

# 广义相对论的 等效原理

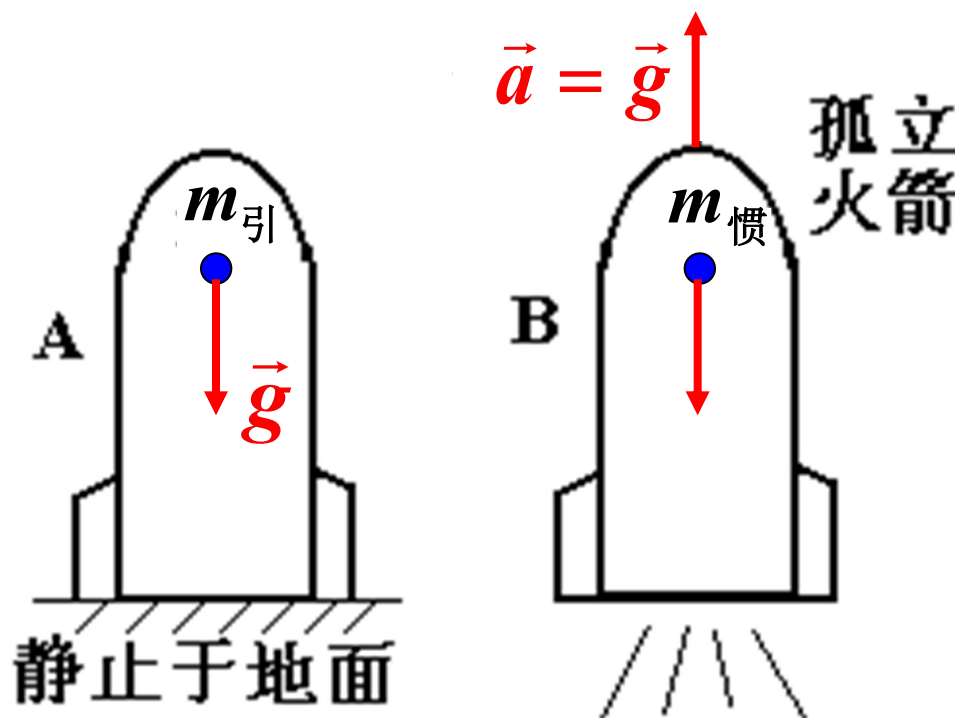
## 简介

## 一. 等效原理

广义相对论——研究非惯性系的  
时空与引力的关系。

等效原理是广义相对论中的一个基本原理。

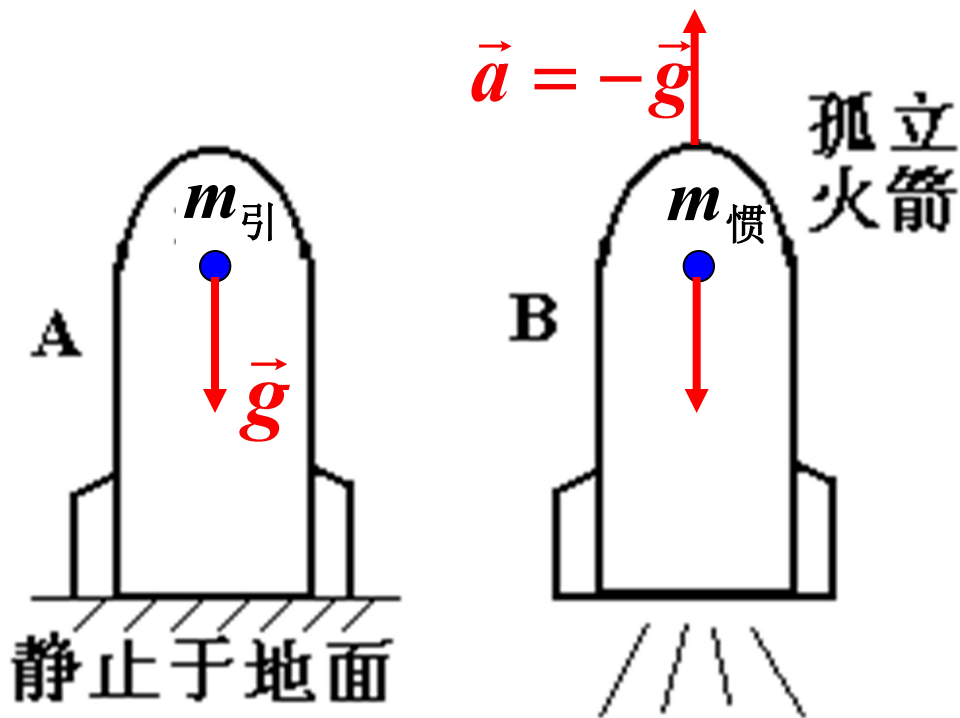
设 A, B 为完全同样的两个火箭。



A火箭静止于  
地面, 是惯性系。

在A内作物体的  
自由落体运动实  
验, 加速度是  $\vec{g}$  .

