

*University Physics*

# 大学物理

大学  
物理



## 第8章 相对论

- 量子论和相对论是现代物理学的两大支柱

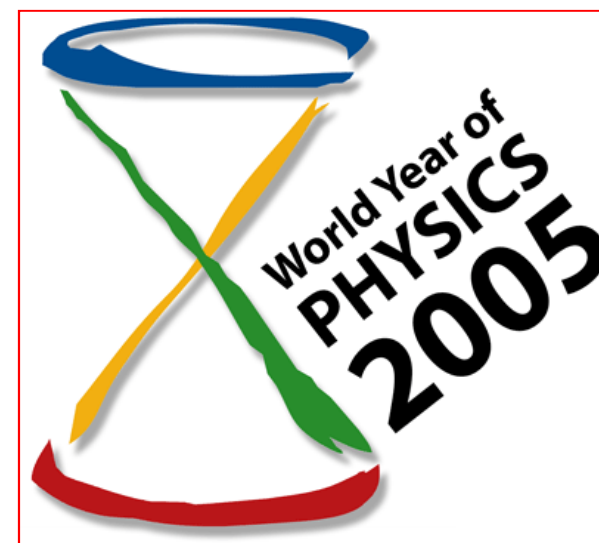
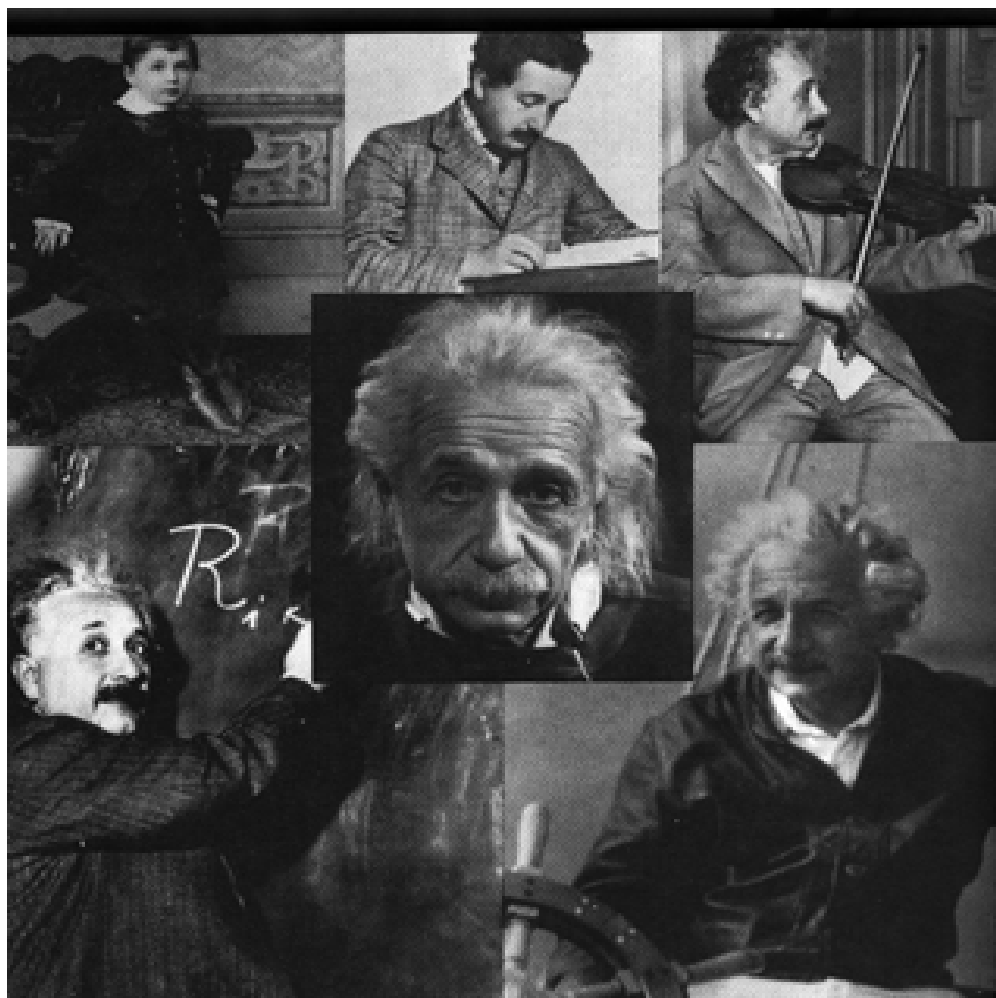


