

第十四章 相对论

重点

§ 14-1 伽利略变换式、经典力学的绝对时空观

§ 14-2 迈克耳孙-莫雷实验

§ 14-3 狭义相对论的基本原理、洛伦兹变换

§ 14-4 狭义相对论的时空观

~~§ 14-5 光的多普勒效应~~

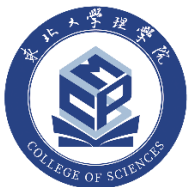
不要求

§ 14-6 相对论性动量和能量

~~§ 14-7 等离子体与受控核聚变~~

不要求

~~§ 14-8 广义相对论简介~~



第十四章 相对论

§ 14-1 伽利略变换式、
经典力学的绝对时空观

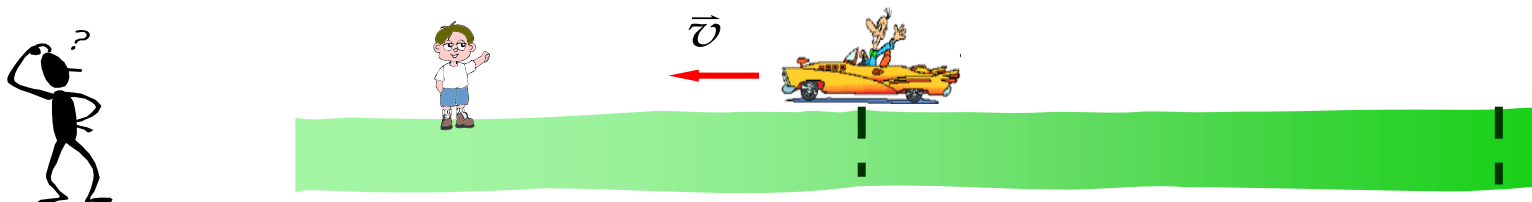
§ 14-2 迈克耳孙-莫雷实验

- 一、力学的相对性原理
- 二、伽利略变换
- 三、经典力学的时空观（绝对时空观）
- 四、迈克耳逊-莫雷实验

了解背景

一、力学的相对性原理

相对不同的参照系，长度和时间的测量结果都一样吗？



一样！

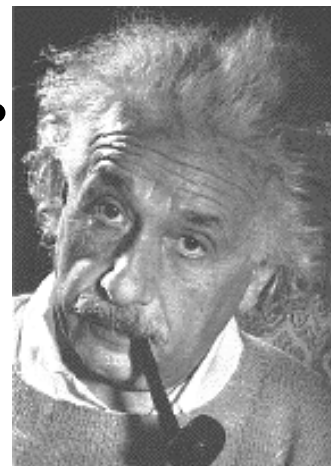
这是牛顿天才的一个标志



Newton 1642—1727

在两个相对作直线运动的参考系中，**时间**的测量是绝对的，**空间**的测量也是绝对的，与参考系无关。

绝对时空



Einstein 1879—1955

