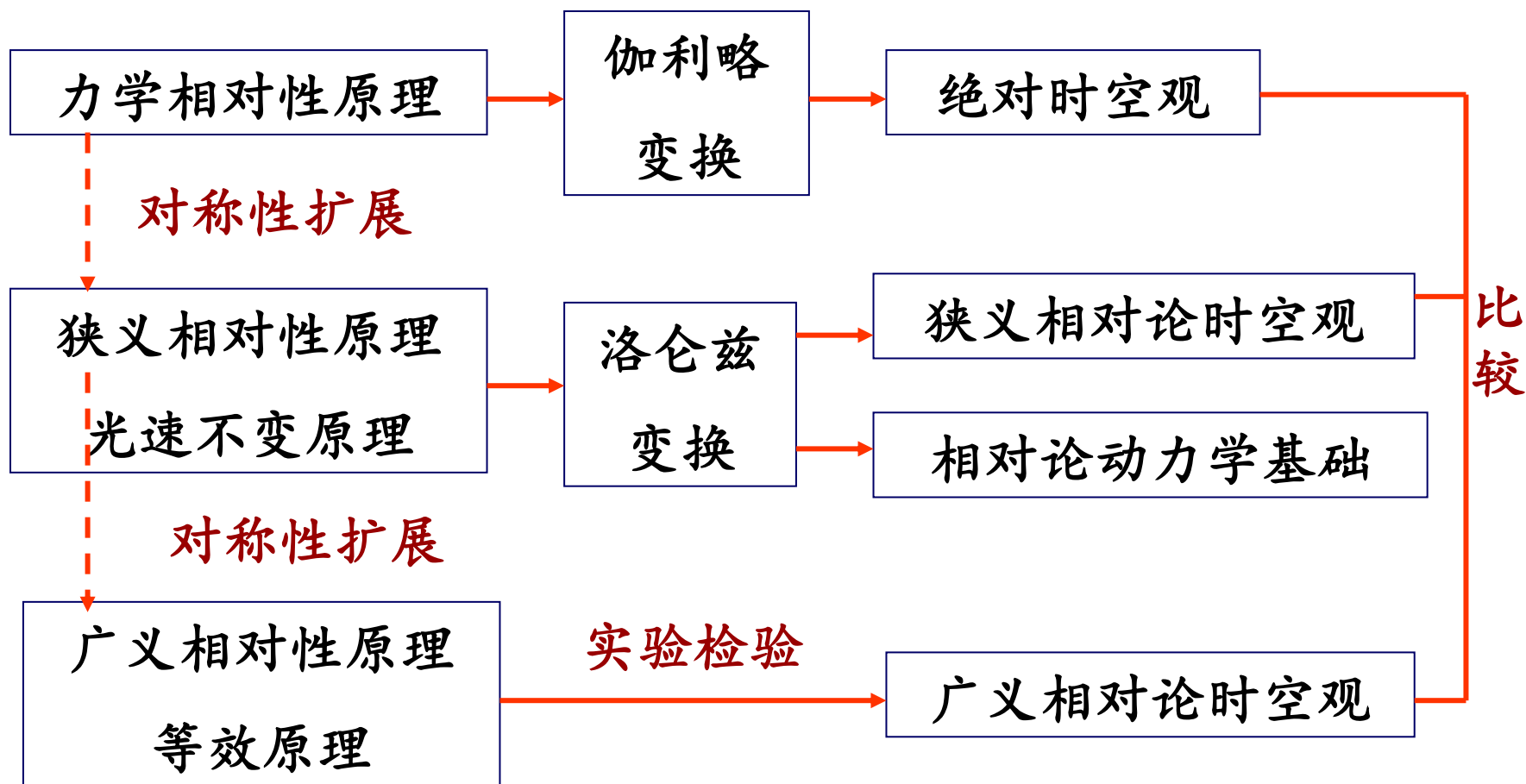


第八章 狭义相对论 *广义相对论简介

结构框图



重点:

