

第二十章 狭义相对论基础 (Foundation of Special Relativity)

前言：相对论产生的历史背景

经典物理：伽利略时期 —— 19世纪末

经过300年发展，达到全盛的“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**：以麦克斯韦方程为基础的电动力学；
3. **热运动**：以热力学三定律为基础的宏观理论、统计物理描述的微观理论。

当时的物理学家认为物理学的大厦已经建成：

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

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。——开尔文

（1899年除夕演讲）

然而，当研究由宏观低速领域进入微观高速领域时，经典理论实际上已遇到了严重障碍，所以开尔文在上述演讲中又同时指出：

“但是，在物理学晴朗天空的远处，还有两朵令人不安的乌云，----”

两朵乌云？

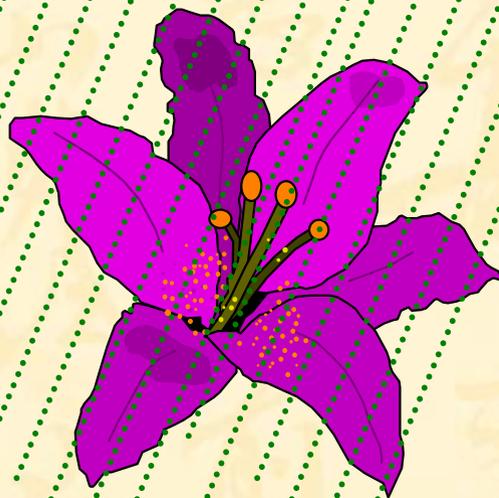
迈克尔逊-莫雷
实验的零结果

黑体辐射的
“紫外灾难”

而后来正是这两朵乌云发展为一场物理学革命的风暴，乌云落地化为一场春雨，孕育浇灌出两朵鲜花：



相对论问世



量子力学诞生

§ 20-1 伽利略变换和力学相对性原理

(Galileo Transformation and Relativistic Principle of Mechanics)