时间和空间的绝对性是经典力学的基础

一、力学的相对性原理

在彼此作匀速直线运动的所有惯性系中，物体运动所遵循的力学规律是完全相同的，具有完全相同的数学表达式。即在研究力学规律时，一切惯性系是等价的。

在一切惯性系内的任何力学实验都不能确定该惯性系是静止的还是作匀速直线运动的，因此要确切知道某一惯性系本身是否“绝对静止”，用任何力学实验都不可能办到。

力学定律在一切惯性系中都是相同的，
即所有惯性系都是等价的。

-----力学的相对性原理

二、伽利略变换 Galilean Transformation

在两个惯性系中考察同一物理事件

1、坐标系的建立

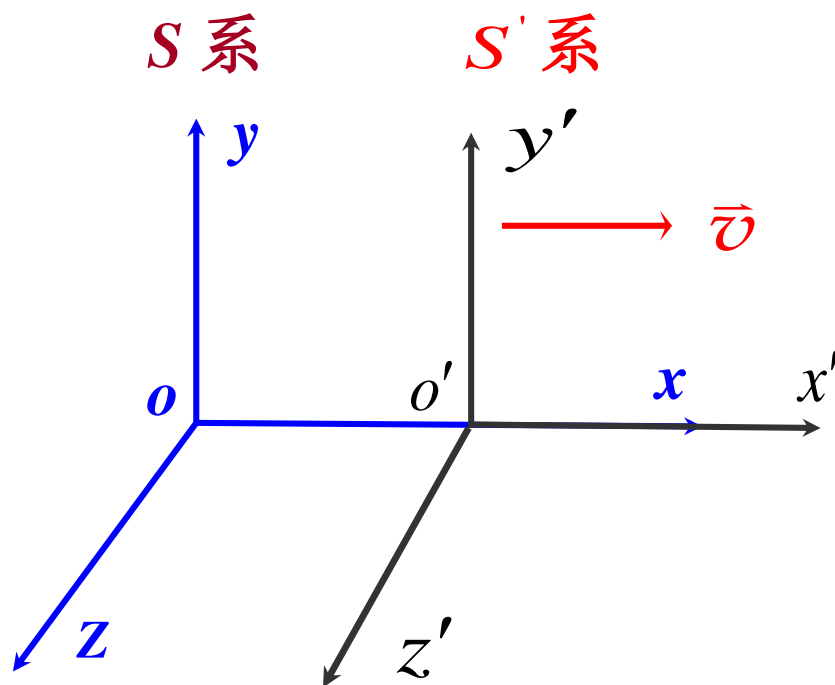
S 系 ($Oxyz$)

惯性系

S' 系 ($O'x'y'z'$)

惯性系

\vec{v} 是 S' 系相对 S 系
运动的速度



当 $t = t' = 0$ 时两坐标系的原点 O 与 O' 相重合。

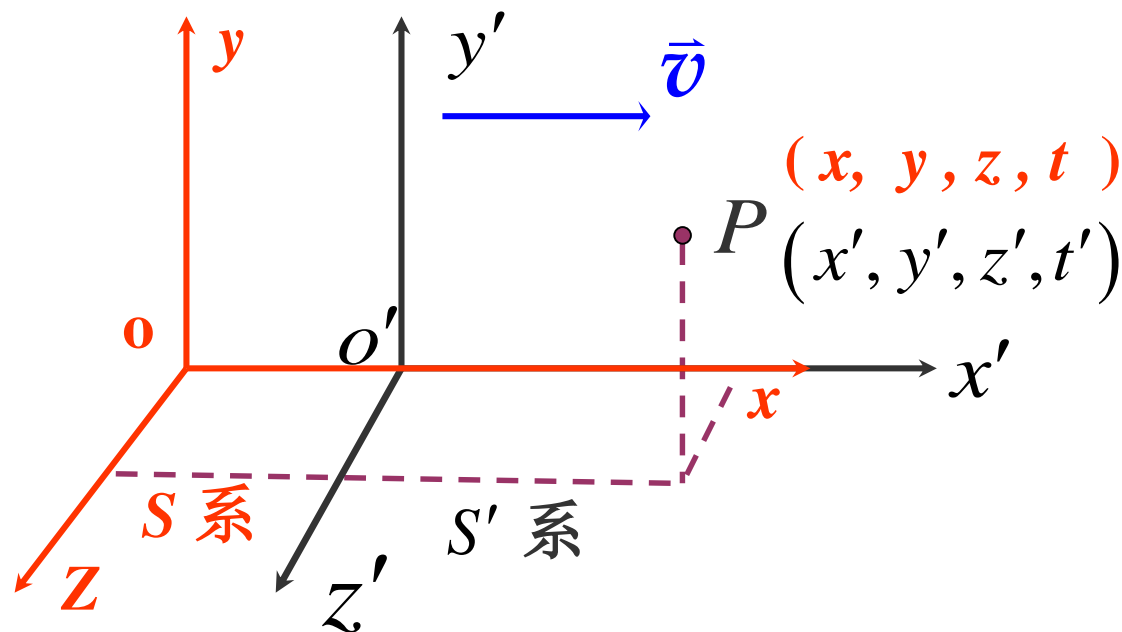
二、伽利略变换 Galilean Transformation

2、实际观测

t 时刻在 P 点发生任一事件

S 系: (x, y, z, t)

S' 系: (x', y', z', t')