狭义相对论的两条基本原理

洛仑兹坐标变换

狭义相对论时空观（“同时”的相对性、钟慢尺缩）

质速关系，质能关系，能量与动量关系

难点:

狭义相对论时空观

*广义相对论的两条基本原理

*时空的几何化，空间弯曲

学时：8（狭义相对论）； 自学*广义相对论简介

相对论产生的历史背景和物理基础

经典物理：伽利略时期 —— 19世纪末

经过300年发展，到达全盛的“黄金时代”

形成三大理论体系

1. **机械运动：**以牛顿定律和万有引力定律为基础的
经典力学
2. **电磁运动：**以麦克斯韦方程组为基础的经典电磁学
3. **热运动：**以热力学定律为基础的宏观理论(热力学)
以分子运动为基础的微观理论(统计物理学)



物理学家感到自豪而满足，**两个**事例：

在已经基本建成的科学大厦中，后辈物理学家只要做一些零碎的修补工作就行了。也就是在测量数据的小数点后面添加几位有效数字而已。

——**开尔芬（1899年除夕）**

理论物理实际上已经完成了，所有的微分方程都已经解出，青年人不值得选择一种将来不会有任何发展的事去做。

——**约利致普朗克的信**



两朵乌云:

1. 迈克尔孙 — 莫雷实验的“零结果”
2. 黑体辐射的“紫外灾难”

实验结果与
理论不符

三大发现:

1. 电子: 1894年, 英国, 汤姆孙
因气体导电理论获1906年诺贝尔物理奖
2. X射线: 1895年, 德国, 伦琴
1901年获第一个诺贝尔物理奖
3. 放射性: 1896年, 法国, 贝克勒尔发现铀, 居里夫妇发现钋和镭, 共同获得1903年诺贝尔物理奖。



物理学还存在许多未知领域, 有广阔的发展前景。

两朵乌云——暴风骤雨——20世纪初物理学危机
物理学正在临产中，它孕育着的新理论将要诞生了。

—— 列宁

新理论：相对论、量子力学，
深刻影响现代科技和人类生活

相对论的思想基础：对称性观念

物理规律不因人（参考系）而异，参考系变换应该是物理定律的对称操作。

一切惯性系对物理定律等价——狭义相对论

惯性系和非惯性系对物理定律等价——广义相对论

相对论并不神秘——需要摆脱日常生活（低速经验领域）的束缚，自觉地进行理性思维训练。



第一节 力学相对性原理 伽利略变换

一、力学相对性原理

二、伽利略变换

三、绝对时空观

四、经典力学定理具有伽利略变换不变性

五、伽利略变换的困难

一、力学相对性原理

原理内容:力学定律在一切惯性系中数学形式不变。

理解:

