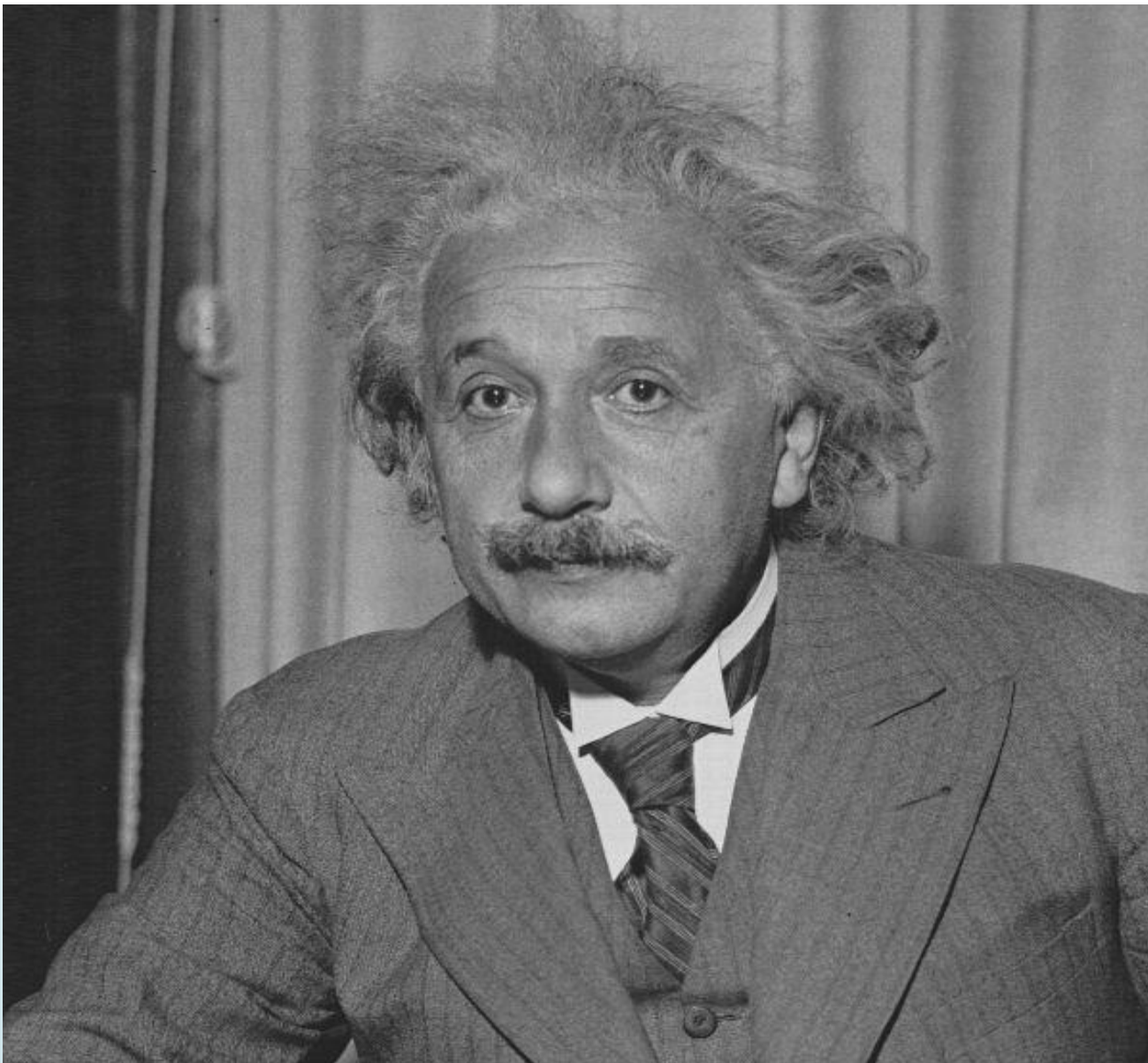


大学物理（一）

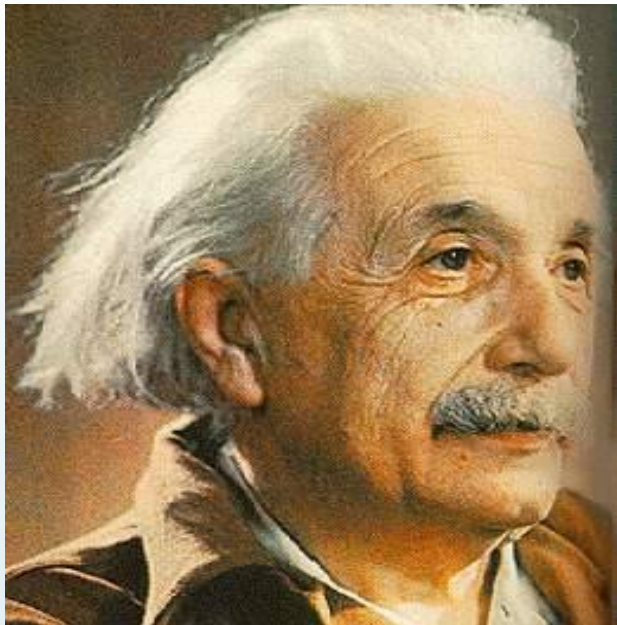
任课老师：蔡林
cailin@hust.edu.cn

第五章

狭义相对论



Albert Einstein
(1879.3.14. – 1955.4.18.)



Albert Einstein (1879.3.14. – 1955.4.18.)