质量----- $m_{\text{引}}$



**B是一孤立火箭，  
以加速度  $\vec{a} = -\vec{g}$   
作匀加速直线运动。  
(周围没有地球及  
一切任何物体)**

在 B 内将物体一放手,会看到与火箭A内自由落体运动一样的现象。

**质量----- $m_{\text{惯}}$**

也就是说，一个在太空中加速的参考系中将会出现**表观的引力**；在这样的参考系中，物理定律就和该参考系静止于一个引力物体附近一样。

等效原理：处于均匀恒定引力场影响下的惯性系中的一切物理现象，和处于无引力场但以恒定加速度运动的非惯性系中的一切物理现象是等价的。

简而言之，**引力和加速度等效**。

这个等效原理是广义相对论的基础。

由于等效原理， $m_{\text{引}} = m_{\text{惯}} = m$

狭义相对论说的是光子的**惯性质量**

$$m_{\text{惯}} = E/c^2$$

∴根据等效原理,光子的**引力质量**

$$m_{\text{引}} = E/c^2$$

## 二. 光线通过引力场将发生弯曲

由于光也有引力质量，通过引力场时也和实物粒子一样，会受到引力场的作用，光线会发生偏转。

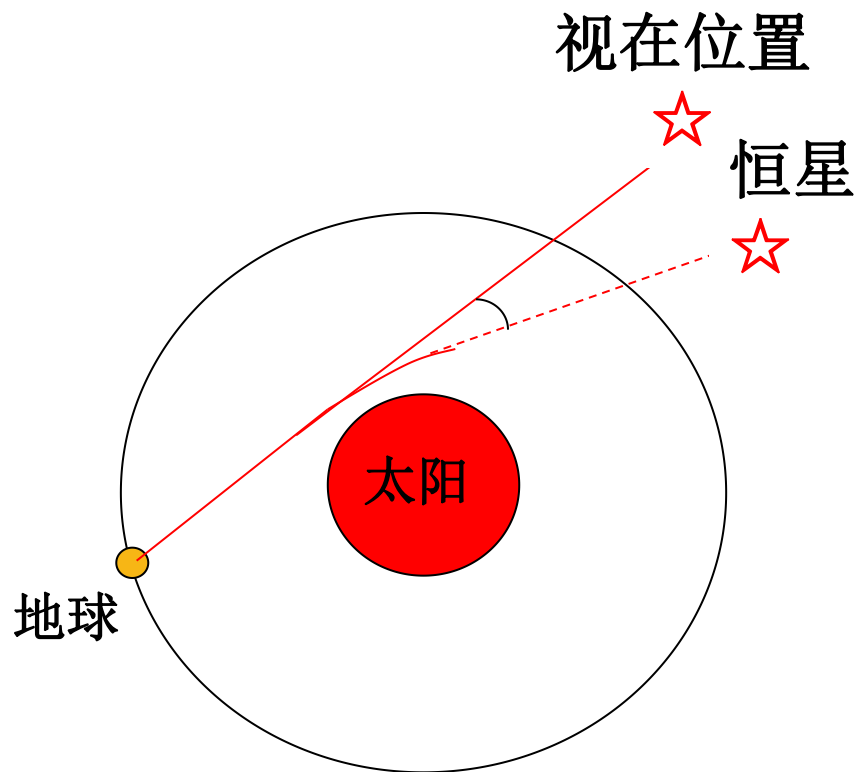
例如，水平射出的光束会走抛物线。

但是，因光速太大，走3000km的距离只要 0.01s，只向下偏 0.5mm,不易看出。

爱因斯坦指出，  
可以观察光线经过太阳旁边时的偏转。

于是，人们选择日全食时，来拍摄太阳附近的  
星空的照片；

与没有太阳时，拍摄的这些星空的照片比较，  
可以测出星光的偏折角。



爱因斯坦

根据广义相对论的计算，  
预言偏转角为 $1.75''$ 。

1919.5.的一次日蚀，  