- 相对于描述力学规律而言,一切惯性系彼此等价。
- 在一个惯性系中所做的任何力学实验,都不能判断该惯性系相对于其它惯性系的运动。

二、伽利略变换

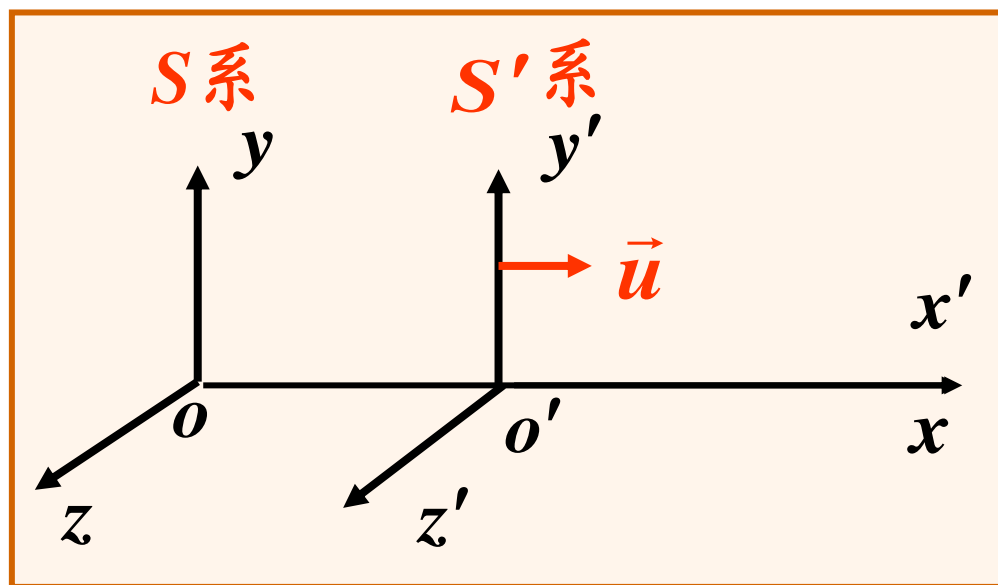
变换：在不同惯性系中对同一物体运动的描述
之间的关联。

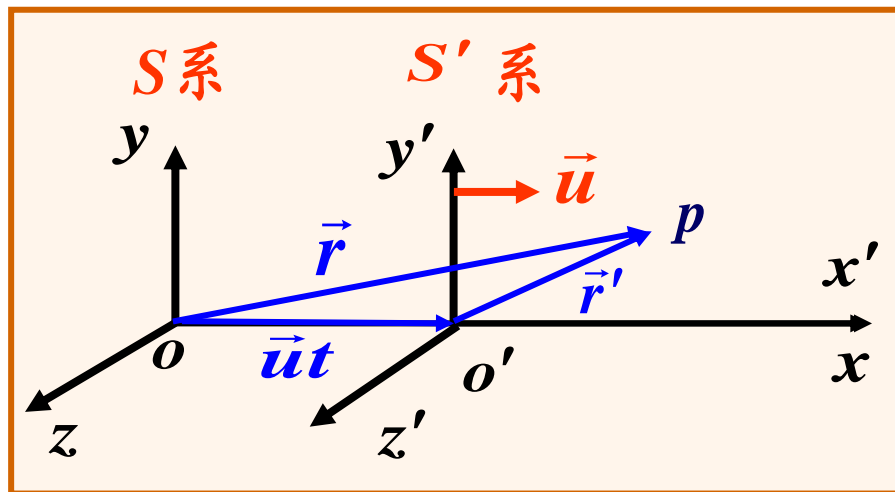
一个惯性系中对物体运动的描述

变换

另一个惯性系中对同一物体运动的描述

S 系和 S' 系坐标轴相互平行，
 S' 系相对于 S 系沿 $+x$ 方向以速率 u 运动，
当 O 和 O' 重合，时，令 $t = t' = 0$ 。





坐标变换分量式:

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = x - ut \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{array} \right.$$

正变换

或

$$\left\{ \begin{array}{l} x = x' + ut \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{array} \right.$$

逆变换

速度变换分量式：

$$\begin{array}{lcl} \text{正变换} & \left\{ \begin{array}{l} v'_x = v_x - u \\ v'_y = v_y \\ v'_z = v_z \end{array} \right. & \text{逆变换} \left\{ \begin{array}{l} v_x = v'_x + u \\ v_y = v'_y \\ v_z = v'_z \end{array} \right. \end{array}$$