20世纪最伟大的物理学家，于1905年和1915年先后创立了狭义相对论和广义相对论。1905年提出光量子假设，为此于1921年获得诺贝尔物理学奖。他还在量子理论方面具有很多的重要的贡献。



“山雨欲来风满楼”——历史背景

19 世纪末，物理学晴朗天空中飘着的“两朵乌云”。

黑体辐射
实验

量子力学的诞生

迈克尔逊-莫雷
实验

相对论的建立

19 世纪末叶，经典物理学（力、热、声、光、电磁学）取得了辉煌的成就。



PHYSICS

一、回顾：牛顿力学的时空观

1. 牛顿的绝对时空观

时间的度量和空间的度量都与参考系的选择无关(即都是绝对的)；时间和空间无关；时间、空间与物质无关。

两个物理事件的时间间隔，从任何一个惯性参考系来测量都是完全一样的；在任何一个惯性参考系中测量任意给定的空间两点的距离，所得结果是相等的。

——(牛顿力学的)力学相对性原理：

对不同的惯性系，牛顿定律及其它力学基本定律的形式都是一样的(即：任何惯性系都是平权的)。

2. 伽利略变换

设 $t_0 = t'_0 = 0$ 时, S 与 S' 重合。

t 时刻:

坐标变换

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases}$$

$$\vec{v}_{AB} = \vec{v}_{AC} + \vec{v}_{CB}$$

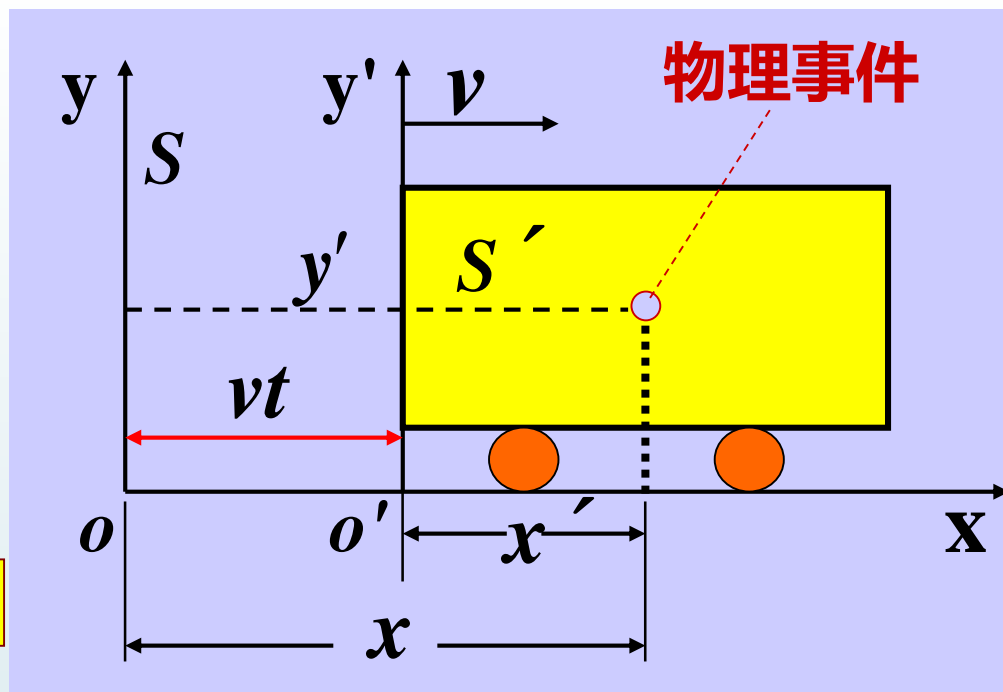
(经典的速度叠加公式)

速度变换

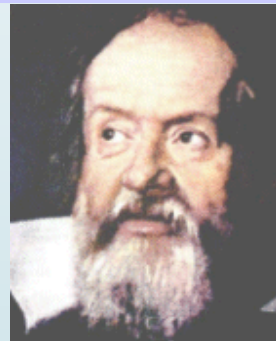
$$\begin{cases} u'_x = u_x - v \\ u'_y = u_y \\ u'_z = u_z \end{cases}$$

再求导

$$\vec{a}' = \vec{a}$$



(v 恒定)



$$\vec{F}' = \vec{F}, m' = m$$

$$\vec{F} = m\vec{a} \Rightarrow \vec{F}' = m'\vec{a}'$$

故经典力学认为: 一切惯性系中的力学规律都是相同的。那么自然要问: 这个结论能否推广到其它物理规律 (如电磁学规律) 呢?

19世纪中叶，麦克斯韦电磁理论已经牢固地建立起来了。
麦氏电磁理论给出真空中的光速为 $c = 2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

