后在芝加哥大学任教，将毕生精力献给了研制干涉仪和精确测定光速的事业，为之奋斗了半个世纪，在最后一次光速测量中中风去世，因为在研制迈克尔逊干涉仪方面的成就，1907年荣获诺贝尔物理奖，成为获得该奖的第一个美国人。

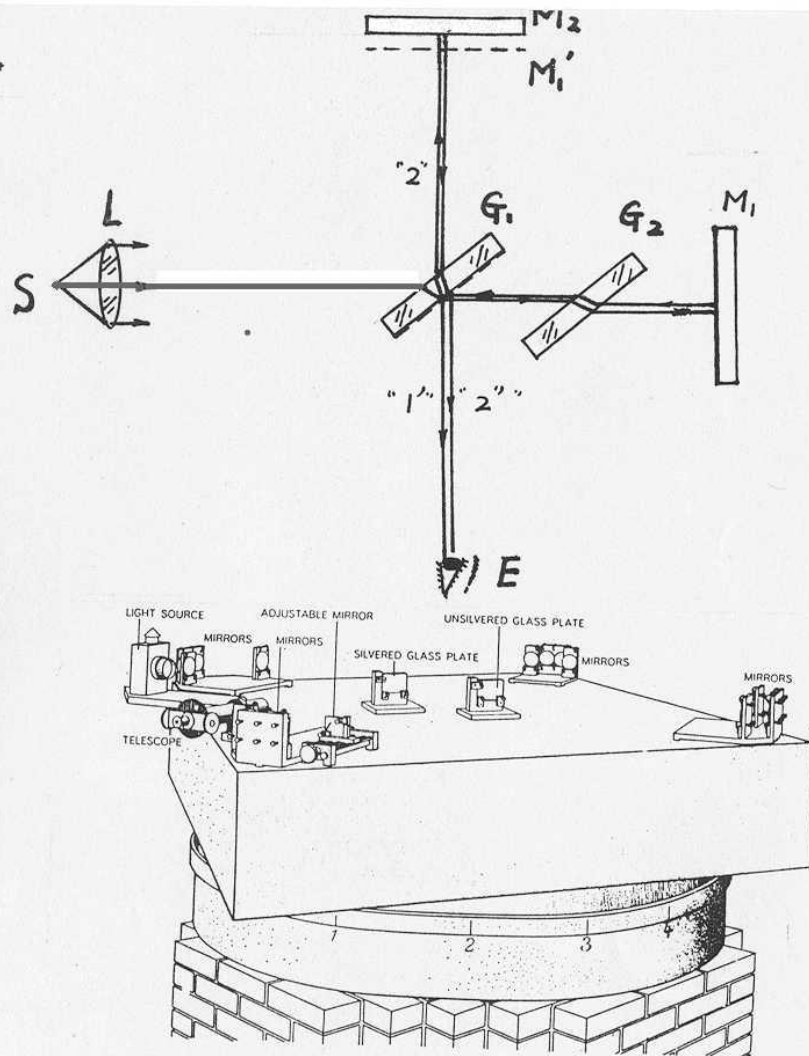


Figure 6-16. Interferometer used by Michelson and Morley in their measurements of the velocity of light. A sandstone table holding mirrors is fixed to a wooden ring which floats on mercury. The series of mirrors serves to lengthen the total path of light. The unsilvered plate is placed along one path to compensate for the fact that the other path must pass through the glass of the mirror. The telescope permits one to observe the interference fringes. (Drawing courtesy of Scientific American.)

迈克尔孙 — 莫雷实验

为了测量地球相对于“以太”的运动，1881年

迈克尔孙用他自制的干涉仪进行测量，没有结果。

1887年他与莫雷以更高的精度重新做了此类实验，

仍得到零结果，即未观测到地球相对“以太”的运动。

迈克尔逊干涉仪是通过干涉的办法通过干涉条纹的移动来测量光速的。但实验结果并没有看到预期的条纹移动。干涉仪是精度很高的仪器，这一结果只能得出光沿任何方向传播时光速都是一样的结论。这结果正于人们顺风骑自行车与顶风骑自行车时感觉到的风速是相同的一样。不合人们的逻辑，称之为实验的负结果。使人大吃一惊！