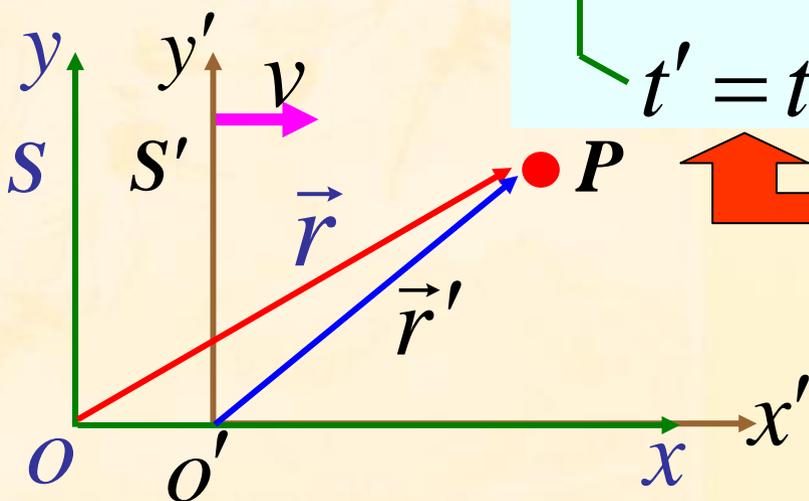
一、伽利略坐标变换与绝对时空观

两系中 P 点的时空坐标变换：

设 $t=t'=0$ ，
 o 与 o' 重合

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad \text{正变换}$$

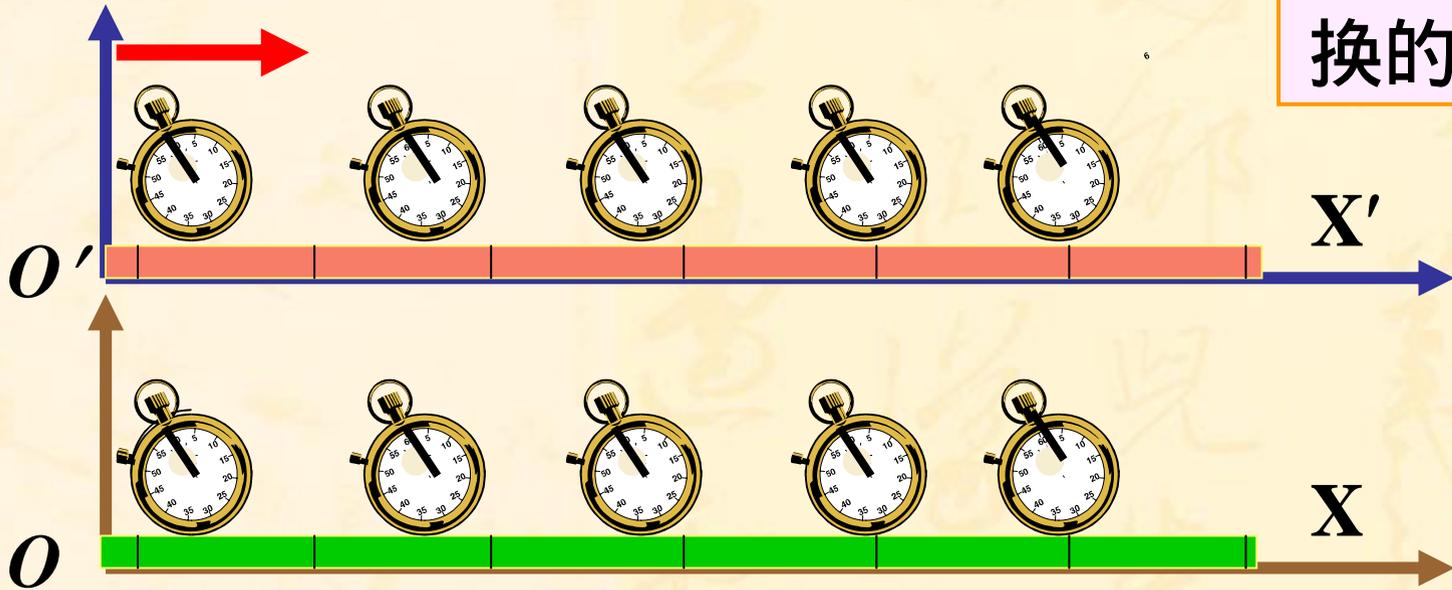
$$\begin{cases} x = x' + vt' \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases} \quad \text{逆变换}$$



伽利略坐标变换

O 、 O' 重合时，较准 ($t_1=t_2'$)