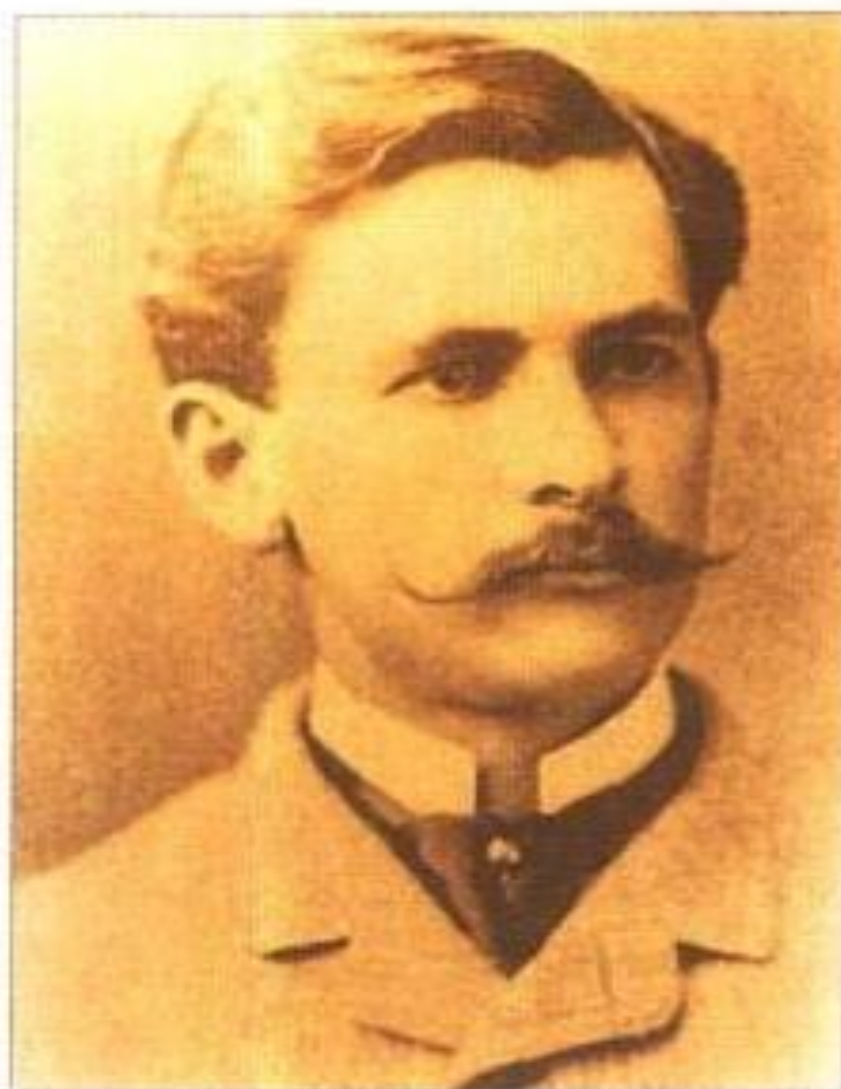
按牛顿时空观， c 应该是相对于某个特定的参考系的速度。
相对于其它的参考系由伽利略速度变换有 $\vec{c}' = \vec{c} - \vec{v}$

实验结果： (迈克耳逊—莫雷实验)

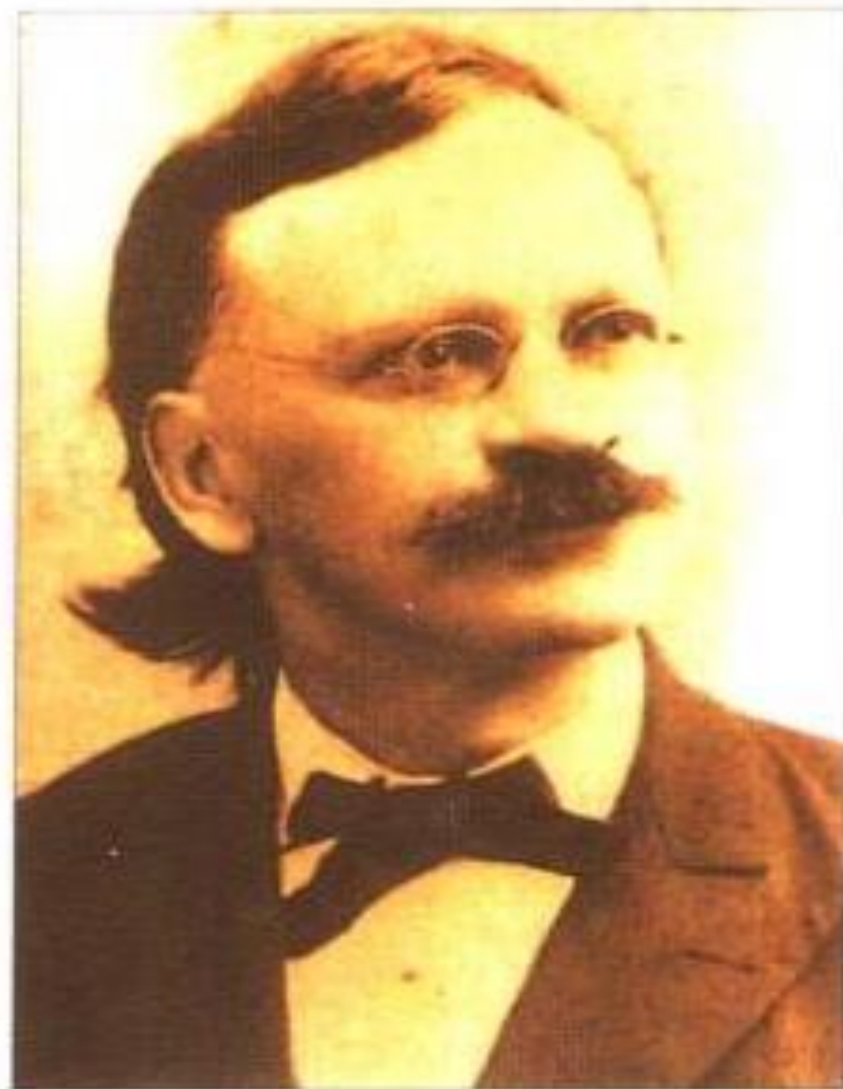
$$c' = c \quad \text{光速不变!}$$

(c 与参考系无关)

