

第一章 质点的运动

第二章 刚体的运动

第三章 机械振动及机械波

第四章 狭义相对论

## 第四章 狭义相对论

1

### 4.1 伽利略变换式

2

### 4.2 狭义相对论的基本原理

3

### 4.3 狭义相对论的时空观

4

### 4.4 光的多普勒效应

5

### 4.5 相对论性动量和能量

我们正青春年少

## 4.1 伽利略变换式，经典力学相对性原理遇到的困难

**问：** 相对于不同的参考系，经典力学定律的形式是完全一样的吗？

**经典力学认为：**

- (1) 空间的量度是绝对的，与参考系无关；
- (2) 时间的量度也是绝对的，与参考系无关。



**牛顿** (ISSAC NEWTON 1643—1727)，杰出的英国物理学家，经典物理学的奠基人。

我们正青春年少

## 4.1 伽利略变换式，经典力学相对性原理遇到的困难

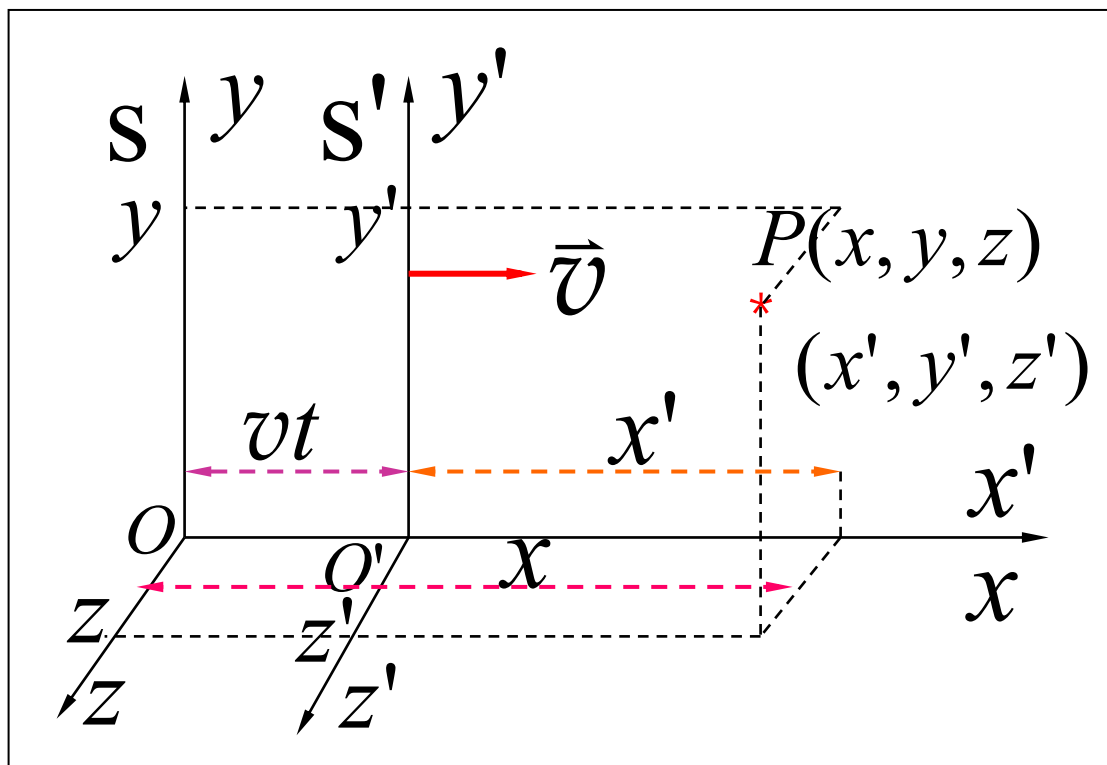
### 一、伽利略变换式 经典力学的相对性原理

当 $t=t'=0$ 时

$O$ 与 $O'$  重合

位置坐标变换公式：

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



**伽利略变换**——经典力学下的绝对时空观

我们正青春年少

## 4.1 伽利略变换式，经典力学相对性原理遇到的困难

### 速度变换公式：

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx'}{dt'} &= \frac{dx}{dt} - u \\ \frac{dy'}{dt'} &= \frac{dy}{dt} \\ \frac{dz'}{dt'} &= \frac{dz}{dt} \end{aligned} \right\}$$