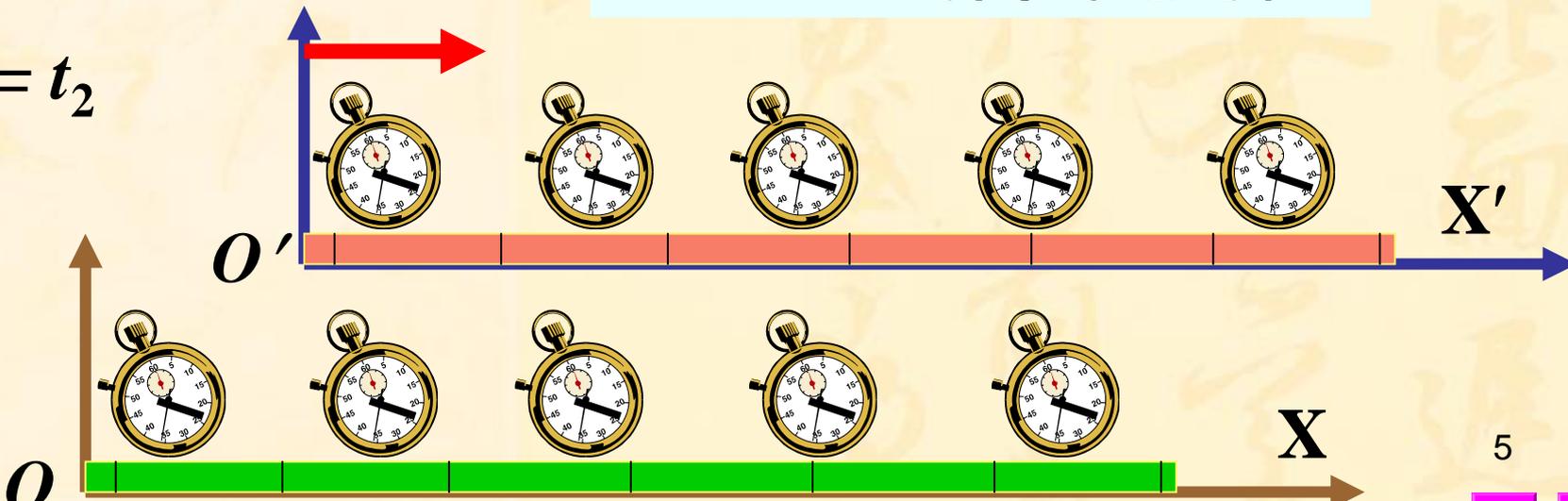
伽利略变换的结果

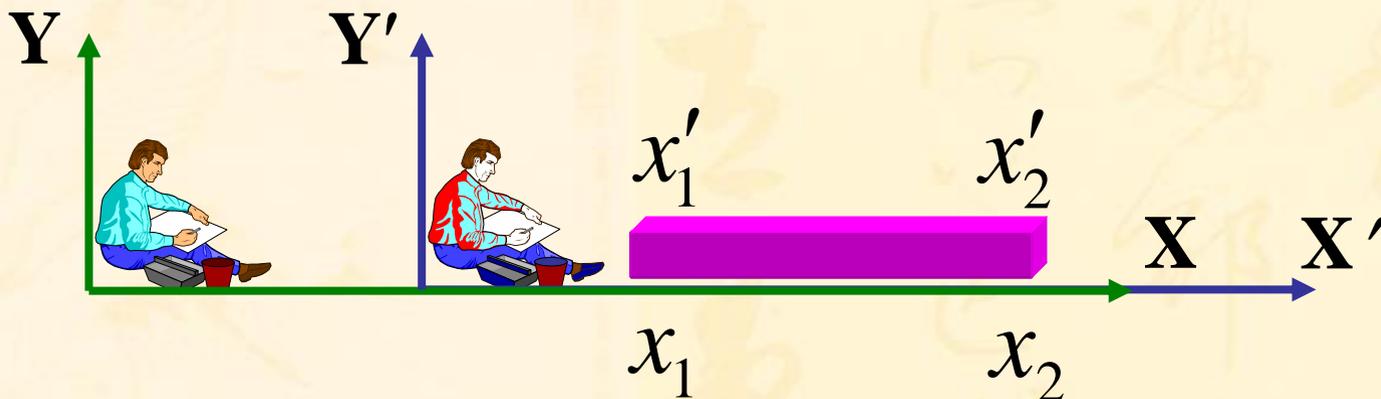


t_2 时刻：

$\Delta t = \Delta t'$ 时间的绝对性

$t_2' = t_2$





S' 系测得长度

$$l' = x'_2 - x'_1$$

S 系测得长度

$$l = x_2 - x_1$$

$$l' = x'_2 - x'_1 = (x_2 - vt_2) - (x_1 - vt_1)$$

$$= x_2 - x_1 = l \quad (t_2 = t_1) \quad \text{空间的绝对性}$$

结论：时间和长度的测量与参照系无关。

$$\Delta t = \Delta t'$$

$$\Delta \vec{r} = \Delta \vec{r}'$$

绝对时空观

牛顿本人对时空的描述：

绝对空间就其本质而言，是与任何外界事物无关的，而且是永远相同和不动的。——牛顿

绝对的数学的时间流逝着，并且由于它的本性而均匀地与外界无关地流逝着。——牛顿

牛顿的绝对时空观：

空间先于运动存在，是盛放物质的容器和物质运动的舞台。

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