因此，事实表明光速（电磁规律）不服从伽利略变换！



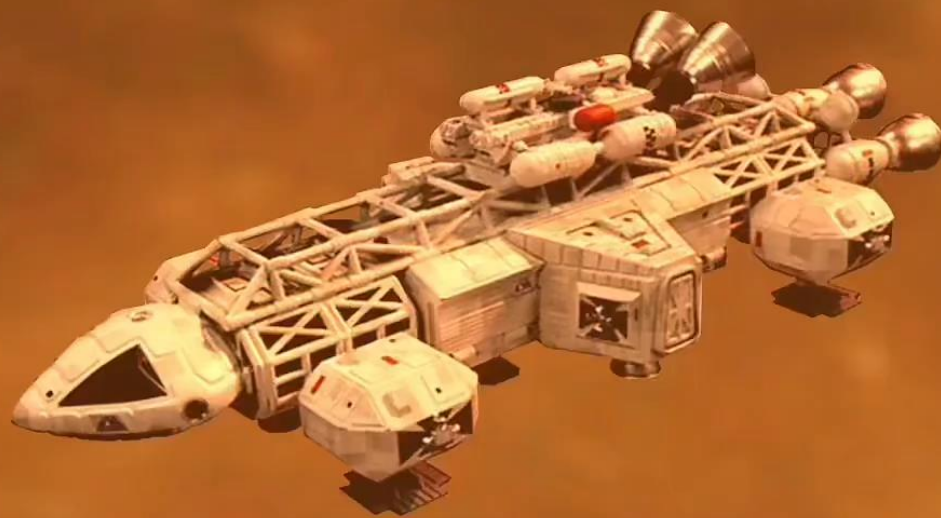
阿尔伯特·阿伯拉罕·麦
克尔逊(1852—1931)。



爱德华·莫雷
(1838—1923)。

以太与相对论

浮世叁千问 bilibili



19世纪中叶，麦克斯韦电磁理论已经牢固地建立起来了。
麦氏电磁理论给出真空中的光速为 $c = 2.99 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

按牛顿时空观， c 应该是相对于某个特定的参考系的速度。
相对于其它的参考系由伽利略速度变换有 $\vec{c}' = \vec{c} - \vec{v}$

实验结果： (迈克耳逊—莫雷实验)

$$c' = c \quad \text{光速不变!}$$

(c 与参考系无关)

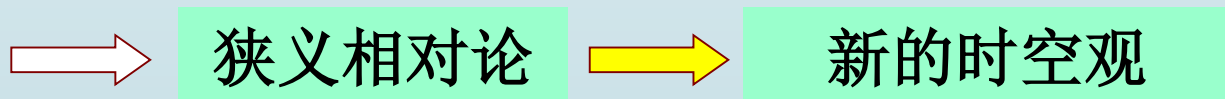
因此，事实表明光速（电磁规律）不服从伽利略变换！

矛盾如何解决？

选择有三.

三种选择:

- 伽利略相对性原理不是普遍原理，不必推广到高速领域，因而电磁规律可以不符合伽利略相对性原理及变换；
- 伽利略相对性原理是普遍原理，应修改电磁理论使之符合伽利略相对性原理及变换；
- 不必修改电磁理论，将伽利略相对性原理限制于低速领域，另找一个新的能使电磁规律符合的变换。从而推广伽利略相对性原理。



1905年, 年仅26岁的爱因斯坦发表两篇论文:

《论运动物体的电动力学》^①

《物体的惯性同它所含的能量有关吗? 》^②

建立了狭义相对论。

① Annalen der Physik, 1905, 17: 891

② Annalen der Physik, 1905, 17: 639~641

二、爱因斯坦时空观

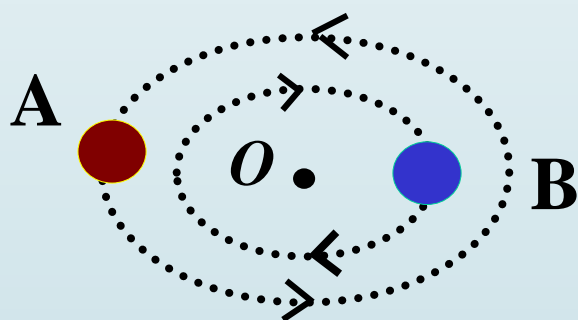
狭义相对论的两个基本假设：

1. 爱因斯坦相对性原理：

物理规律对所有惯性系都是一样的，不存在任何一个特殊的惯性系。

2. 光速不变原理：在任何惯性系中，光在真空中的速率相等。

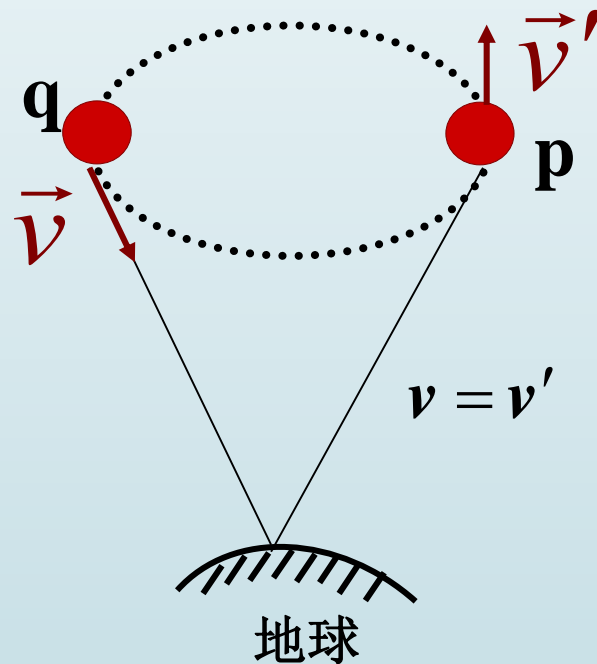
└→ 光速与光源的运动速度无关。



双星系统

两恒星A和B都绕质心近似做圆周运动。考察A星在p、q两点的运动。在q，向地球而来，在p，离地球而去。

若光传播时带有光源的速度，则A在q发出的光速度 $v_q = c + v$ ，在p发出的光速度 $v_p = c - v$ ， $v_q > v_p$ 。因此，我们将有可能在p、q两处同时看到A星。事实上，这种现象从未发生过。