因为这意味着经典物理学出了问题，意味着什么绝对时间、绝对空间、伽利略变换等等都是胡言乱语。就像一朵乌云一样遮住了物理学晴朗的天空。

一部分人感到沮丧，我们顶礼膜拜的牛顿定律尽然不灵了，这...岂不是科学的毁灭吗！

有一部分人不相信实验的真实性，继续改进实验设备作实验。而且春天作了夏天作，秋天作了冬天作；平地作了高山作...实验精度越来越高，能作实验的人越来越多，乃至几乎每个大学都能作，但结果仍然一样，地球上的光速与地球速度无关。

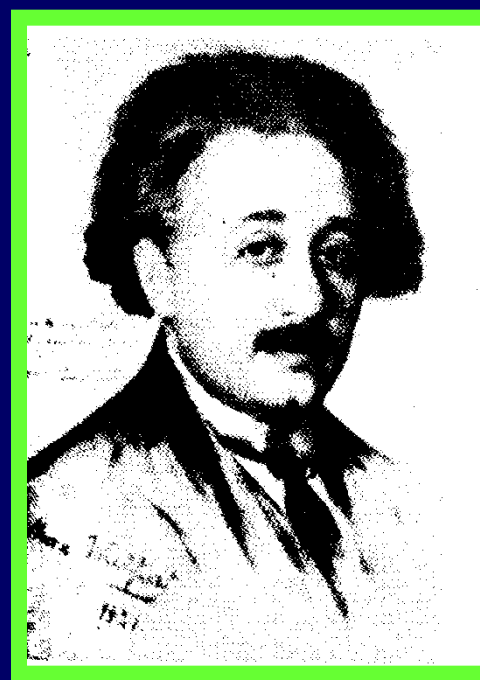
1887年 $u = 5km / s$

1930年 $u = 1.5km / s$

1958年 $u = 0.03km / s$

1970年 $u = 0.00005km / s$

是谁冲破了旧的传统的思想的束缚呢！爱因斯坦（Albert Einstein 1879--1955）



正是他对任何一个看来无可非议的问题总要问一个为什么，如他对一米就是一米，一秒就是一秒也要产生怀疑，他说：“时间、空间人们都说弄清了，不再研究，我从小就没有弄懂，长大以后就继续究。就研究出相对论”。正是这样一个人，1905年，年仅仅26岁的爱因斯坦提出了两条假设创建了狭义相对论（1916年又发表了广义相对论）。当然现在已不是什么假设，而是两条基本的原理。

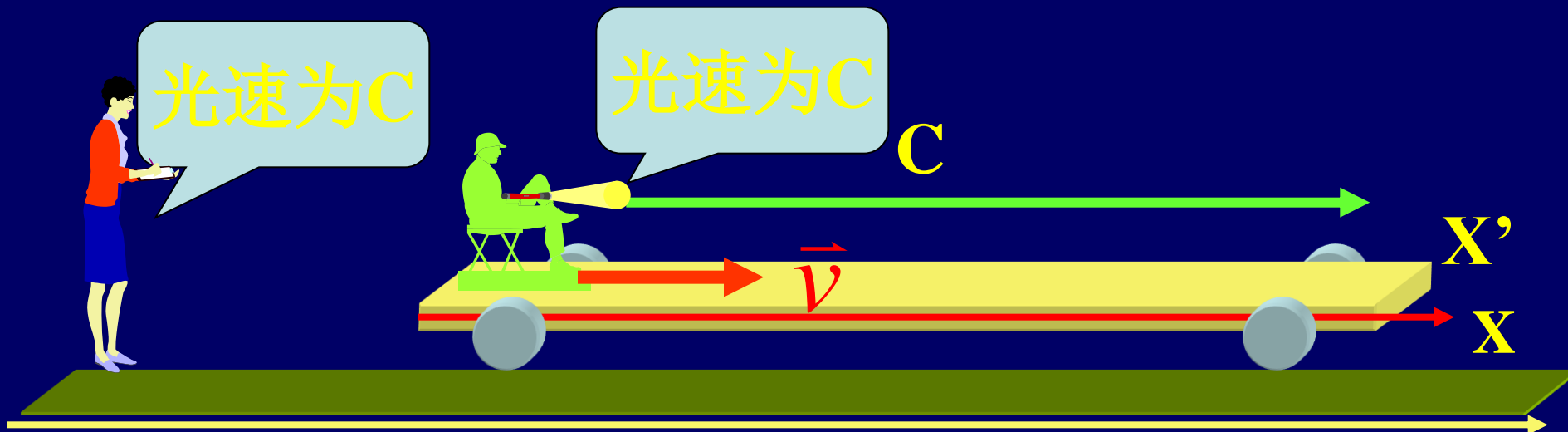
一、狭义相对论的两条基本原理

1) 相对性原理：一切物理学定律对一切惯性系参照系都是等价的。

注意：相对性原理实际上是伽利略力学相对性原理的推广，不过它不仅包含力学现象，而且包括一切其它的物理现象。

即：一切惯性系都是彼此彼此、半斤八两、谁也不比谁特殊，一切惯性系都是平权的。这意味着不能通过本参照系的实验确定本参照系与其它参照系有什么不同。没有一个特殊地位的参照系。否定了绝对参照系的存在。当然要找到对电磁波的速度有特殊值的参照系是找不到的。