伽利略变换中已经隐含了时空观念

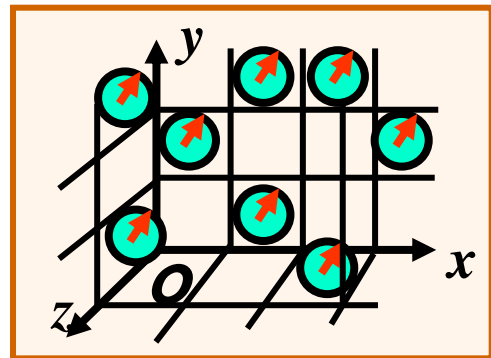
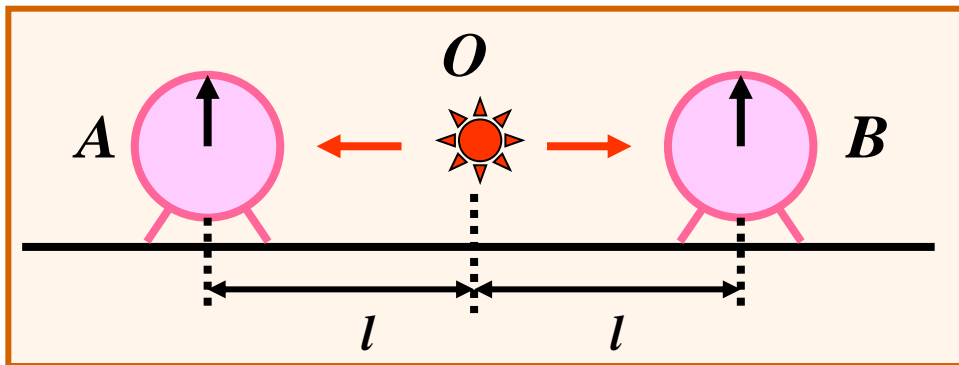
三、绝对时空观

1. 时间：用以表征物质存在的持续性，物质运动、变化的阶段性和顺序性。

时间的测量：“钟”

国际单位：“秒”

校钟
操作：



由此在一个惯性系中的不同地点建立统一的时间坐标
对不同惯性系，伽利略变换中我们默认了：

$$t = t' \quad \text{或} \quad \Delta t = \Delta t'$$

S系与S'系中的钟一旦在O与O'重合时校对好，则读数始终保持相同，不受钟运动状态的影响。

在不同惯性系中测量同一事件发生的时刻或两事件的时间间隔，所得的结果相同。时间测量与惯性系选择无关。

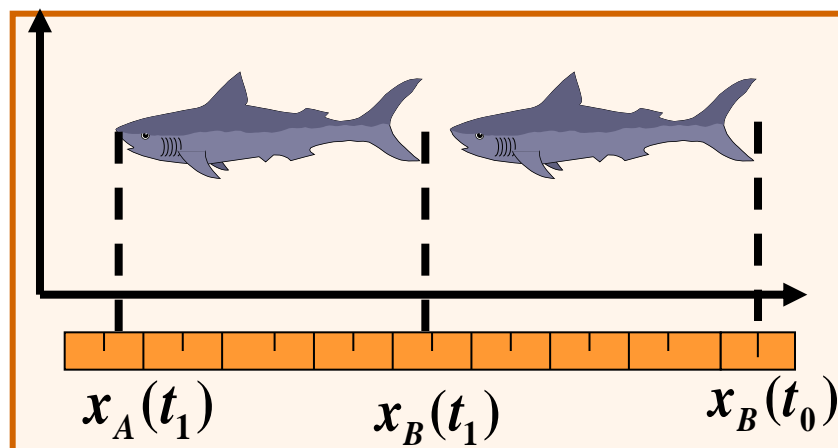
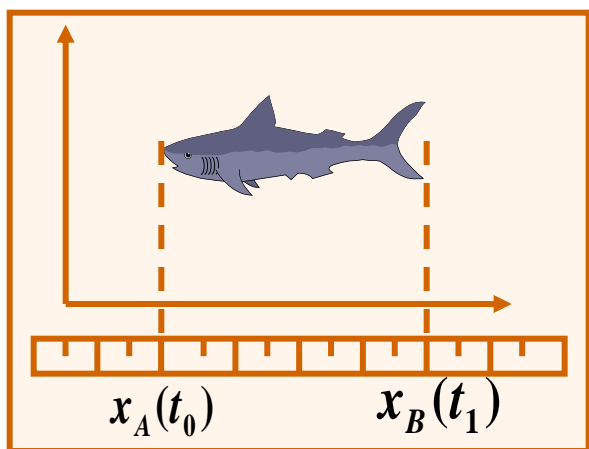