正变换

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



逆变换

$$\begin{aligned} x &= x' + vt' \\ y &= y' \\ z &= z' \\ t &= t' \end{aligned}$$

伽利略变换

二、伽利略变换 Galilean Transformation

3、速度变换与加速度变换

两个都是惯性系， v 是恒量

$\begin{aligned}x' &= x - vt \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= t\end{aligned}$	→	$\begin{aligned}u'_x &= u_x - v \\u'_y &= u_y \\u'_z &= u_z\end{aligned}$	→	$\begin{aligned}a'_x &= a_x \\a'_y &= a_y \\a'_z &= a_z\end{aligned}$
$\begin{aligned}x &= x' + vt' \\y &= y' \\z &= z' \\t &= t'\end{aligned}$	→	$\begin{aligned}u_x &= u'_x + v \\u_y &= u'_y \\u_z &= u'_z\end{aligned}$	→	$\begin{aligned}a_x &= a'_x \\a_y &= a'_y \\a_z &= a'_z\end{aligned}$

在两个不同的惯性系中 $\vec{a}' = \vec{a}$

结论:

自不同的惯性系，所观测到的同一质点运动的加速度是相同的，即**物体的加速度具有伽利略变换下的不变性。**

三、牛顿定律具有伽利略变换不变性

惯性系 S

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

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

惯性系 S'

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

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

在牛顿力学中

力与参考系无关

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

质量与运动无关

$$m = m'$$

牛顿力学规律（包括**动量守恒定律**、**机械能守恒定律**等）在伽利略变换下形式不变。

四、经典力学的时空观

1、事件所经历的时间与参照系的选择无关

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

无论从哪个惯性系进行观测事件所经历的时间间隔都相同

2、空间两点间的距离与参照系的选择无关

$$\Delta r = \Delta r'$$

无论从哪个惯性系进行观测两点间的距离都相同

3、经典力学的绝对时空观

时间具有绝对性，空间具有绝对性，
时间和空间是彼此分离不相关的

五、矛盾与机遇

1、麦克斯韦方程组不具备伽利略变换不变性

麦克斯韦方程组在伽利略变换下，对不同的惯性系具有不同的形式。

- a) 若伽利略变换正确，麦克斯韦方程组就必须修正；
- b) 若麦克斯韦方程组正确，则伽利略变换就必须修正。

以太理论的提出

人们在研究机械波（例如声波）的传播过程，发现机械波的传播必须有弹性媒质。当时的物理学家认为可以用这个框架来解释一切波动现象。

19世纪中期，麦克斯韦建立的电磁场理论，指出光是电磁波，并提出光是在以太中传播的假说。

五、矛盾与机遇

1、麦克斯韦方程组不具备伽利略变换不变性

麦克斯韦方程组在伽利略变换下，对不同的惯性系具有不同的形式。

- a) 若伽利略变换正确，麦克斯韦方程组就必须修正；
- b) 若麦克斯韦方程组正确，则伽利略变换就必须修正。

以太理论的提出

以太假说的主要内容是：以太是传播包括光波在内的电磁波的弹性媒质，它充满整个宇宙空间，万物（包括光）相对于该媒质运动。以太中带电粒子振动会引起以太变形，这种变形以弹性波的形式传播，这就是电磁波。

并且认为**以太**就是人们一直在寻找的**绝对静止参考系**，只有在这个参考系中光速才是与方向无关的恒量。

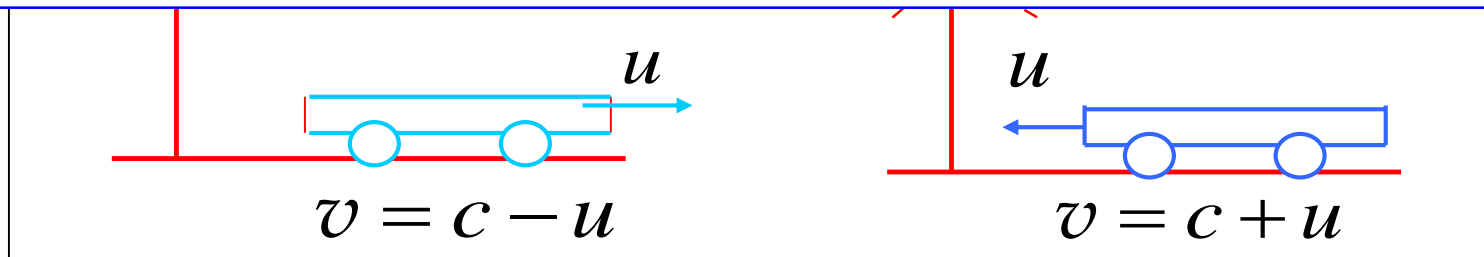
五、矛盾与机遇

2、光速问题

狭义相对论建立以前，人们认为任何速度的叠加都满足伽利略变换。但在光速领域里却碰到了困难。

以太就是绝对空间。以太中电磁波沿各方向传播的速度都等于恒量 c 。但在相对以太运动的惯性系中，按伽利略变换，电磁波沿各方向传播的速度并不等于恒量 c ，如下图中相对于光源运动的小车上所测得的光速。