二、伽利略变换与力学相对性原理

对伽利略坐标变换公式分别求一次和二次导数得到速度和加速度变换公式：

正变换 $\vec{u}' = \vec{u} - \vec{v}$

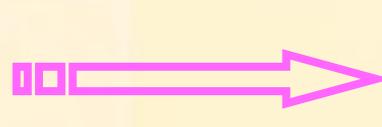
逆变换 $\vec{u} = \vec{u}' + \vec{v}$


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

同一质点的加速度在不同参照系中测出的结果是相同的。

在牛顿力学中，质量 m 与速度 v 无关：

$$m' = m$$


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

三、力学相对性原理

经过伽利略变换，牛顿定律形式不变： $\vec{F}' = \vec{F}$

力学的其它规律，如各种守恒定律，都可由牛顿定律导出，**结论**：

宏观低速运动物体的力学规律在任何惯性系中形式都相同。

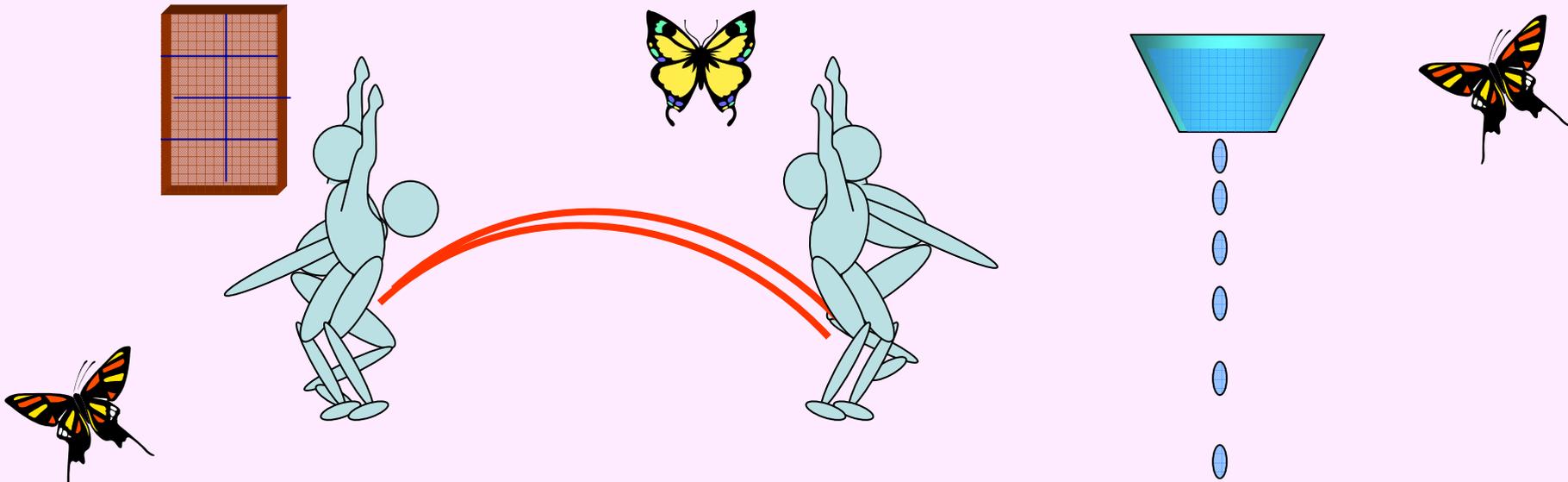
或者说：

在彼此作匀速直线运动的所有惯性系中，一切力学规律都是相同的。

力学相对性原理

(伽利略相对性原理)