2. 空间

空间测量：刚性尺 国际单位：米

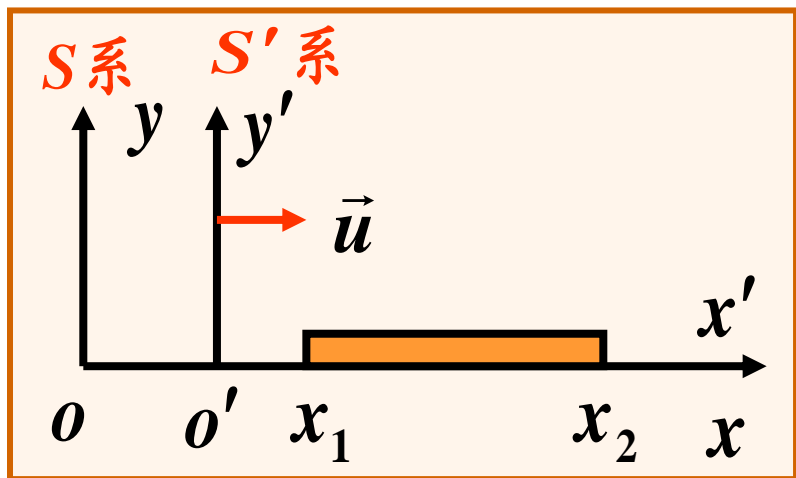
长度的测量：

长度 = 在与长度方向平行的坐标轴上，物体两端坐标值之差



注意：当物体静止时，两端坐标不一定同时记录；
当物体运动时，两端坐标必须同时记录。

设直尺相对于 S 系静止, 在 $x'o'y'$ 中同时测得直尺两端坐标为 x'_1 和 x'_2 , 直尺长度



$\Delta x' = x'_2 - x'_1$

由伽利略变换:

$$x_1 = x'_1 + ut'_1$$

$$x_2 = x'_2 + ut'_2$$

在 S 系中, 直尺长度:

$$\Delta x = x_2 - x_1 = x'_2 - x'_1 + u(t'_2 - t'_1)$$

$$\because t'_1 = t'_2 \quad \therefore \Delta x = x'_2 - x'_1 = \Delta x'$$

即: 尺的长度与其运动状态无关

空间测量与惯性系的选择无关

3. 绝对时空观

- 时间、空间彼此独立，且与物质、运动无关。
- 时间间隔、空间距离的测量与参考系的选择无关。

四、经典力学定理具有伽利略变换不变性

由伽利略速度变换式 $\left\{ \begin{array}{l} v'_x = v_x - u \\ v'_y = v_y \\ v'_z = v_z \end{array} \right.$ 得加速度变换：

$$\left. \begin{array}{l} a_x = a'_x \\ a_y = a'_y \\ a_z = a'_z \end{array} \right\} \vec{a} = \vec{a}' \xrightarrow[m = m']{\text{经典力学}} \vec{F} = m\vec{a} = m'\vec{a}' = \vec{F}'$$