由于地球自西向东转，因此无论如何，光相对于地球的传播速度不会是向各方向都相同的。



五、矛盾与机遇

2、光速问题

1731年，英国的一位天文爱好者比维斯发现：

星云的形状有点像螃蟹被取名为蟹状星云(Crab Nebula)

1920年，推算其膨胀开始时刻应在860年前—公元1060年左右。

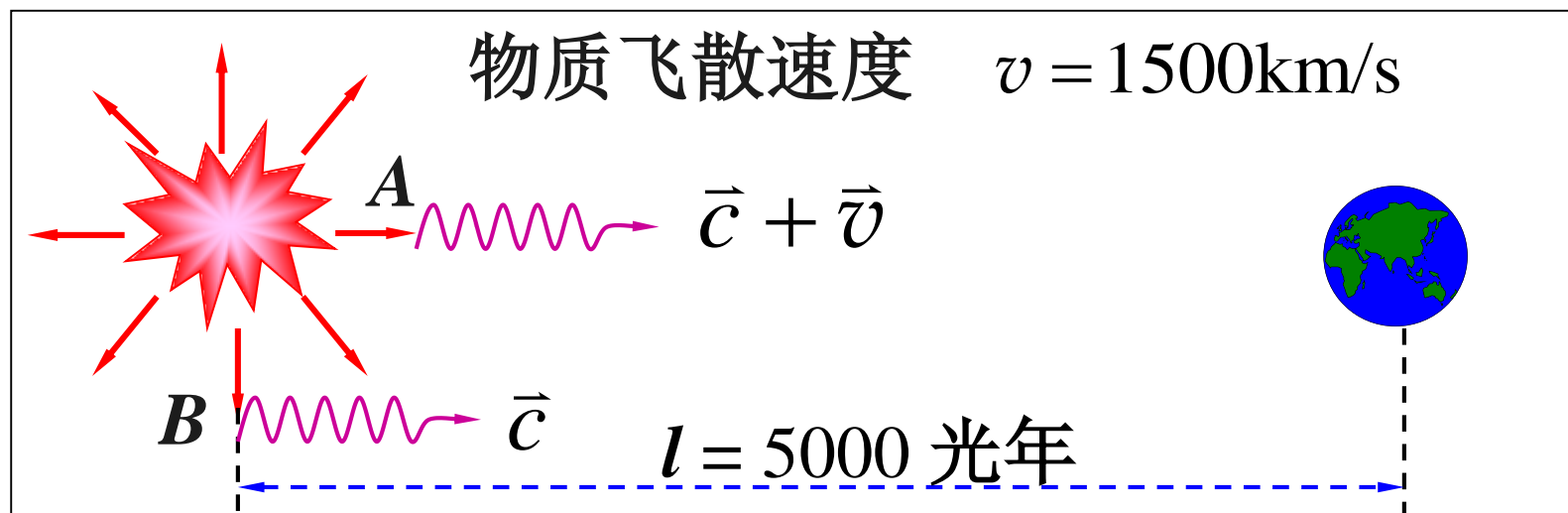


《宋会要》记载：“¹⁰⁵⁶嘉佑元年三月，司天监言，客星没，客去之兆也。初，¹⁰⁵⁴至和元年五月晨出东方，守天关，昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十三日。”