爱因斯坦和量子理论的创始人普朗克





## 第8章 相对论



阿尔伯特.爱因斯坦（1879 —1955）

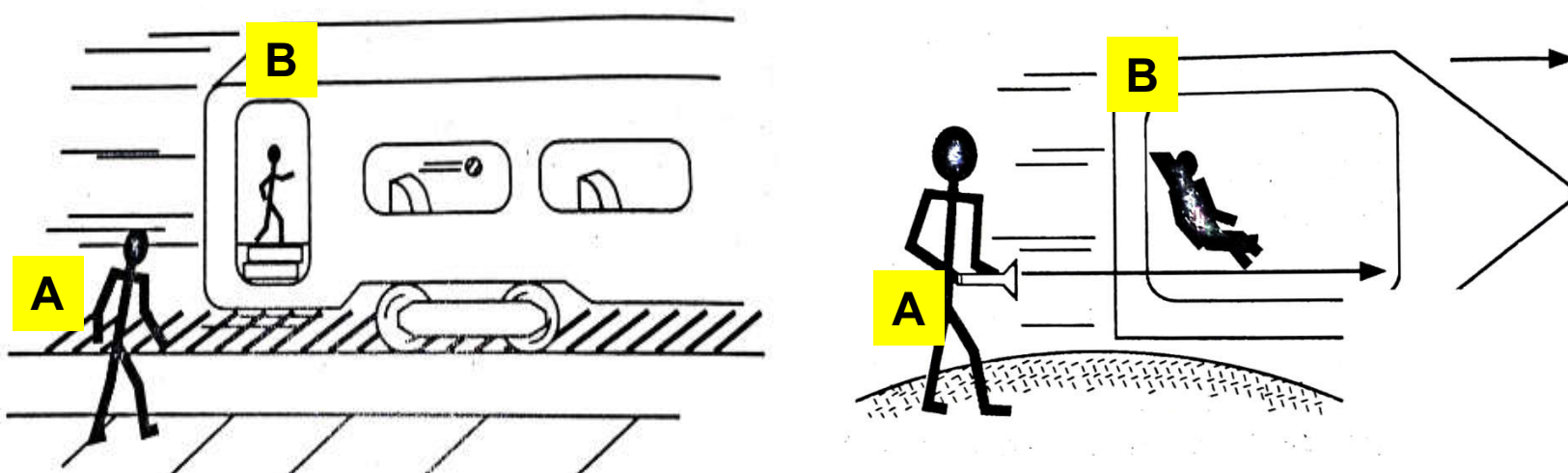




## 第8章 相对论

### 引言：相对论的思想基础

相对论诞生的思想基础来自于对称性观念：物理定律不因地、因时、**因人而异**！



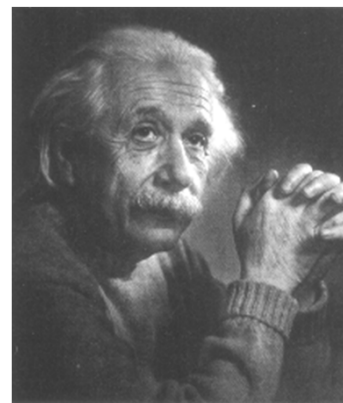
任何回答有关相对运动中观察者的问题的物理理论就是**相对性理论**。





### 物理定律不因人而异

自然规律的客观性，不应受到参考系主观选择的随意性的影响，因此物理规律(自然定律)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。



一切惯性系对力学定律等价 —— 力学相对性原理

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





## 第8章 相对论

力学相对性原理



狭义相对性原理



广义相对性原理

对称性  
扩展

所谓常识不过是你年满18岁之前心中成见的淀积

相对论并不神秘——它是最脚踏实地的一种理论，是经过千百次实践检验的真理。只要我们摆脱日常生活经验的束缚，自觉地进行理性思维训练就能很好地理解它。

重点：

相对论基本原理；  
洛仑兹变换；  
时空观、物质观的深化。







### § 8.1 力学相对性原理 伽利略变换



萨维阿奇大船道出了一条极为重要的真理，即：从船中发生的任何一种现象里，你是无法判断船究竟是在匀速运动还是在停着不动。现在称这个论断为力学相对性原理。





理解：

- 在伽利略的描述里，力学相对性原理成立的条件是匀速的没有晃动的船。以后引进了惯性系概念，力学相对性原理就建立在惯性系上了。
- 对于描述力学规律而言，一切惯性系彼此等价，力学定律在一切惯性系中数学形式相同。