显然这是违背“GT”的，但迈克尔逊--莫雷实验的负结果就是必然的了。有人感到不好理解：



2) 光速不变原理----真空中的光速相对任何惯性系，沿任意方向恒为C，且与光源的运动状态无关。



如果不满足光速不变原理，因果关系将颠倒过，可是从来没有看到过这种现象。

1905年爱因斯坦在《论动体的电动力学》一书提出如下两条基本原理：

1.狭义相对性原理

物理定律在所有的惯性系中都具有相同的表达形式，即所有的惯性系对运动的描述都是有是等价的。

2.光速不变原理

真空中的光速是常量，它与光源或观测者的运动无关，即不依赖于惯性系的选择。

说明：(1) 第一假设说明一切惯性系都是平权的，绝对静止的参考系不存在。

(2) 相对性原理实际上是力学相对性原理的推广，它不仅包含力学现象，而且包括一切其它的物理现象。

注意：1) 光速不变原理适用的条件

A) 惯性系；B) 真空中

(介质中的光速 $C=C/n$)

2) 不要认为狭义相对论是迈克尔逊--莫雷实验的直接结果，它是近半个世纪大量实验的总结；当然迈克尔逊--莫雷实验对确认狭义相对论有重要影响。

那么，对应狭义相对论的坐标变换又是什么呢？

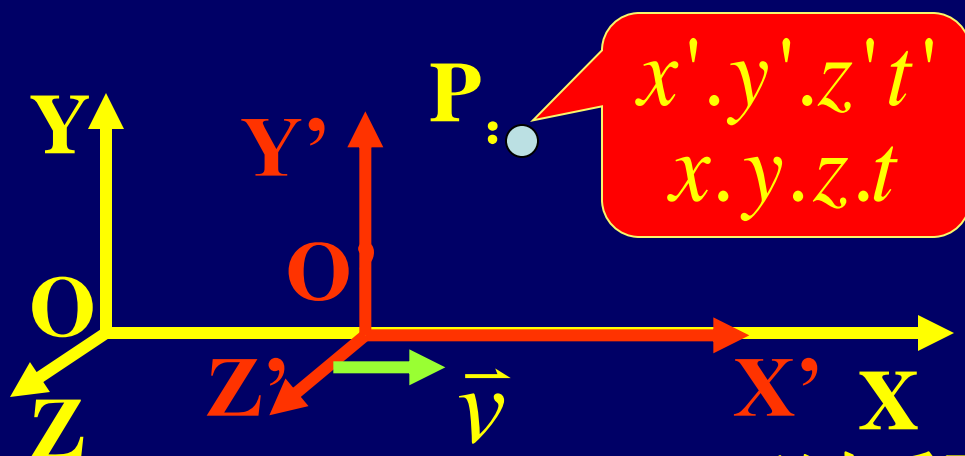
二、洛伦兹坐标变换（简称“LT”）

此坐标变换是荷兰人Lorentz发现的，他发现在这个变换下Maxwell方程具有不变性。

二、洛伦兹坐标变换（简称“LT”）

即麦克斯韦方程在不同的惯性系具有相同的形式。
下面由相对性原理来推导这个变换。

设有惯性参照系K、K'