超新星爆发和光速

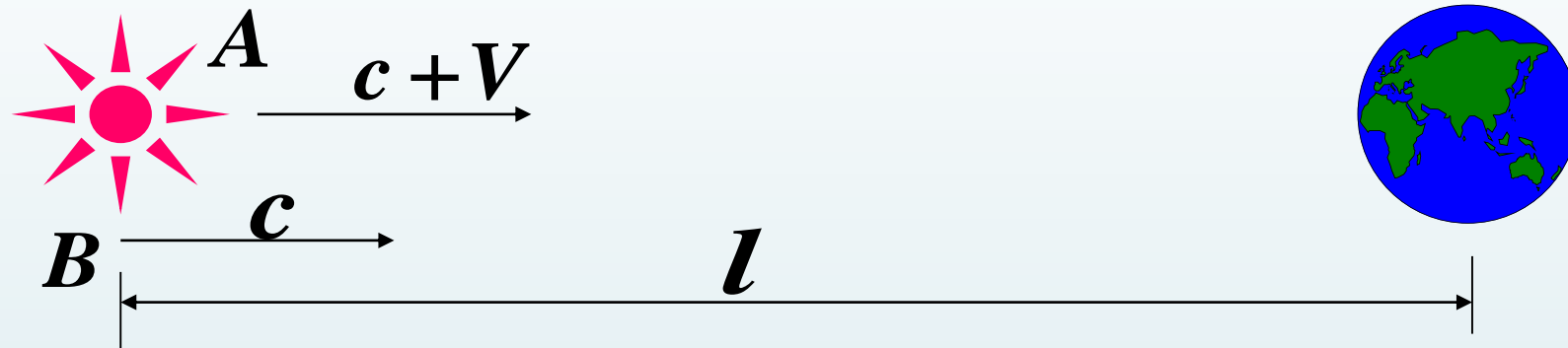
九百多年前，有一次非常著名的超新星爆发事件，当时北宋王朝的天文学家做了详细的记载。据史书称：爆发出现在宋仁宗至和元年五月(即公元1054年)。在开始的二十三天中这颗超新星非常之亮，白天也能在天空上看得到它，随后逐渐变暗，直到嘉祐元年(公元1056年)三月，才不能为肉眼看见，前后历时二十二个月。这次爆发的残骸就形成了著名的金牛座中的星云，叫做蟹状星云。中心为中子星。



The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORS2)

蟹状星云(中心为脉冲星)

夜空的金牛座上的“蟹状星云”，是900多年前一次超新星爆发中抛出来的气体壳层。



$$t_A = \frac{l}{c + V} \quad t_B = \frac{l}{c} \quad l = 5 \text{ 千光年} \quad \text{抛射速度 } V = 1500 \text{ km/s}$$

那么，在25年内可持续看到超新星爆发时发出的强光。
史书记载：强光从出现到隐没还不到两年。（“岁余稍没”）

这表明，光速与发光物体本身的速度无关，无论光源速度多么大，向我们发来的光的速度都是一样的。光速并不遵从经典的速度合成律。

1964-1966年，欧洲核子中心的实验直接验证了光速不变的原理：

以 $0.99975c$ 的高速飞行的 π^0 介子，在飞行中辐射光子，得到光子的实验室速度数值仍然是 c .

4. 由光速不变原理得出的有关结论

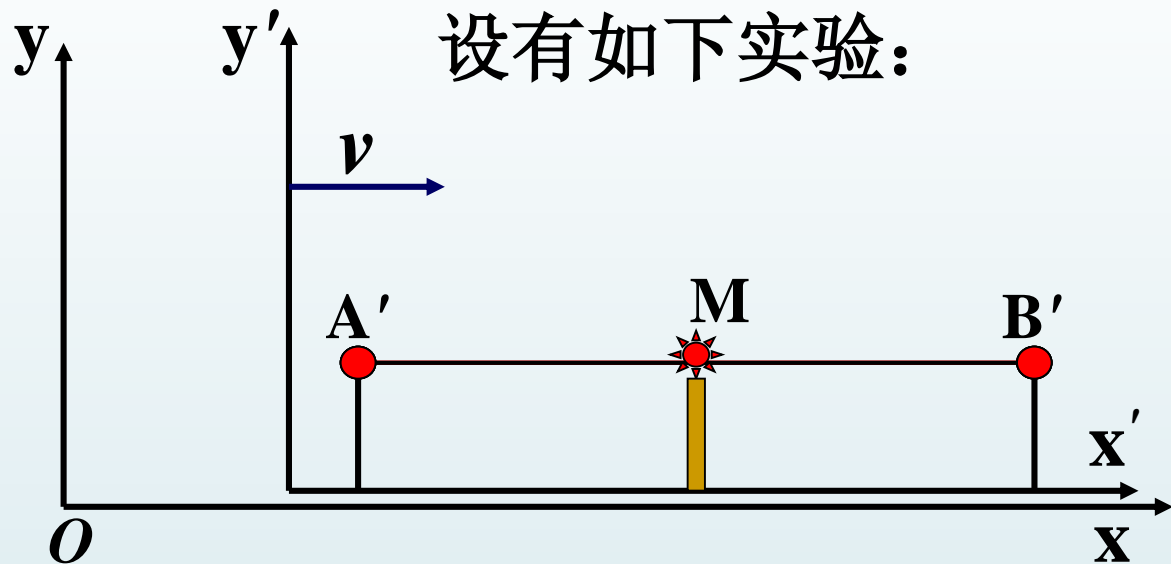
1) 同时性的相对性

在 S' 系中观察：

光到达 A' 和光到达 B' 这两事件**同时发生**。

在 S 系中观察：

光到达 A' 和光到达 B' 这两事件**不同时发生**！



可见，两物理事件是否同时发生，不是绝对的，而是依赖于参考系的选择，即必须相对于某参考系而言，也就是说，是相对的。这就是同时性的相对性。

对不同参考系，同样两事件之间的时间间隔不同。

即：时间的度量是相对的,并且与相对运动速度有关。

相对论效应之一：同时性的相对性

2) 时间膨胀 (运动的时钟变慢)