力学相对性原理是直接归纳经验的结果。

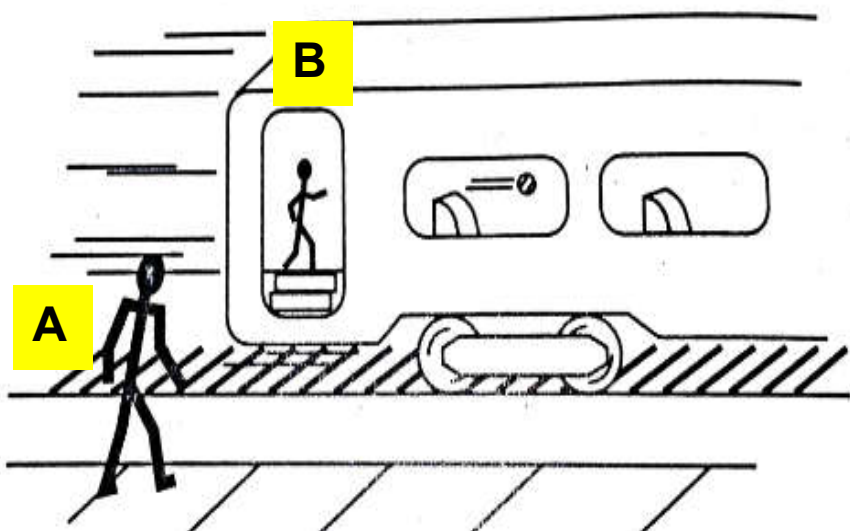






### 二、伽利略变换

任何相对论性理论都要提出的标准问题是，如何将一个参考系中得到的测量结果与另一参考系中得到的测量结果进行比较？



伽利略-牛顿根据他们对时间、空间的认知，建立了各惯性系之间的时空变换关系，即伽利略变换。

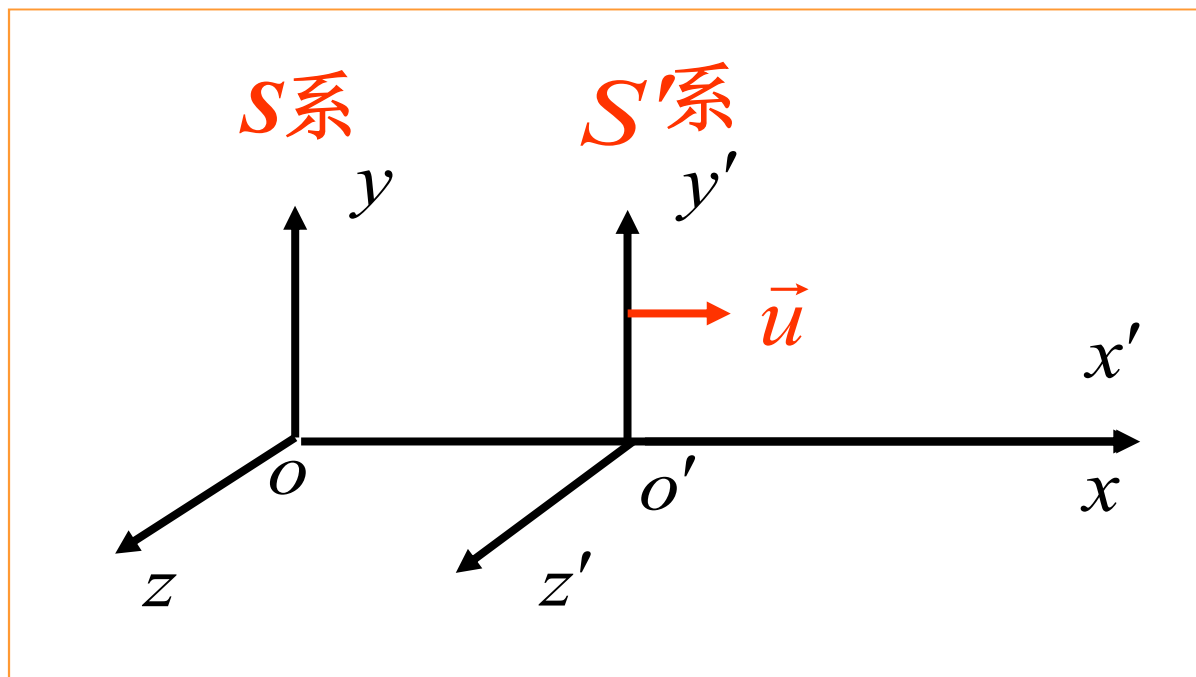


### 二、伽利略变换

$S$ 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  $t = t' = 0$





## 第8章 相对论

坐标变换:

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{u}t$$

速度变换:

$$\vec{v}' = \vec{v} - \vec{u}$$

坐标变换分量式:

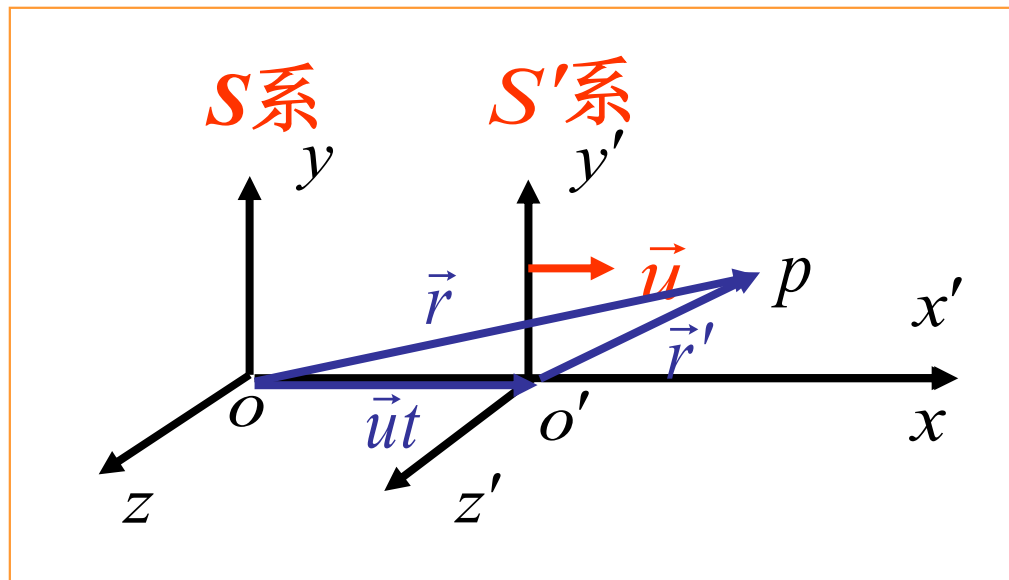
$$\left\{ \begin{array}{l} x' = x - ut \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{array} \right.$$