牛顿第二定律及由其导出的一切经典力学定律
在不同惯性系中**数学形式相同**。

四、经典力学定理具有伽利略变换不变性

结论：

1. 不同惯性系中的观察者所观测到的具体力学现象可以不同，但所观测到的力学规律相同。

物理
实在

物理实在
的结构

2. 经典力学规律具有伽利略变换不变性，伽利略变换是经典力学的对称操作。

由**对称性思想**：伽利略变换也应该是其它物理理论的对称操作。

是不是？



四、经典力学定理具有伽利略变换不变性

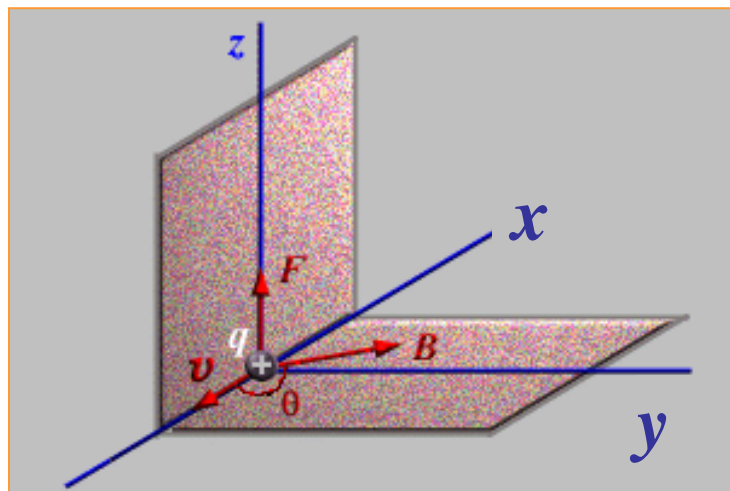
五、伽利略变换的困难

1. 伽利略变换不是经典电磁定律的对称操作

带电粒子受洛仑兹力的大小：

$$F = qvB\sin\theta$$

方向：满足右手螺旋法则，垂直于 \vec{B} , \vec{v} 决定的平面



因速度 \vec{v} 与参考系有关，所以经伽利略变换后洛仑兹力形式将发生变化，经典电磁定律**不具有**伽利略变换的不变性。

推广：一切与速度有关的力都不具有伽利略变换的不变性。

伽利略变换**不是**经典电磁定律的对称操作。

2. 与高速运动(光的传播)的实验结果不符

经典电磁理论和光子实验的测定都确认了光在真空中传播的速率为：

$$c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} \approx 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

与参考系选择**无关**。

按伽利略变换：

$$\begin{cases} v'_x = v_x - u \\ v'_y = v_y \\ v'_z = v_z \end{cases} \quad \text{速度与参考系选择**有关**。}$$

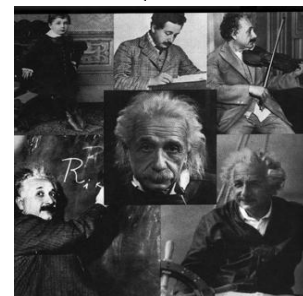
伽利略变换与实验结果**矛盾**！

伽利略变换不是经典电磁定律的对称操作。伽利略变换与实验结果矛盾！

解决困难的途径：

1. 否定相对性原理的普遍性，承认惯性系对电磁学定律不等价，寻找电磁学定律在其中成立的特殊惯性系。
2. 改造电磁学理论，重建具有对伽利略变换不变性的电磁学定律。
3. 重新定位伽利略变换，改造经典力学，寻求对电磁理论和改造后的力学定律均为对称操作的“新变换”。