设S'系中，A'点有一闪光光源，在Y'轴放一反射镜

在S'系看：

两事件时间间隔：

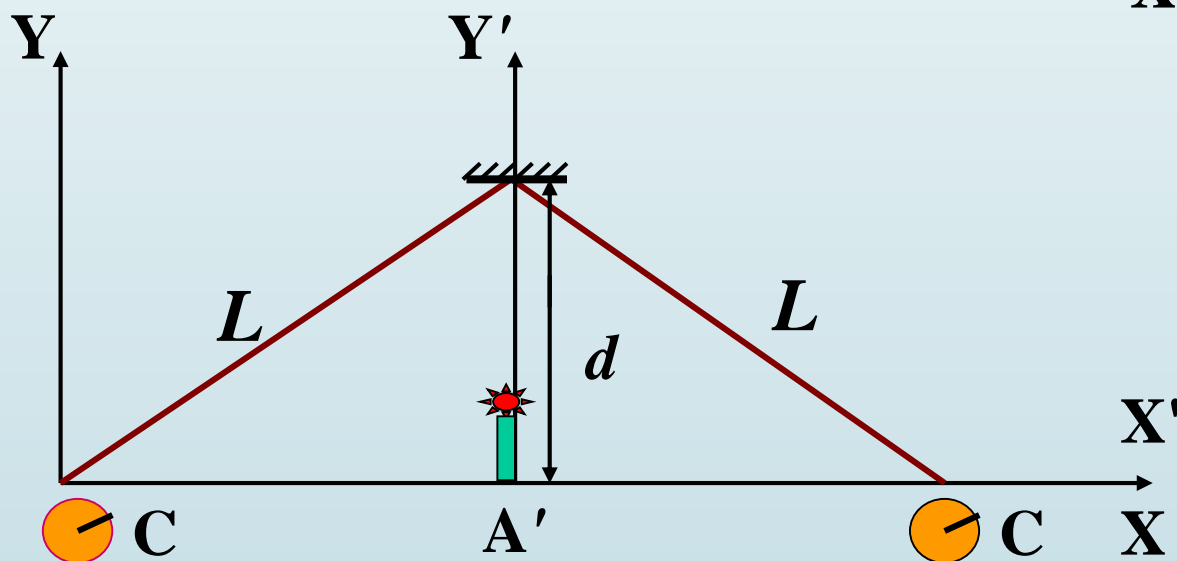
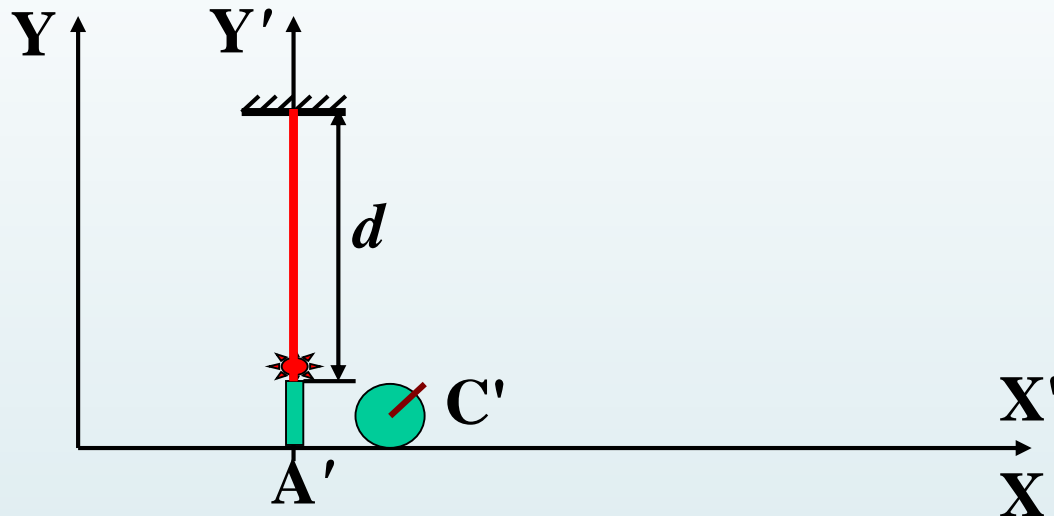
$$\Delta t' = \frac{2d}{c}$$

在S系看：

$$L = \sqrt{d^2 + \left(v \frac{\Delta t}{2}\right)^2}$$

$$\Delta t = \frac{2L}{c} = \frac{2d/c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