正变换

或

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

逆变换





## 第8章 相对论

速度变换分量式:

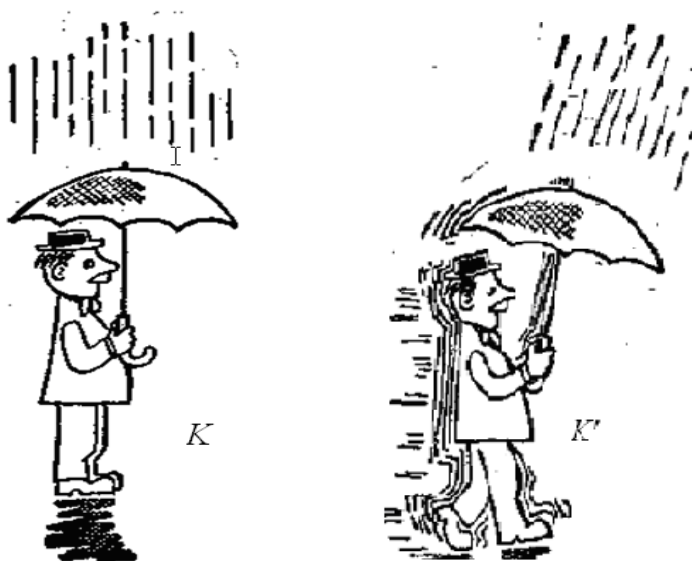
$$\text{正变换} \begin{cases} v'_x = v_x - u \\ v'_y = v_y \\ v'_z = v_z \end{cases}$$

$$\text{逆变换} \begin{cases} v_x = v'_x + u \\ v_y = v'_y \\ v_z = v'_z \end{cases}$$



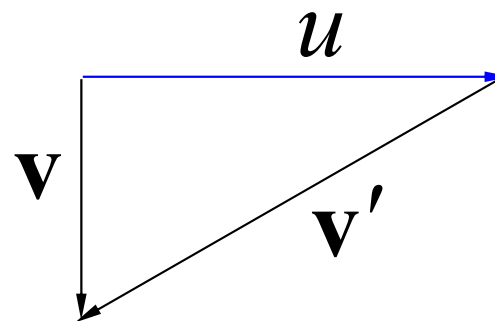
## 第8章 相对论

### 伽利略变换满足经典的速度合成定律



### 经典速度合成定律

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u}$$





### 三.绝对时空观

伽利略、牛顿根据他们对时间、空间的认识，建立起了不同惯性系间时空变换关系之伽利略变换。那么他们所认识到的时空是什么样的时空呢？由于物理学是一门实验科学，物理规律都是从实验而且大都是从定量的实验中总结出来的。因此，在研究空间和时间的物理问题时，首先应当了解**时间和空间是怎样量度**的。

如果你不问我什么是时间，我对它倒还能意会；你一问起我，我就不知道怎么言传了。——奥古斯丁





### 1. 时间的量度

时间的测量：“钟”

任何周期性过程均可用来计量时间。例如：行星的自转或公转；单摆；晶体振动；分子、原子能级跃迁辐射.....

国际单位：“秒”

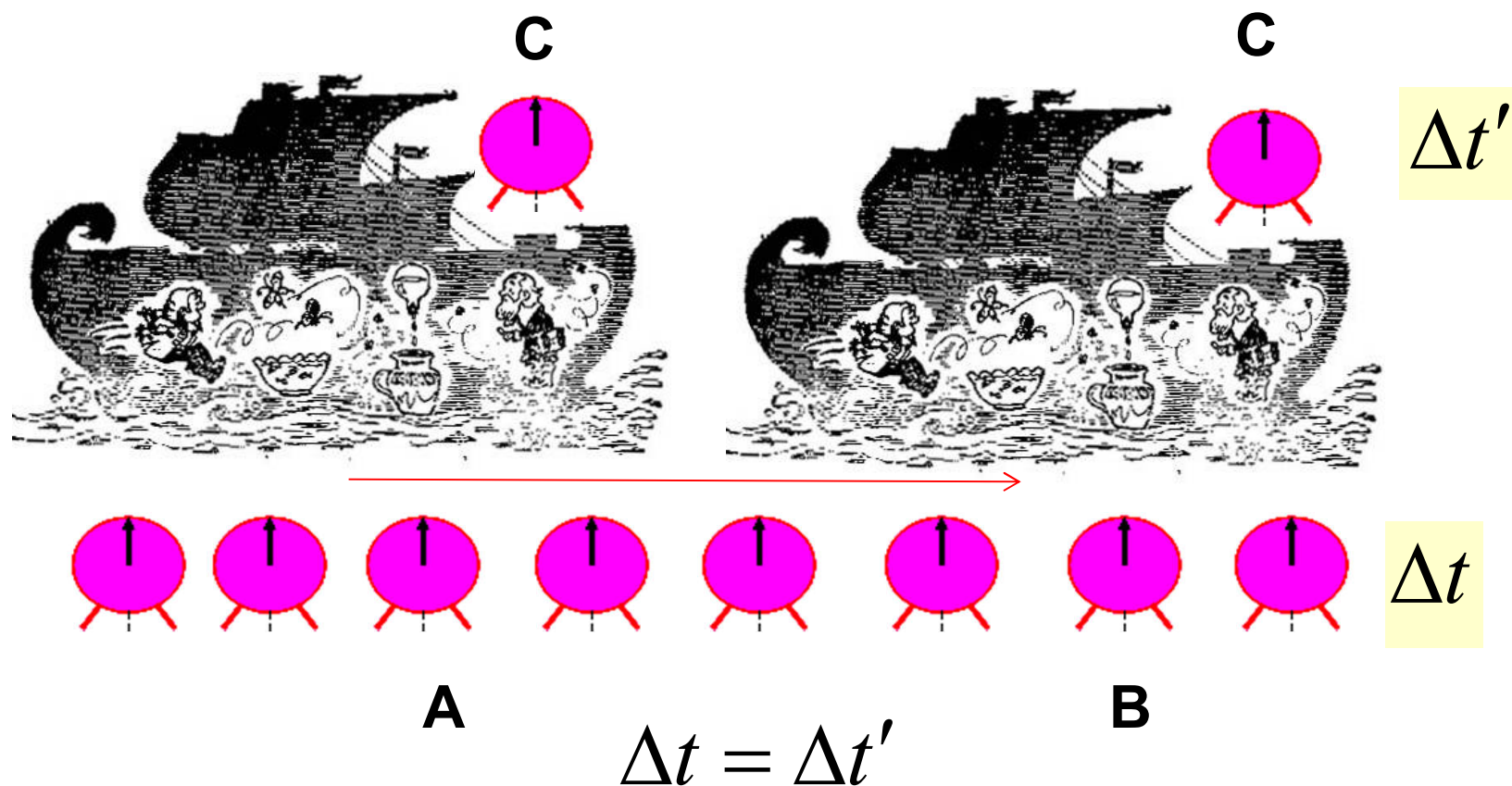
与铯133原子基态两个超精细能级之间跃迁相对应的辐射周期的9,192,631,700倍(精确度 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ )







## 第8章 相对论



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。





### 2. 空间的量度

用以表征物质及其运动的广延性

空间测量：刚性尺

国际单位：米

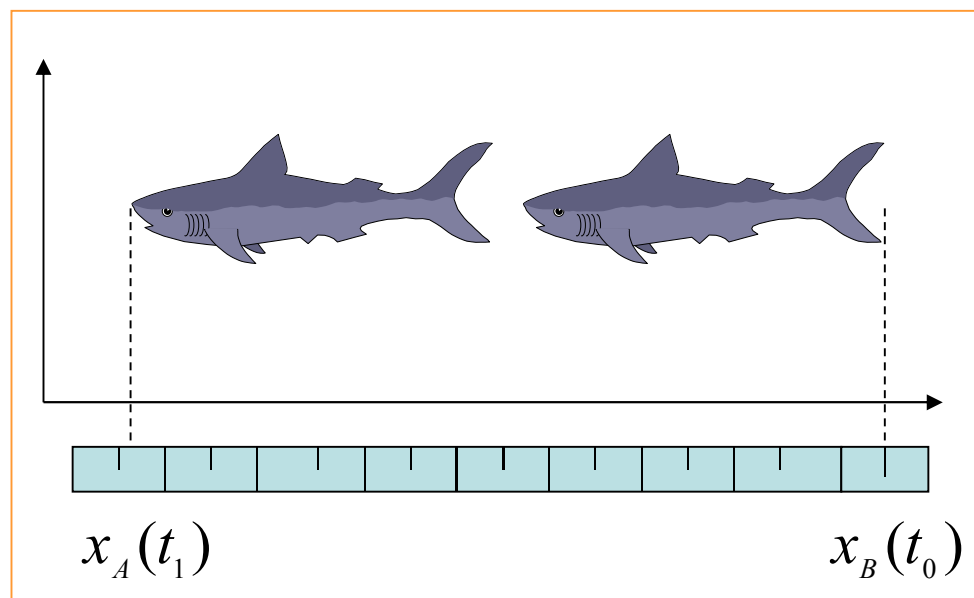
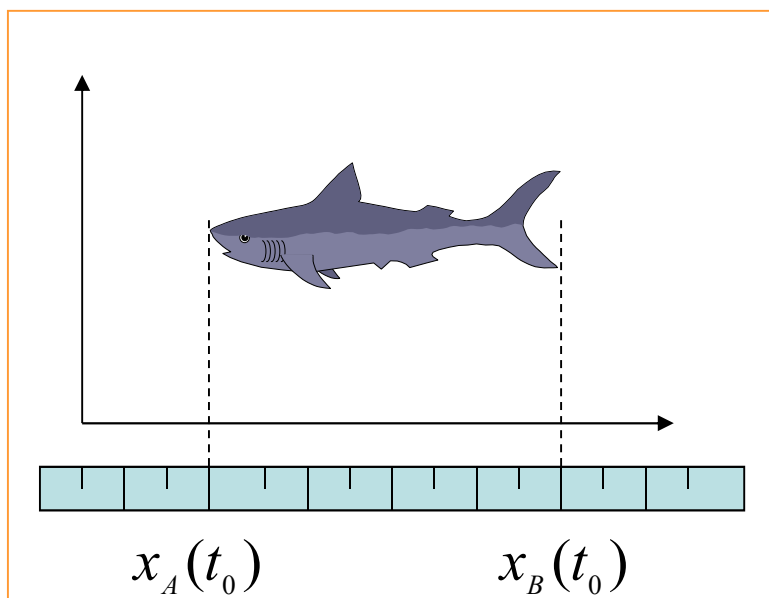
光在真空中  $(299792458)^{-1}$  秒的时间间隔内传播的距离。