即



$$\left. \begin{aligned} v'_x &= v_x - u \\ v'_y &= v_y \\ v'_z &= v_z \end{aligned} \right\} \rightarrow \mathbf{v}' = \mathbf{v} - \mathbf{u}$$

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

在两相互  
作用匀  
速直线  
运动的  
惯性系  
中，牛  
顿运动  
定律具  
有相同  
的形式。

### 加速度变换公式：

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 x'}{dt'^2} &= \frac{d^2 x}{dt^2} \\ \frac{d^2 y'}{dt'^2} &= \frac{d^2 y}{dt^2} \\ \frac{d^2 z'}{dt'^2} &= \frac{d^2 z}{dt^2} \end{aligned} \right\}$$

即



$$\left. \begin{aligned} a'_x &= a_x \\ a'_y &= a_y \\ a'_z &= a_z \end{aligned} \right\} \rightarrow \mathbf{a}' = \mathbf{a}$$

### 二、经典力学的绝对时空观

#### (1) 同时的绝对性

在一惯性系中同时发生的两件事，在其它惯性系中也是同时发生的。

#### (2) 时间的绝对性

#### (3) 空间的绝对性

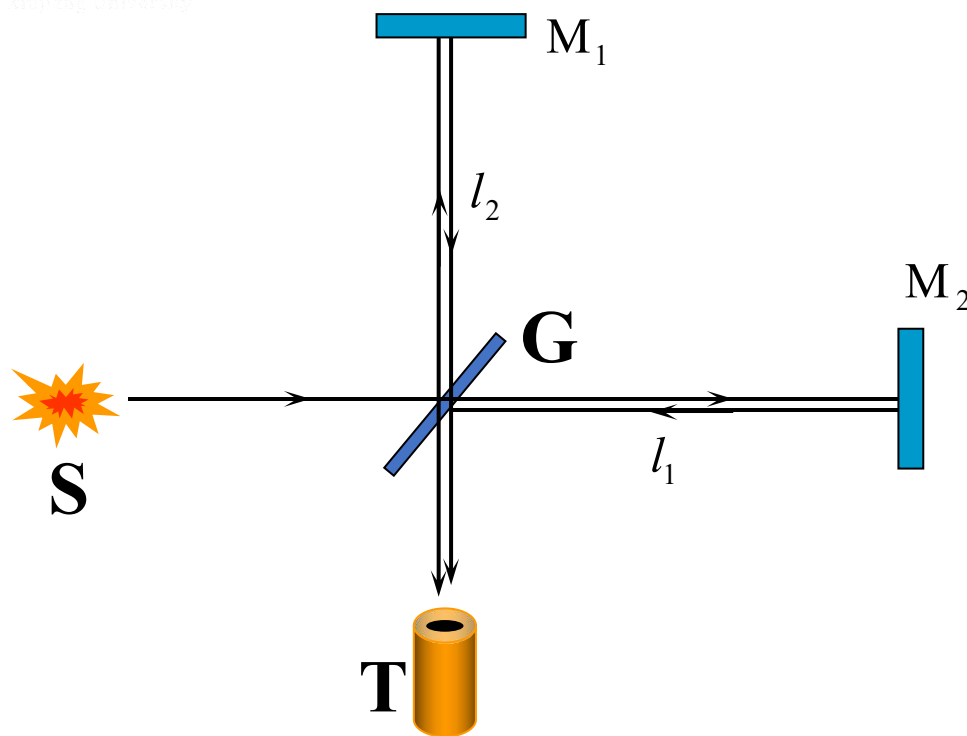
彼此相对运动的惯性系中，测得同一杆的长度是相同的。



注意

牛顿力学的相对性原理，在宏观、低速的范围内，是与实验结果相一致的。

### 三、光速依赖于惯性参考系的选取吗？



迈克尔逊-莫雷实验



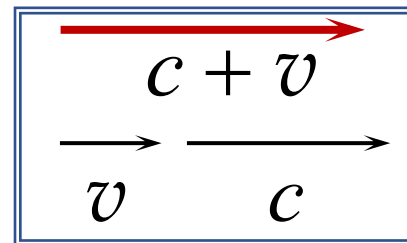
迈克尔逊 (Albert Abraban Michelson, 1852. 12. 19–1931. 05. 09) 美国物理学家，1887年他与美国物理学家莫雷合作，进行了著名的迈克尔逊-莫雷实验