五、矛盾与机遇

2、光速问题

当一颗恒星在发生超新星爆发时，它的外围物质向四面八方飞散，即有些抛射物向着地球运动，现研究超新星爆发过程中光线传播引起的疑问。

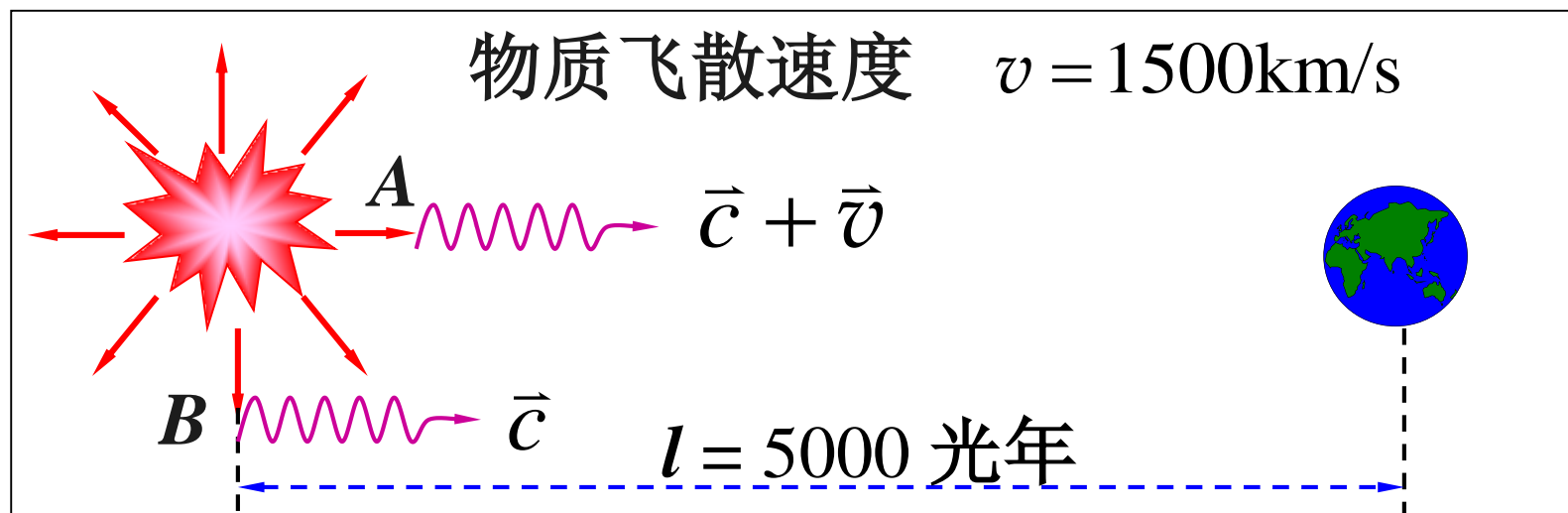


五、矛盾与机遇

2、光速问题

A 点光线到达地球所需时间: $t_A = \frac{l}{c + v}$

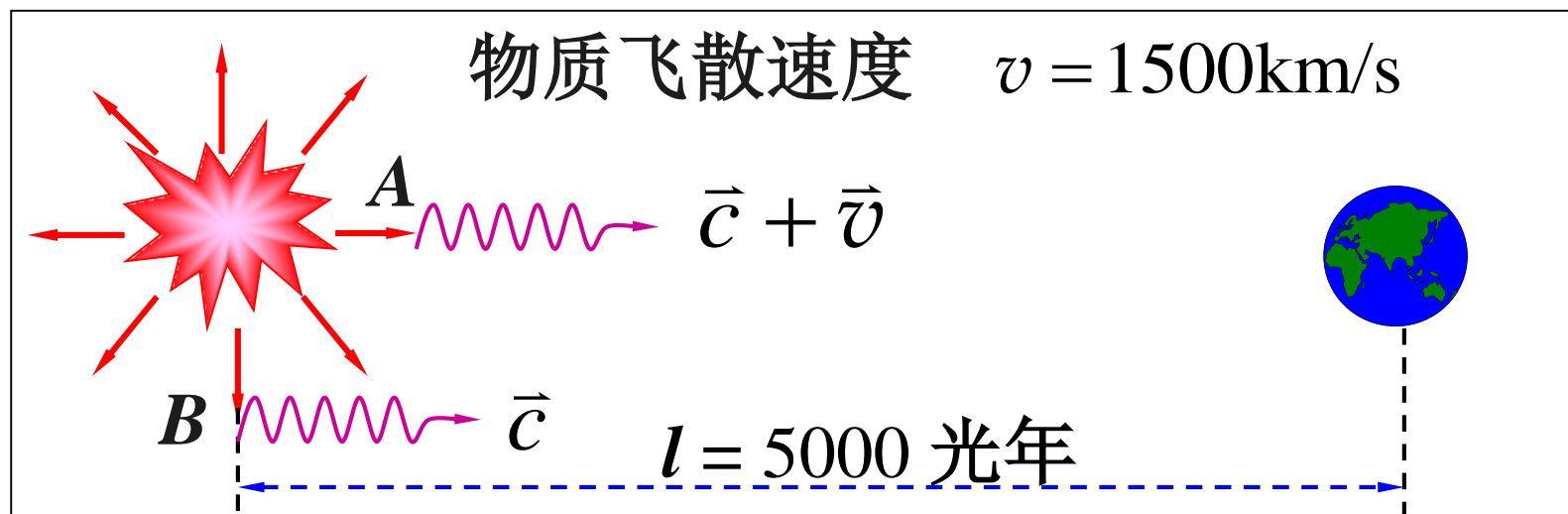
B 点光线到达地球所需时间: $t_B = \frac{l}{c}$



五、矛盾与机遇

2、光速问题