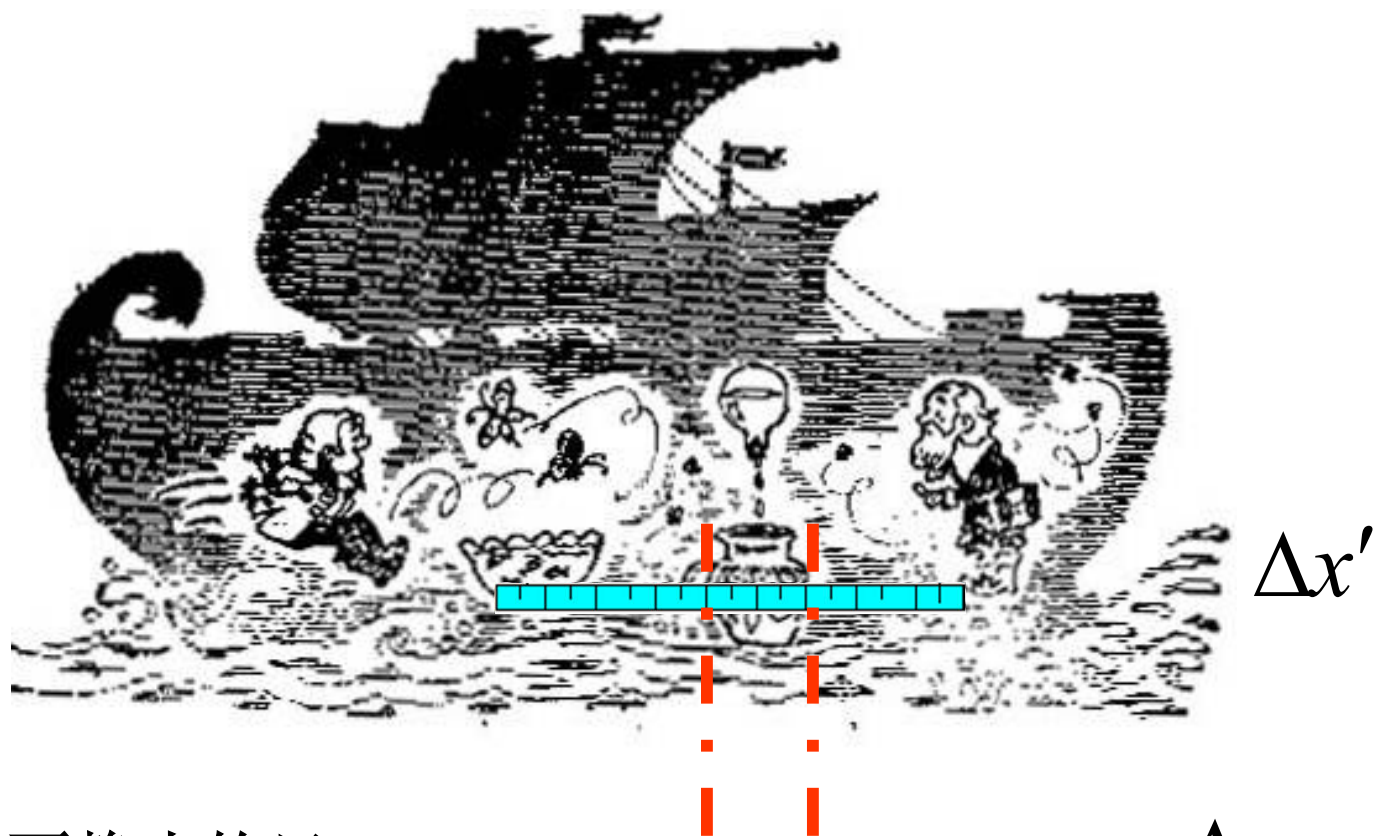
## 第8章 相对论

**注意：**测量长度时总是选用相对于本参考系静止的尺去测量。当物体运动时，两端坐标必须同时记录。





## 第8章 相对论



相对地面静止的尺



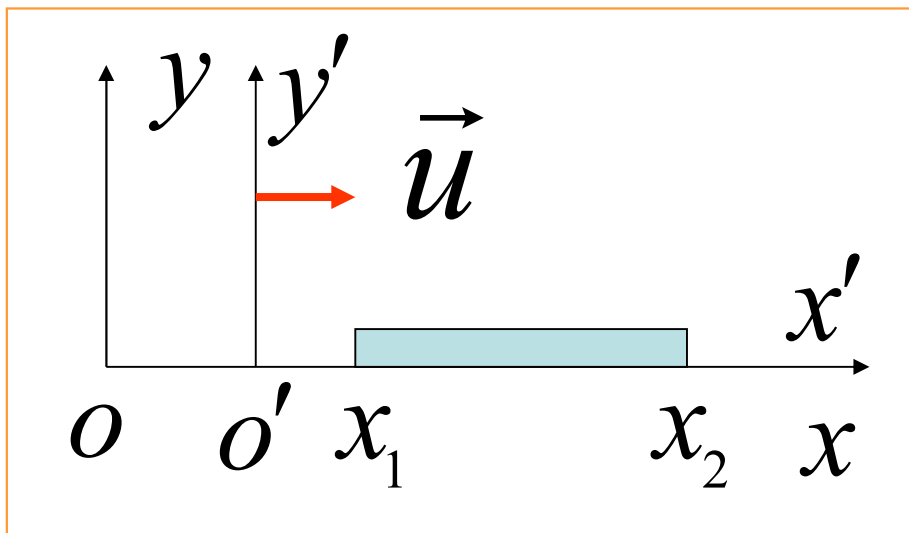
$\Delta x$

$$\Delta x = \Delta x'$$





## 第8章 相对论



由伽利略变换:

$$x'_1 = x_1 - ut_1$$

$$x'_2 = x_2 - ut_2$$

直尺长度

$$\Delta x = x'_2 - x'_1 = x_2 - x_1 - u(t_2 - t_1)$$

$$\because t_1 = t_2 \quad \therefore x_2 - x_1 = x'_2 - x'_1$$

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，而且与物质、运动无关。

↓  
先验框架

- 时间间隔、空间距离的测量与参考系的选择无关。

绝对的、真正的时间和数学的时间自身在流逝着，而且，由其本性而在均匀地、与任何其它外界事物无关地流逝着。

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。空间先于运动存在，是盛放物质的容器和物质运动的舞台。





### 四．力学相对性原理与伽利略变换相协调

要求力学定律在一切惯性系中数学形式相同

是否协调

给出不同惯性系中对运动描述的关联

由伽利略速度变换

得加速度变换：

$$a_x = a'_{x'}$$

$$a_y = a'_{y'}$$