- 1) 各坐标轴相互平行;
- 2) K'系相对K系沿X轴以 \vec{v} 作匀速直线运动;
- 3) 坐标轴原点O与O'点重合时作为公共计时起点。

（以后不加声明均指这种参照系）

若空间某点P发生一件事，其时空坐标为

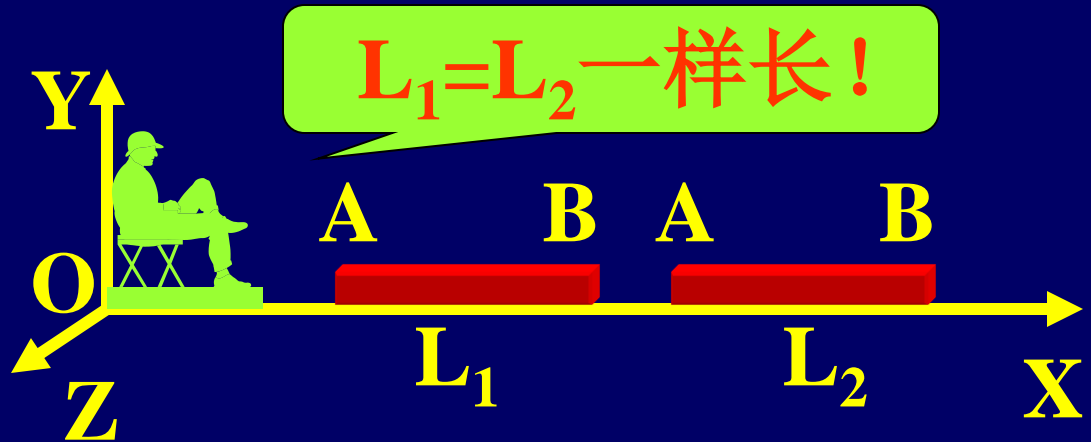
$$x'.y'.z'.t', \quad x.y.z.t$$

所谓坐标变换就是要找出它们之间的关系。但在得出结论之前必须指出两点：

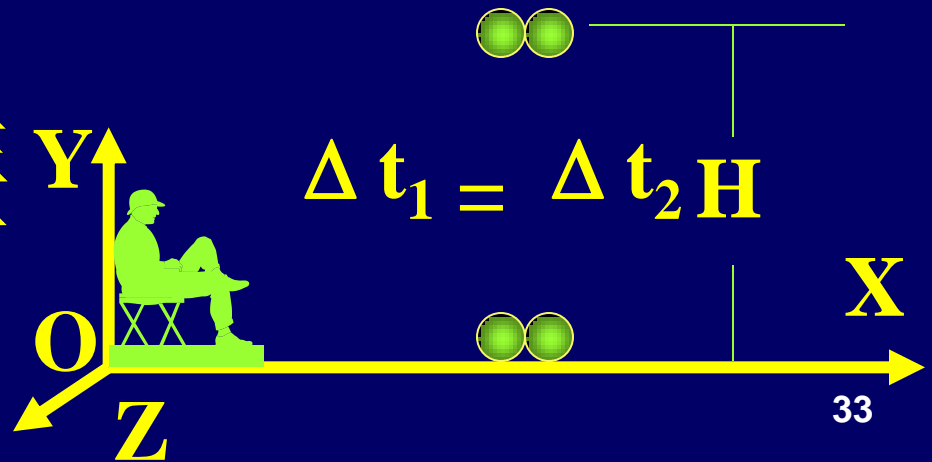
1) 时间、空间是均匀的，要求变换是线性的。

所谓时空是均匀的，是指同一参照系中某事件发生的时间间隔与空间间隔与它们在什么时间发生、什么地点发生无关。

具体讲：一棒AB沿X轴放置，不管放在X轴的何处都是一样长。



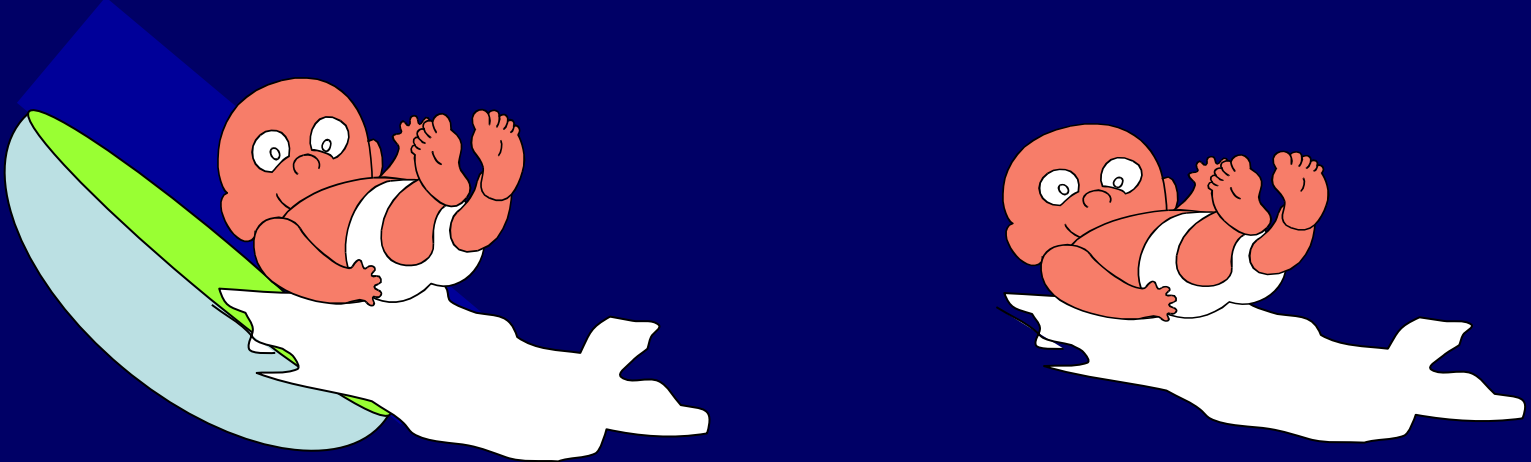
又如：一物体从H高度掉下来，但不管是现在掉下来还是等一下掉下来所需时间都一样。



2) 新的变换应在低速状态下变成为伽利略坐标变换

因为任何理论的成功，都是对旧理论的扬弃，而不能把旧理论象倒垃圾一样完全抛弃。它总是把旧理论中合理的部分保留或包含在其自身之中。正于给小孩洗澡时，倒水时不能把脏水和连同小孩一起倒掉一样。牛顿定理与伽利略变换毕竟是低速状态下客观事物的反映，因此新变换必须在低速下，即

$v / C \ll 1$ 时，回到伽利略变换（渐进性要求）





洛伦兹, H. A.

$$\beta = \frac{v}{c}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \frac{t' + \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \end{array} \right.$$

以上称为洛伦兹坐标变换.简称“LT”

常令： $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$;

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} x = \gamma(x' + vt') \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \gamma\left(t' + \frac{v}{c^2}x'\right) \end{array} \right.$$

注意：1) $v \ll c$, 则 $\beta \rightarrow 0, \gamma \rightarrow 1$ $LT \rightarrow GT$

2) 物质之间的相对运动速度 $v < c$

否则 $\sqrt{1-\beta^2}$ 为虚数，时空坐标也变为虚数，失去了时空坐标的意义。

速度变换

$$v'_x = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v v_x}{c^2}}$$