1、2无一例外遭到失败。3取得成功。



五、伽利略变换的困难

第二节 狭义相对论的基本原理 洛伦兹变换

一、狭义相对论的两条基本原理：

二、洛伦兹变换

一、狭义相对论的两条基本原理

1. 狭义相对性原理

原理内容：一切物理定律在所有的惯性系中都有相同数学形式。

▲ 所有的惯性系对物理规律等价

▲ 是对力学相对性原理的推广

2. 光速不变原理

原理内容：在所有的惯性系中，真空中的光速恒为 c ，与光源或观察者的运动无关。

▲ 是对实验事实的直接表达

光速测定实验结果

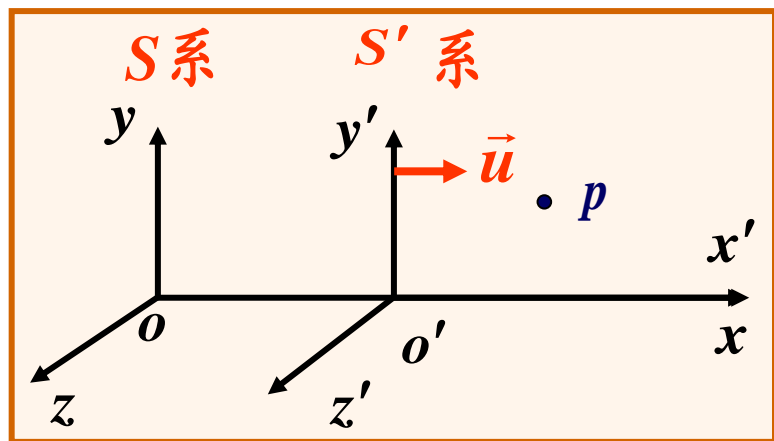
年 代	实 验 者	方 法	测量结果($\times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1729	J. Bradley	恒星光行差	3.04
1849	A. Fizeau	旋转齿轮	3.153
1879	A. Michelson	旋转镜	2.99910 ± 0.00050
1948	Essen 等	微波谐振腔	2.99792 ± 0.000045
1951	Aslakson 等	雷达 Sharan 系统	2.997942 ± 0.000028
1955	Plyler 等	光谱分析	2.99792 ± 0.00006
1958	Froome 等	微波干涉仪	2.9979250 ± 0.0000010
1965	Kolibayev 等	光电测距仪	2.997926 ± 0.0000006
1972	Baird 等	激光 $9 \sim 10\mu \text{CO}_2$	$2.99792460 \pm 0.00000006$
1972	Evanson 等	激光 $3.39\mu \text{CH}_4$	$2.997924587 \pm 0.000000011$
1973	米定义咨询委员会推荐	激光 $3.39\mu \text{CH}_4$	$2.99792458 \pm 0.000000012$
1974	Blaney 等	激光 $9.32\mu \text{CO}_2$	$2.99792459 \pm 0.000000008$

二、洛伦兹变换

1. 坐标变换

S 系 $P(x, y, z, t)$ 寻找 S' 系 $P(x', y', z', t')$

同一客观事件 P 在两个惯性系中相应的坐标值之间的关系。

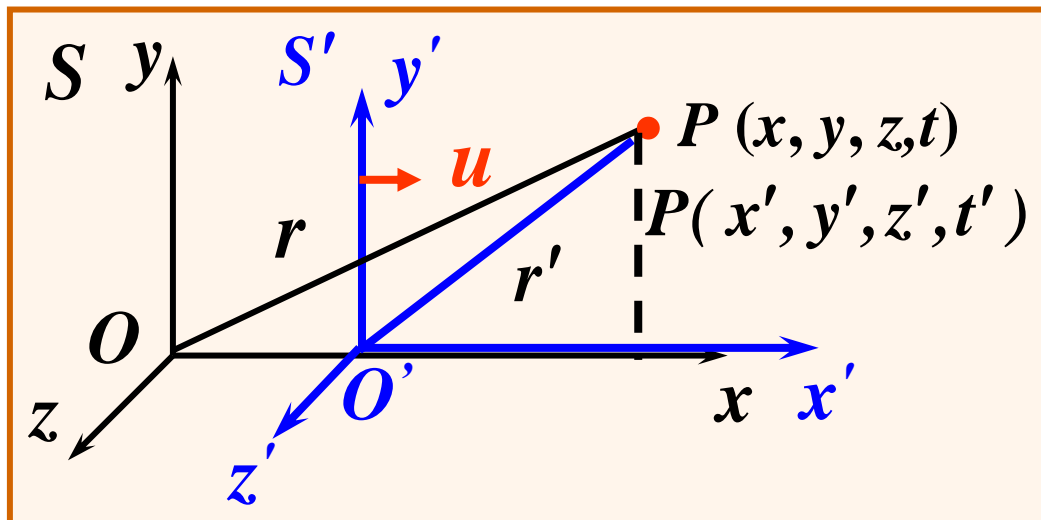


设当 O, O' 重合时 $t = t' = 0$,
且由 $O(O')$ 发出光信号。

光信号到达 P :

$$S : P(x, y, z, t)$$

$$S' : P(x', y', z', t')$$



在 S , S' 中,
真空中光速均为 c

$$S \text{ 系中: } r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = ct$$

$$S' \text{ 系中: } r' = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2} = ct'$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0$$