理论计算观察到超新星爆发的强光的时间持续约 $\Delta t = t_B - t_A \approx 25$ 年。实际持续时间约为 22 个月，这怎么解释？



五、矛盾与机遇

3、迈克耳孙-莫雷实验 The Michelson-Morley Experiment

著名的否定性实验（1881~1887），动摇了经典物理学的基础。

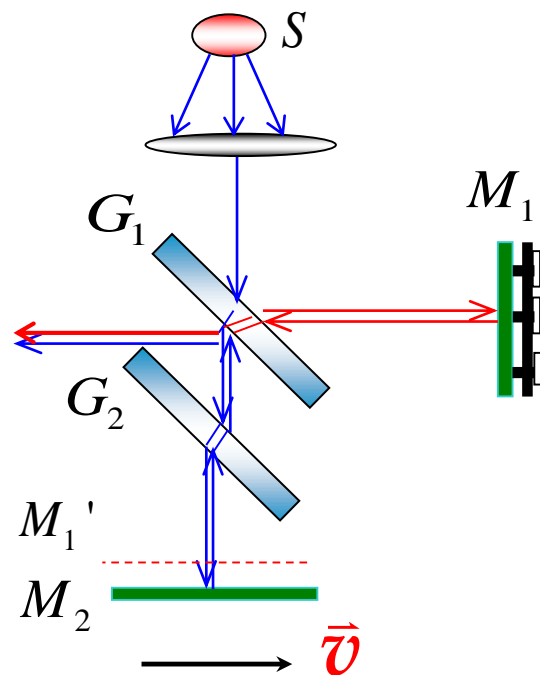
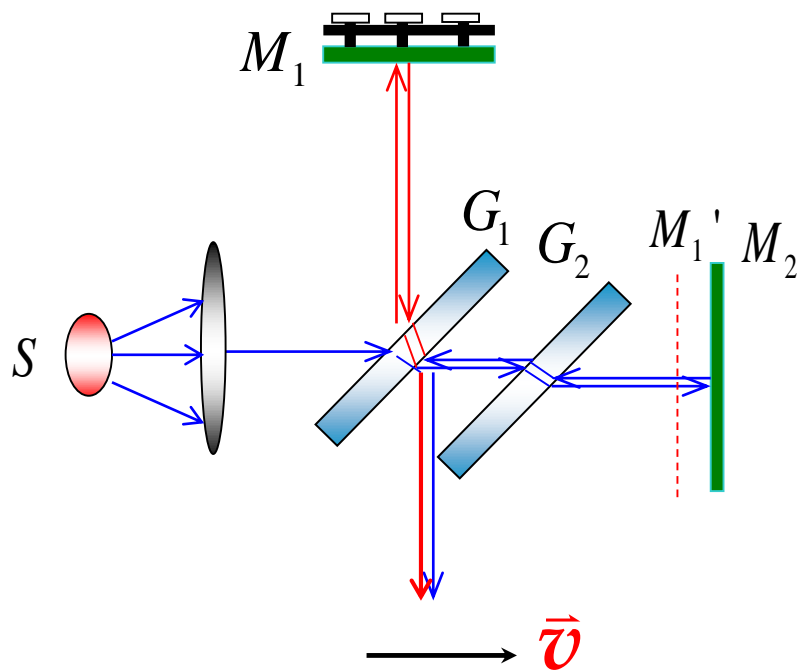
为了测量地球相对于“以太”的运动，1881年迈克耳孙用他自制的干涉仪进行测量，没有结果。