$$v_x = \frac{v'_x + v}{1 + \frac{v v'_x}{c^2}}$$

$$v'_y = \frac{v_y}{\gamma(1 - \frac{v v_x}{c^2})}$$

$$v_y = \frac{v'_y}{\gamma(1 + \frac{v v'_x}{c^2})}$$

$$v'_z = \frac{v_z}{\gamma(1 - \frac{v v_x}{c^2})}$$

$$v_z = \frac{v'_z}{\gamma(1 + \frac{v v'_x}{c^2})}$$

讨论：1) 若 $v'_x = c$ ，则在s系中 $v_x = ?$

$$v_x = \frac{v'_x + v}{1 + \frac{v v'_x}{c^2}} = \frac{v + c}{1 + \frac{vc}{c^2}} = c$$

$$2) \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad v \text{ 为实数}$$

$$1 - \frac{v^2}{c^2} \geq 0 \quad v \leq c \quad v = c \quad \gamma \rightarrow \infty$$

物体的速度以光速c为极限

1、洛伦兹变换:

洛伦兹正坐标变换

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) \end{array} \right.$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

洛伦兹逆坐标变换

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \gamma(x' + vt') \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \gamma\left(t' + \frac{v}{c^2}x'\right) \end{array} \right.$$

例1，一列长为0.5km（按列车上的观察者测量）的高速行驶的列车，以每小时1000km的速度行驶，地面上人看到闪电同时击中火车头尾，问车上测得这两个闪电的时间间隔为多少？

解：S系为地，S'系为列车，已知

$$\Delta x' = 0.5\text{km}, u = 1000\text{km} / \text{h} = 278\text{m} / \text{s} \quad \Delta t = 0$$

$$t = \gamma(t' + \frac{v}{c^2} x') \quad \Delta t = \gamma(\Delta t' + \frac{v}{c^2} \Delta x')$$

$$\Delta t' = -\frac{v}{c^2} \Delta x' = -\frac{278}{(3 \times 10^8)^2} \times 500$$

$$= -1.54 \times 10^{-13} \text{s}$$