对力学相对性原理的实验说明



1632年Galileo曾在一只叫“萨尔瓦阿蒂”的密闭大船上作过实验

力学相对性原理的涵义：

从力学规律来讲，所有惯性系是等价的，不存在一个比其它惯性系更特殊的惯性系。

在一个惯性系中，无法通过力学实验来确定这个惯性系相对另一惯性系的运动。

伽利略简介



三
流
面
未
比
面
遲

§ 20-2 狭义相对论的基本原理 (Basic principle of special relativity)

一、牛顿力学的困难

1. 伽利略变换与电磁定律之间的矛盾

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

设 q 对于 S 系静止，而对 S' 以 v 运动，则由伽利略变换得出

$$\vec{F} = \vec{F}_e, \quad \vec{F}' = \vec{F}_e + \vec{F}_m = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2} \vec{F}_e$$

$$\vec{F}' \neq \vec{F}$$

经典电磁定律不满足伽利略变换的协变性！

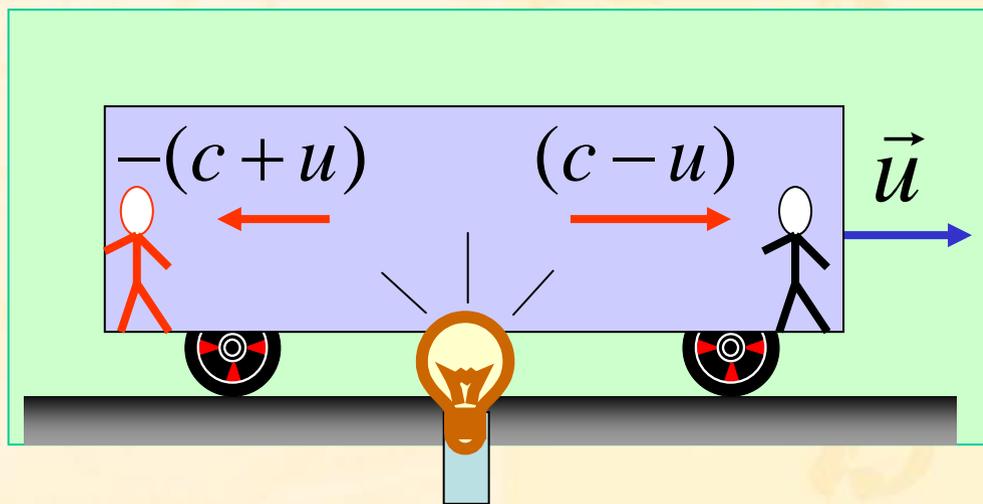
2. 光速不变与伽利略变换之间的矛盾

由经典电磁理论，真空中的光速：

$$c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad \text{与参考系选择无关}$$

由伽利略变换，速度与参考系选择有关：

$$\vec{v}_{\text{光对车}} = \vec{v}_{\text{光对地}} - \vec{v}_{\text{车对地}}$$



彼此矛盾！

3.寻找光以太（绝对参照系）的失败