1887年他与莫雷以更高的精度重新做了此类实验，仍得到零结果，即未观测到地球相对“以太”的运动。

五、矛盾与机遇

3、迈克耳孙-莫雷实验 The Michelson-Morley Experiment

著名的否定性实验（1881~1887），动摇了经典物理学的基础。



理论计算：条纹将移动： $\Delta N \approx 0.4$

仪器可测量精度： $\Delta N \rightarrow 0.01$

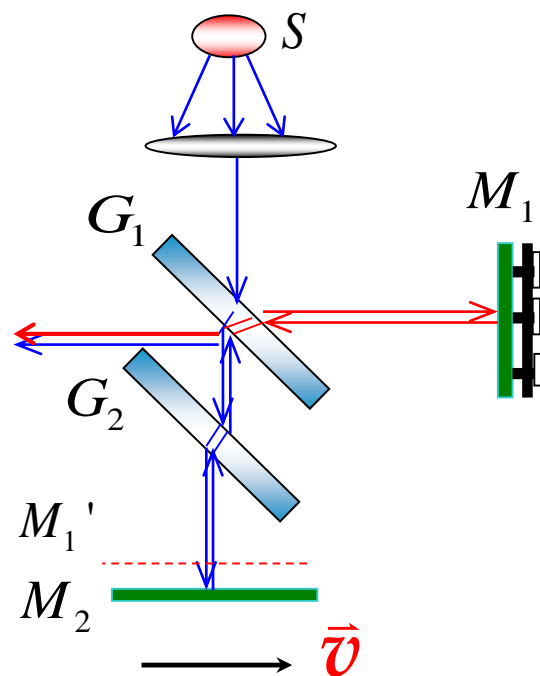
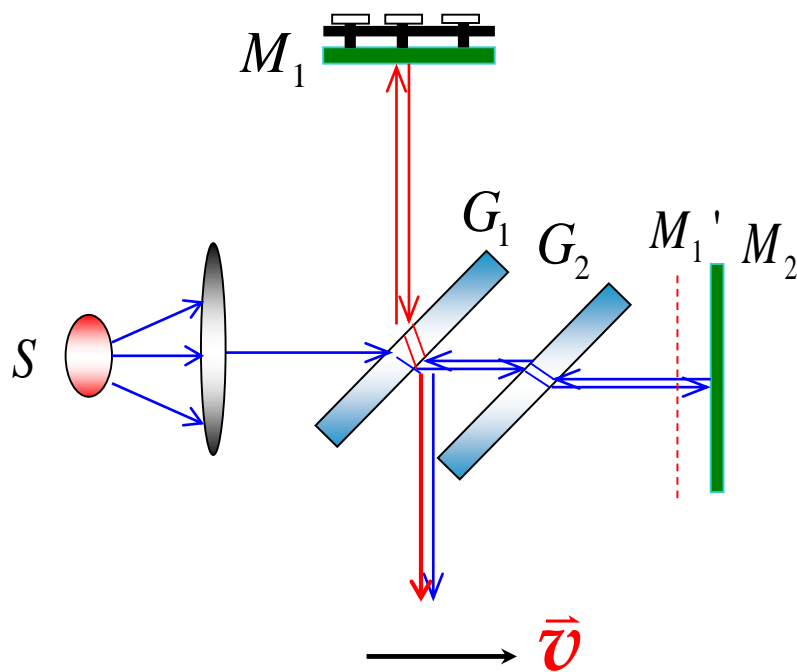
实验结果：

未观察到地球相对于“以太”的运动。

五、矛盾与机遇

3、迈克耳孙-莫雷实验 The Michelson-Morley Experiment

著名的否定性实验（1881~1887），动摇了经典物理学的基础。



时间差的改变将导致干涉仪干涉条纹的移动. 但观察的结果却出乎意料, 观察不到预期值, 多次改进实验仍是如此. 实验得到的结果困扰了当时的科学界.

五、矛盾与机遇

3、迈克耳孙-莫雷实验 The Michelson-Morley Experiment

有一部分人不相信实验的真实性，继续改进实验设备做实验。而且春天做了夏天做，秋天做了冬天做；平地做了高山做…实验精度越来越高，能做实验的人越来越多，乃至几乎每个大学都能做，近年来，利用激光使这个实验的精度大为提高，但结果仍然一样，地球上的光速与地球速度无关。

以后又有许多人在不同季节、时刻、方向上反复重做迈克耳孙-莫雷实验。近年来，利用激光使这个实验的精度大为提高，但结论却没有任何变化。

迈克耳孙-莫雷实验测到以太漂移速度为零，对以太理论是一个沉重的打击，被人们称为是笼罩在**19世纪物理学**上空的一朵乌云。