显然： $\Delta t > \Delta t'$



结论

在S'系同一地点发生的两个事件的时间间隔为 $\Delta t'$ ，
在S系测同样两事件的时间间隔总是要长一些：

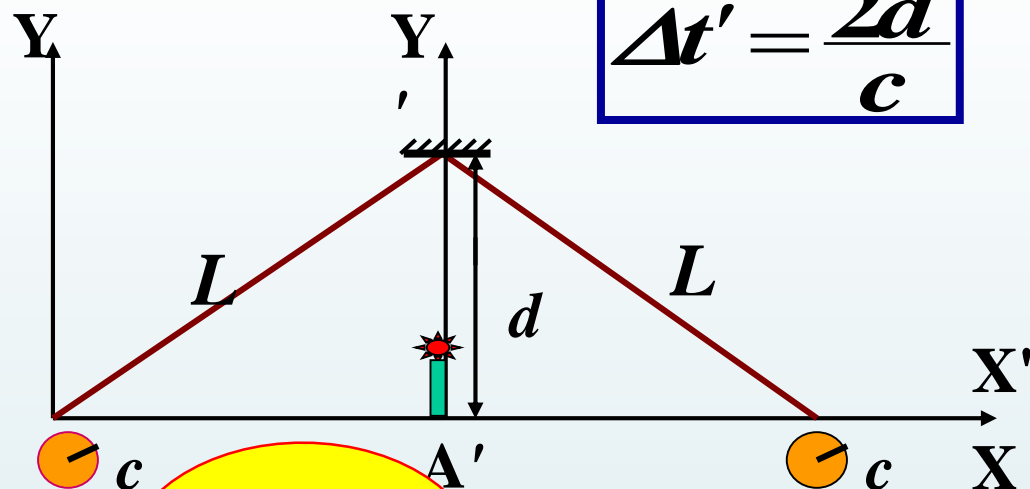
$$\Delta t = \frac{\Delta t' / c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad \Delta t > \Delta t'$$

定义：在某一参考系同一地点先后发生的两个事件之间的时间间隔叫作**原时**。

显然： $\Delta t'$ 为原时。

原时最短

相对论效应之二：时间膨胀效应（钟慢效应）



相对于原
时而言

相对于观
察者运动的
钟变慢

时间膨胀

浮世叁千问 bilibili



例：一宇宙飞船以 $v = 9 \times 10^3 \text{ m/s}$ 的速率相对地面匀速飞行，飞船上的钟走了5s，地面上的钟测量经过了多少时间？

解： 原时 $\Delta t' = 5\text{s}$

$$\begin{aligned} \text{则：} \Delta t &= \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{5}{\sqrt{1 - \left(\frac{9 \times 10^3}{3 \times 10^8}\right)^2}} \\ &= 5.0000000002\text{s} \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta t \approx \Delta t'$$

所以，当 $v \ll c$ 时： $\Delta t = \Delta t'$ 与参考系无关。

例：带正电的 π 介子是一种不稳定的粒子，当它静止时，平均寿命 $\Delta t' = 2.5 \times 10^{-8} \text{s}$ ，然后衰变为一个 μ 介子和一个中微子。在实验室产生一束 $v = 0.99c$ 的 π 介子，并测得它在衰变之前通过的平均距离为 52m。这些测量结果说明什么？ **“洞中方一日，世上已千年”**

解：若不考虑相对论效应 $\Delta t = \Delta t' = 2.5 \times 10^{-8} \text{s}$

它在实验室走过的距离为：

$$l = v \Delta t = 0.99 \times 3 \times 10^8 \times 2.5 \times 10^{-8} = \underline{7.4 \text{m}}$$

考虑时间膨胀效应：

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{2.5 \times 10^{-8}}{\sqrt{1 - 0.99}} = 1.8 \times 10^{-7} \text{s}$$

则： $l = v \Delta t = 0.99 \times 3 \times 10^8 \times 1.8 \times 10^{-7} = \underline{52.6 \text{m}}$

3) 运动的尺变短(物体沿运动方向的长度收缩)

例如：在地面上测正在以速度 v 行驶的汽车的长度。

垂直运动方向不受影响：

$$y=y' \quad z=z'$$

在 S' 系测车的长度为： L'

在 S 系测量：

t 时刻， B' 到达 x_1 点；

$t + \Delta t$ 时刻， A' 到达 x_1 点，同时 B' 到达 $x_2 = x_1 + v\Delta t$ 点

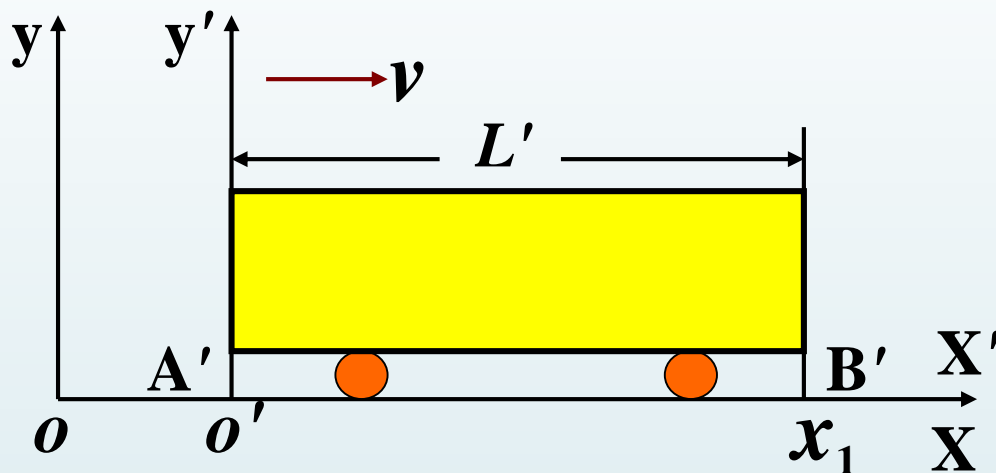
车的长度： $L = x_2 - x_1 = v\Delta t$ $\Delta t \longrightarrow$ 原时(钟放在 x_1 处)

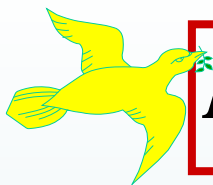
在 S' 系看： x_1 点走过的距离为 L' ，所用时间： $\Delta t' = \frac{L'}{v}$

而：

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \qquad \Delta t = \Delta t' \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

$$S \text{系中车的长度: } L = v \Delta t = v \Delta t' \sqrt{1 - (v/c)^2} = L' \sqrt{1 - (v/c)^2} < L'$$