光的传播与绝对参照系（光以太）

按照牛顿机械论观点将光波与机械波相比拟：

机械波

依靠弹性媒质传播。

波速→波相对于静止媒质参考系的速度。

光（电磁波）

依靠弥漫宇宙的“以太”（Aether）传播。

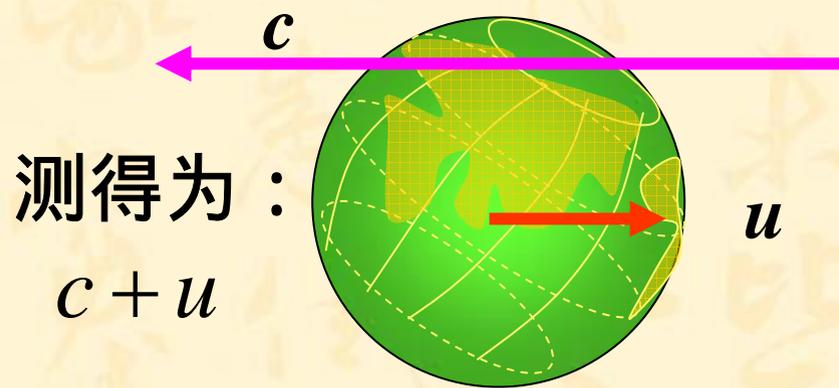
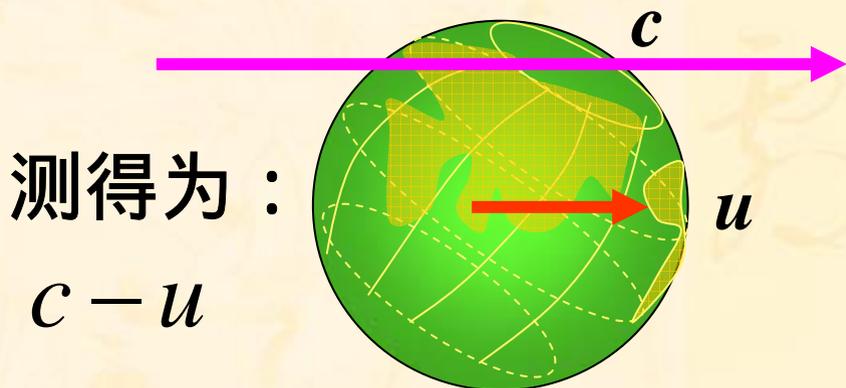
c → 光相对“以太”参照系（静止以太的参照系）的速度。

推论：整个宇宙间存在一特殊的、绝对静止的参照系---以太参照系，Maxwell方程也只对绝对静止的“以太”参照系成立。

迈克尔逊---莫雷实验的零结果

目的：寻找“以太”

思路：光和地球相对以太的速度分别为 c 和 u ，将地球看作运动参照系，依伽利略变换，地球上测出的光速不是 c 而是另一值：



实验原理：光的干涉。通过观测干涉条纹的移动来测量光速、精度很高。

实验精度可达0.01个条纹移动，按推测应该出现0.4个条纹移动。

实验结果：没有看到预期的条纹移动（零结果）。

假设其它可能影响光速的因素：“光速与光源运动有关”、“地球对光以太的曳引作用”等，但又被诸如光行差实验、双星实验等天文上的实验所否定。

实验事实：

光速 c 与参考系无关，与光源和观察者的运动无关。

反思：牛顿理论的绝对时空观在新的实验事实面前出现了危机。

出路：冲破传统思想、经典理论的束缚，在大量的实验事实面前创建新理论。

相对论时空观的创立-----

爱因斯坦 (Albert Einstein 1879--1955)

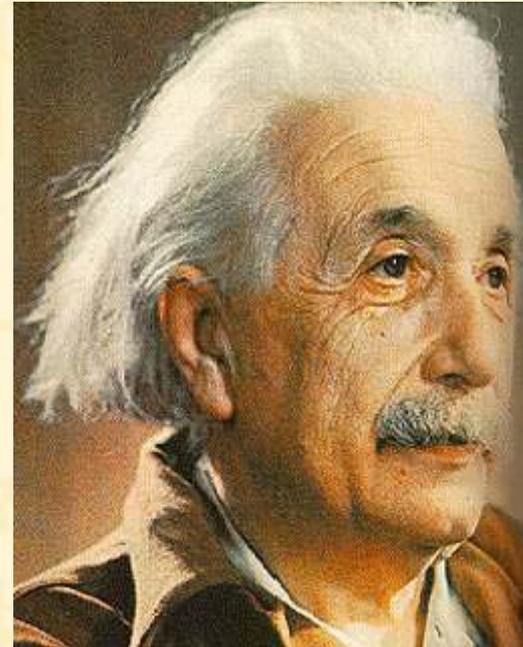
1905年，年仅26岁的爱因斯坦提出了两条基本假设，并在此基础上建立了狭义相对论（1916年又发表了广义相对论）。