$$a_z = a'_{z'}$$

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

先验条件

$$m = m'$$

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

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

$$\begin{cases} v'_{x'} = v_x - u \\ v'_{y'} = v_y \\ v'_{z'} = v_z \end{cases}$$





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。

### 相对性原理的推广

自然界有各种各样的现象和规律，但是有关物质运动的基本规律应该是共同的。因此，不仅在力学范围内有一个共同的相对性原理，就是在电磁学范围内，乃至推广到整个物理范围内，也应该有一个共同的相对性原理，借以表明，自然规律的客观性，不应该受到参考系主观选择的随意性的影响。但是把伽利略变换对于这种推广的相对性原理不是对称操作。





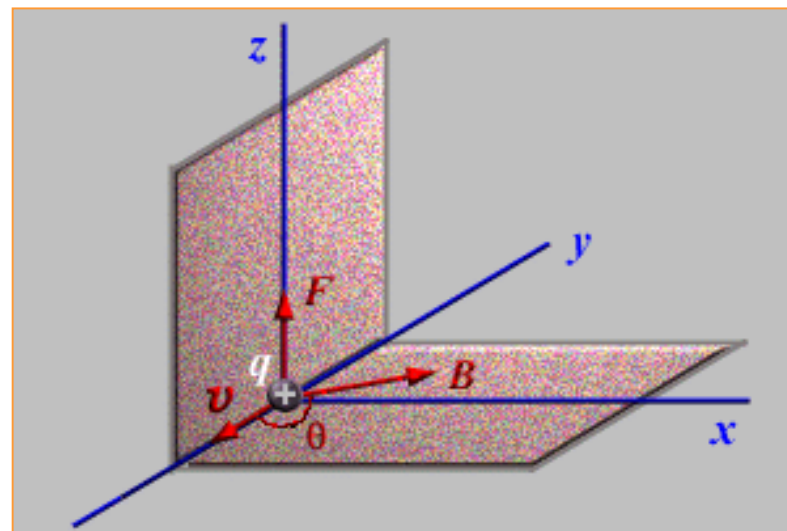
### 五、伽利略变换的困难

带电粒子受力：

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

↓  
电场力

↓  
洛伦兹力



洛伦兹力：  $F = qvB\sin\theta$

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伦兹力将发生变化，经典电磁定律不具有伽利略变换的不变性。