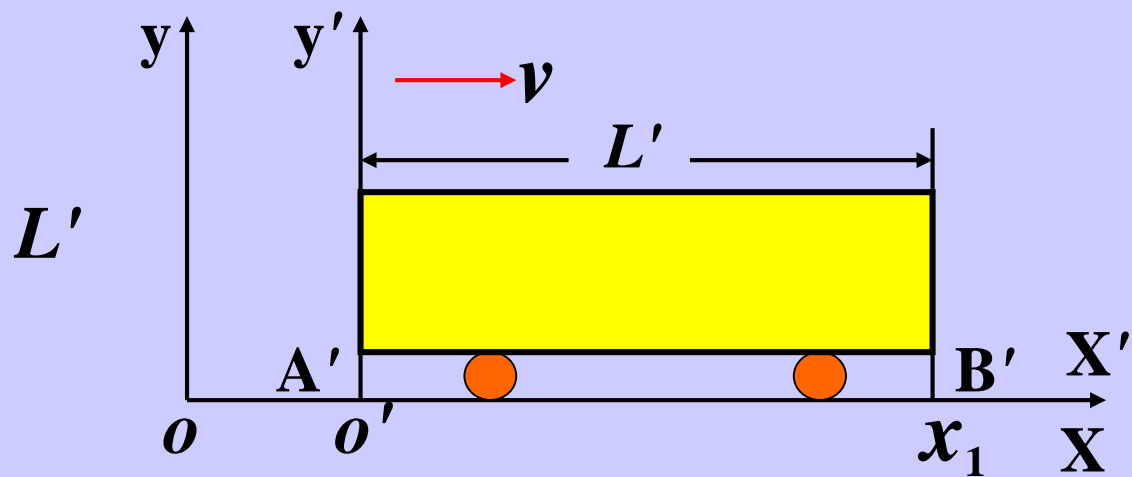
$$L = L' \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

结论

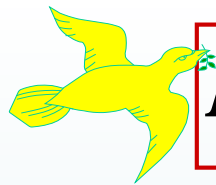
相对某一参考系静止的棒长度为 L' ，在另一参考系看要短一些即： $L < L'$

定义：物体相对参考系静止时，测得物体的长度为原长。

显然：原长最长。



相对论效应之三：(物体沿运动方向的)长度收缩效应。



$$L = L_{\text{原长}} \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

例：5m 长的宇宙飞船，以 $v = 9 \times 10^3 \text{ m/s}$ 相对地面飞行，在地面上测其长度为：

$$\begin{aligned} L &= L' \sqrt{1 - (v/c)^2} = 5 \times \sqrt{1 - \left(\frac{9 \times 10^3}{3 \times 10^8} \right)^2} \\ &= 4.9999999998 \text{ m} \approx 5 \text{ m} \end{aligned}$$

可见： $L \approx L'$ ，即：当 $v \ll c$ 时又回到牛顿时空观。

例： π 介子寿命为 $2.5 \times 10^{-8} \text{s}$ ，以 $v = 0.99c$ 的速度相对实验室作直线运动，求相对实验室 π 介子运动的距离？

解： π 介子（ S' 系）看，
实验室以速度 v 离它而去，
远离的距离 L' 为：

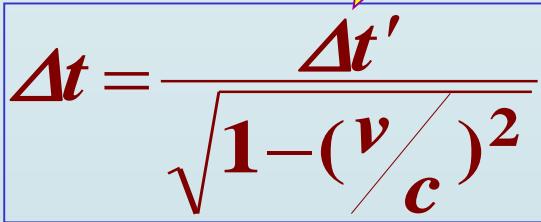

$$L = L_{\text{原长}} \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

$$L' = v \Delta t' = 2.5 \times 10^{-8} \times 0.99c = 7.4 \text{ m}$$

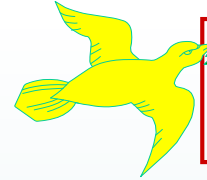
实验室（ S 系）看 L 满足： $L' = L \sqrt{1 - (v/c)^2}$ 故 $L = 52.6 \text{ m}$

另解：实验室（ S 系）看，须考虑时间膨胀效应。

原时

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{2.5 \times 10^{-8}}{\sqrt{1 - 0.99^2}} = 1.8 \times 10^{-7} \text{s}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

则： $l = v \Delta t = 0.99 \times 3 \times 10^8 \times 1.8 \times 10^{-7} = 52.6 \text{ m}$



$$L = L_{\text{原长}} \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

例： S 系与 S' 系是坐标轴相互平行的两个惯性系， S' 系相对 S 系沿 X 轴正向匀速运动。一根刚性尺静止在 S' 系中与 X' 轴成 30° 角，今在 S 系中观察得该尺与 X 轴成 45° 角，则 S' 系相对 S 系的速度是多少？

解： 在 S 系： $\text{tg}45^\circ = \frac{\Delta y}{\Delta x} \left\{ \begin{array}{l} \Delta y = \Delta y' \\ \Delta x = \Delta x' \sqrt{1 - (v/c)^2} \end{array} \right.$

在 S' 系：

$$\text{tg}30^\circ = \frac{\Delta y'}{\Delta x'} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \sqrt{1 - (v/c)^2} = \text{tg}45^\circ \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

$$\text{解得： } v = \sqrt{\frac{2}{3}}c$$

爱因斯坦时空观小结

讨论：光速不变合理吗？

1. 牛顿时空观在高速运动领域不成立
2. 爱因斯坦相对性原理
3. 光速不变原理
4. 由光速不变原理得出的有关结论

光速不变原理
所得结论

同时性的相对性

运动的时钟变慢

运动的尺子缩短

显然这些结论与牛顿
时空及伽利略变换相
矛盾

原时
最短

$$\Delta t' = 0, \Delta t \neq 0$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

$$L = L' \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

原长最长

双生子佯谬

Twin
paradox



双生子佯谬

浮世叁千问 bilibili