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = 0$$

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0$$

又 S 、 S' 系只在 x 方向有相对运动，则：

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

$$\therefore x'^2 - c^2 t'^2 = x^2 - c^2 t^2$$

显然，伽利略变换 **不满足** 上式。

设 x 坐标变换满足线性关系：

$$\left. \begin{aligned} x' &= k(x - ut) \\ x &= k'(x' + ut') \end{aligned} \right\} k = k' = \frac{1}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}$$

(推证见教材162页)

洛伦兹坐标变换：

正变换

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{u}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \end{array} \right.$$

逆变换

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \frac{t' + \frac{u}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \end{array} \right.$$

$$\text{令 } \beta = \frac{u}{c} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \text{ 得}$$

正变换

逆变换

$$x' = \gamma(x - ut)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{u}{c^2}x\right)$$

$$x = \gamma(x' + ut')$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = \gamma\left(t' + \frac{u}{c^2}x'\right)$$

注意: (1) $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-u^2/c^2}} > 1$

(2) 若 S' 系相对于 S 系沿 $+x$ 轴以速率 u 运动, u 为正值; 若沿 $-x$ 轴运动, u 为负值。

作笔记

2. 速度变换

设 S 系: $\vec{v}(v_x, v_y, v_z)$ S' 系: $\vec{v}'(v'_x, v'_y, v'_z)$

根据速度定义得: $v'_x = \frac{dx'}{dt'}$

$$\because x' = \gamma(x - ut) \quad \therefore dx' = \gamma(dx - u dt)$$

$$\because t' = \gamma\left(t - \frac{u}{c^2}x\right) \quad \therefore dt' = \gamma\left(dt - \frac{u}{c^2}dx\right)$$

$$\therefore v'_x = \frac{dx - u dt}{dt - u dx/c^2} \stackrel{(v_x = \frac{dx}{dt})}{=} \frac{v_x - u}{1 - uv_x/c^2}$$

同理可得: v'_y, v'_z

速度变换公式

$$\begin{cases} v'_x = \frac{v_x - u}{1 - uv_x/c^2} \\ v'_y = \frac{v_y}{\gamma(1 - uv_x/c^2)} \\ v'_z = \frac{v_z}{\gamma(1 - uv_x/c^2)} \end{cases}$$

正变换

$$\begin{cases} v_x = \frac{v'_x + u}{1 + uv'_x/c^2} \\ v_y = \frac{v'_y}{\gamma(1 + uv'_x/c^2)} \\ v_z = \frac{v'_z}{\gamma(1 + uv'_x/c^2)} \end{cases}$$

逆变换

3. 洛伦兹变换的意义

(1) 洛伦兹变换是不同惯性系中时空变换的普遍公式。

$$u \ll c \quad \frac{u}{c} \rightarrow 0 \quad \gamma \rightarrow 1$$

$$x' = \gamma(x - ut)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{u}{c^2}x\right)$$

$$x' = x - ut$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

伽利略变换！

伽利略变换必须在 $u \ll c$ 时才成立。

(2) 与光速不变原理、真空中光速为极限速率的实验事实相协调。

$$\text{由 } v'_x = \frac{v_x - u}{1 - uv_x/c^2} \text{ 得, 当 } v_x = c \text{ 时}$$

$$v'_x = \frac{c - u}{1 - u/c} = c$$

$$\text{又 } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \rightarrow \frac{u^2}{c^2} < 1 \rightarrow u < c$$

(3) 建立了新的时空观 (第三节)

(4) 给出了对物理定律的约束条件：相对论的对称性，即物理定律在洛伦兹变换下的不变性。