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



二、狭义相对论的两条基本假设

相对性原理----在彼此相对作匀速直线运动的所有惯性系中，一切物理规律都是等价的。

或者说：在任何惯性系中，一切物理定律都具有相同的形式。

光速不变原理----在所有惯性系中，真空中的光速沿任意方向恒为 c ，且与光源和观察者的运动状态无关。

光速不变原理的适用条件：

A) 惯性系；B) 真空（介质中 $c_n=c/n$ ）

讨论

爱因斯坦相对性原理是伽利略力学相对性原理的发展。

它指出：不仅在力学范围，而且在一切物理现象中，所有惯性系都是等价的。

爱因斯坦理论

一切物理规律

牛顿理论

力学规律

不论是力学实验还是其它任何物理实验都不能判定一个惯性系比另一个更特殊。否定了绝对参考系的存在。

光速不变原理与伽利略的速度相加原理针锋相对。

观念上的变革

牛顿力学

时间标度
长度标度
质量的测量

与参考系无关；

狭义相对论力学

光速不变



长度、时间测量的相对性。

三、洛仑兹坐标变换公式

此变换关系首先由荷兰人Lorentz采用并作出解释。他指出在此变换下麦克斯韦方程在不同的惯性系中具有相同的形式。

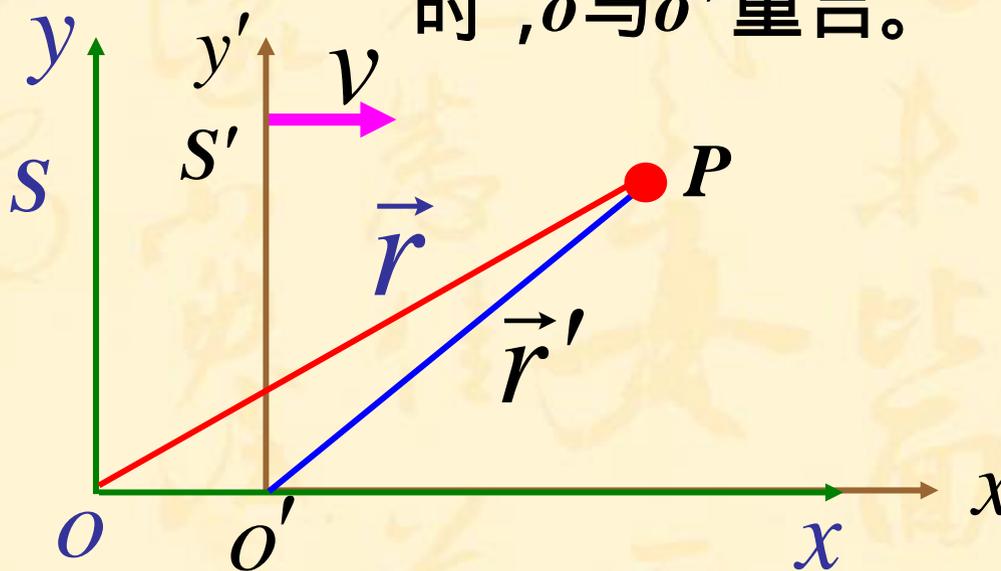
P 点在两系中的时空坐标：

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

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

由爱因斯坦相对性原理可直接推出两系的坐标变换(洛仑兹变换):

设 $t = t' = 0$
时, o 与 o' 重合。



洛仑兹坐标变换：

正变换

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

逆变换

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

其中： $\beta = \frac{v}{c}$ $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$

讨论

1) 当 $v \ll c$, $\beta \rightarrow 0, \gamma \rightarrow 1$

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

则洛仑兹变换公式退化为伽利略变换。

牛顿力学是相对论力学在低速情况下的特例。

$$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

2) 时空坐标量须为实数 ($\sqrt{1 - \beta^2}$ 为实数), 必须有 $v < c$, 否则失去了时空坐标的意义。

可见: 自然界中任何物体的(相对)速度都不可能超过真空中的光速 c , c 是自然界的极限速度。

3) 时、空相互包含, 时间与空间不可分割。