一切与速度有关的力都不具有伽利略变换的不变性！。

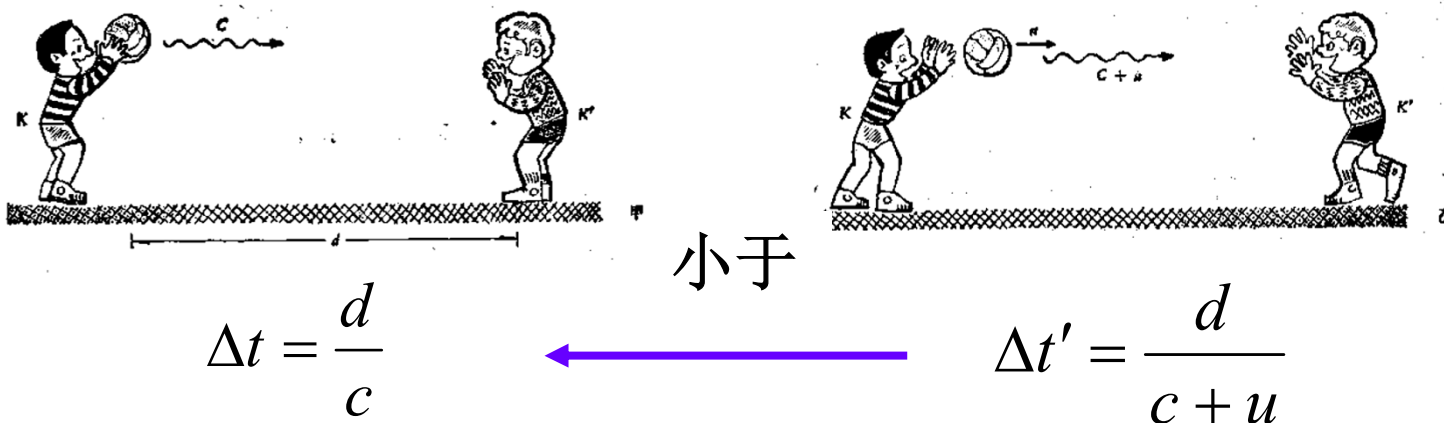




### 五、伽利略变换的困难

光速不满足速度合成定律

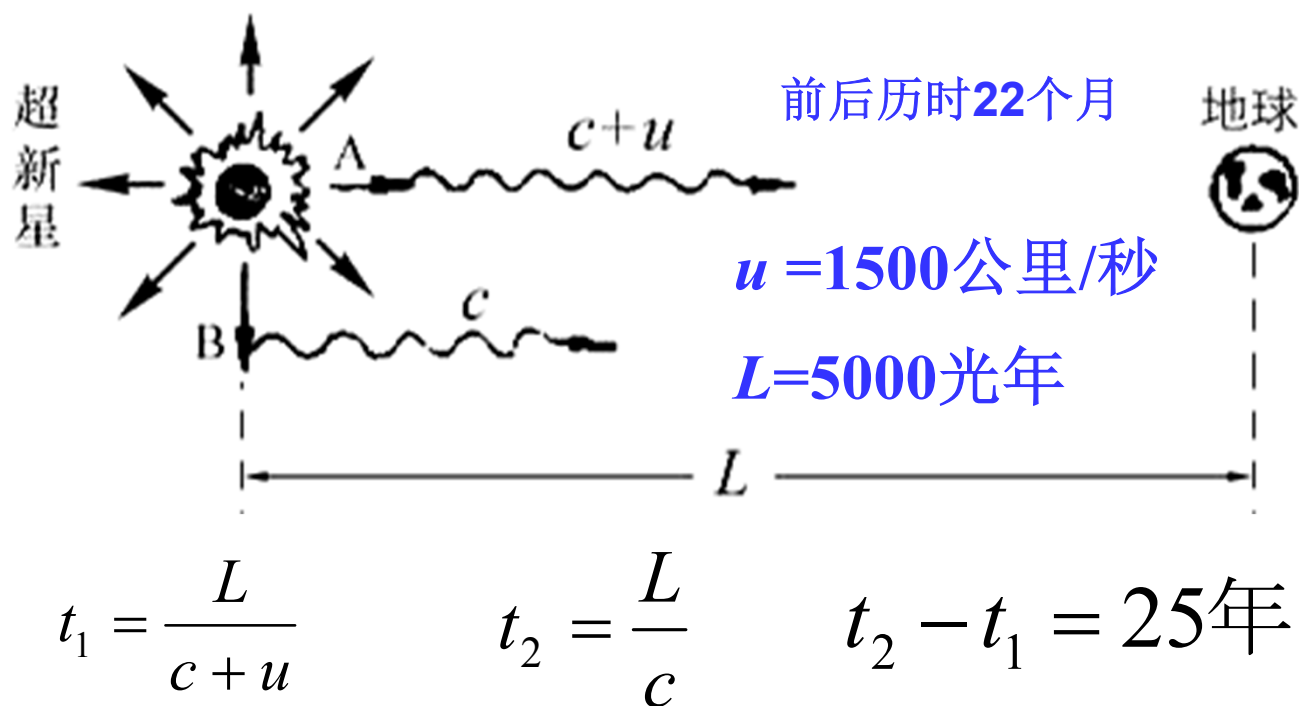
$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u}$$



把速度合成公式应用到光传播问题上得到的一个混乱结果，它使我们先看到后发生的事，后看到先发生故事。然而，这种颠倒先后的怪现象谁也没有看到过。这就证明，光速并不满足速度合成公式，伽利略变换与高速运动物体的实验结果不符。



## 第8章 相对论



结论应该是：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规律。





## 第8章 相对论

相对性原理的普遍性（对称性）

伽利略变换（经典力学）

电磁学定律

} 三者无法协调

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，爱因斯坦选择 3、取得成功。





爱因斯坦的选择来自坚定的信念：

自然的设计是对称的，不仅力学规律在所有的惯性系中有相同的数学形式，所有的物理规律都应与惯性系的选择无关。

实验结果说明，在所有惯性系中，真空中的光速恒为 $c$ ，伽利略变换以及导致伽利略变换的牛顿绝对时空观有问题，必须寻找新的变换，建立新的时空观。