**实验目的：** 测量运动参考系（主要是地球）相对以太的速度。

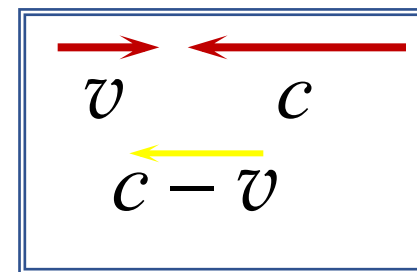
## 4.1 伽利略变换式，经典力学相对性原理遇到的困难

地球相对于以太速度： $v$  光在以太速度： $c$

光路 (1) ●光顺着以太方向传播



●光逆着以太方向传播



往返一次所需时间：

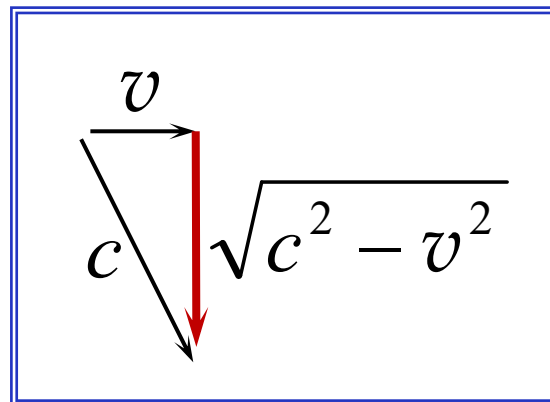
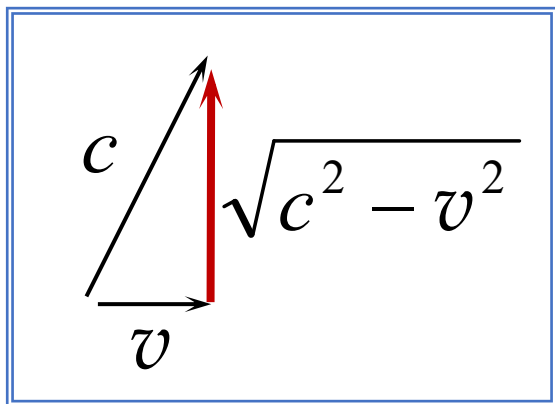
$$t_1 = \frac{l}{c + v} + \frac{l}{c - v} = \frac{2l}{c} \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1}$$



## 4.1 伽利略变换式，经典力学相对性原理遇到的困难

### 光路 (2)

光相对于地球的速度垂直于以太的方向。



往返一次需要时间

$$t_2 = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l}{c} \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2l}{c} \left[ \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1} - \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right]$$

## 4.1 伽利略变换式，经典力学相对性原理遇到的困难

因为  $v^2/c^2 \ll 1$  由  $(1-x)^n \approx 1-nx$  ( $x \ll 1$ )

$$\Delta t = t_1 - t_2 \approx \frac{lv^2}{c^3}$$

光程差为：

$$\delta = c\Delta t = lv^2 / c^2$$

仪器旋转 $90^\circ$ ，前后两次光程变化 $2\delta$ ，干涉条纹移动：

$$\Delta N = \frac{2\delta}{\lambda} = \frac{2lv^2}{\lambda c^2}$$

**注意**

$\lambda$ 、 $c$ 、 $l$  已知，测出条纹的离动 $\Delta N$ ，可由上式计算出地球相对以太的绝对速度。

## 4.1 伽利略变换式，经典力学相对性原理遇到的困难

### 实验结果：

$l=10\text{m}$ ,  $\lambda=500\text{nm}$ ,  $v=3\times 10^4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\Delta N=0.4$  ——零结果

- 相对以太的绝对运动是不存在的，以太不能作为绝对参考系，以太假设不能采用；
- 地球上沿各个方向的光速都是相等的。
- 迈克耳孙—莫雷实验一直被认为是狭义相对论的主要实验支柱。

**结论：**光速不依赖于观察者所在的参考系。