英国天文学家爱丁顿  
率领一支队伍，在西非  
的一个小岛上测出  
偏转角为 $1.64''$ 。

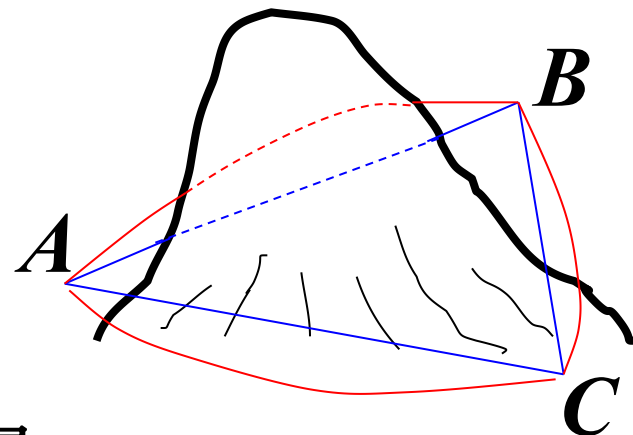
这是第一次由天文观测，验证了广义相对论。

由光线的弯曲现象,会得出一些奇怪的结果:

空间由于引力而弯曲

例如:

- 三角形的内角和大于 $180^\circ$ ;
- 直角三角形  
不满足勾股定理;
- 圆周长与直径之比不是恒量  $\pi$  ;



空间与引力有关!

### 三. 引力与时间

广义相对论指出, 时间也与引力有关。

光子有惯性质量,

能量为  $h\nu$  的光子的惯性质量为  $\frac{h\nu}{c^2}$ ;

光子有引力质量, 按等效原理引力质量也是  $\frac{h\nu}{c^2}$ ,

当一个光子处在离地面高度为  $L$  时,

设其频率为  $\nu$ , 能量为  $h\nu$ ;

当它落下  $L$  距离时, 减少的势能为  $mgL = \frac{h\nu}{c^2} gL$

光子的能量应增加这么多,

于是有  $h\nu' = h\nu + \frac{h\nu}{c^2} gL$



$$h\nu' = h\nu + \frac{h\nu}{c^2}gL$$

所以光到低处时频率变大，为  $\nu' = \nu \left( 1 + \frac{gL}{c^2} \right)$

光波从

引力场弱（高）处  $\longrightarrow$  引力场强（低）处，

频率小（波长长）      频率大（波长小）

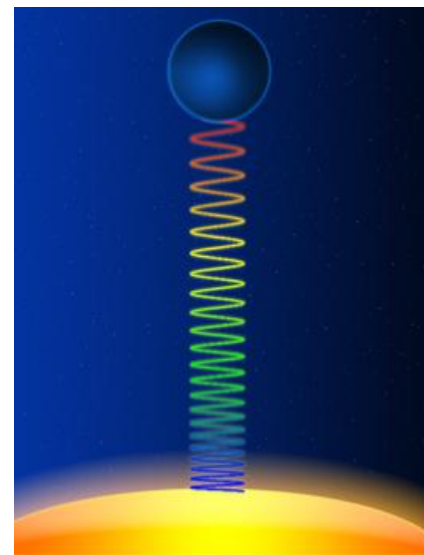
同样道理，

光波从

引力场强（低）处  $\longrightarrow$  引力场弱（高）处，

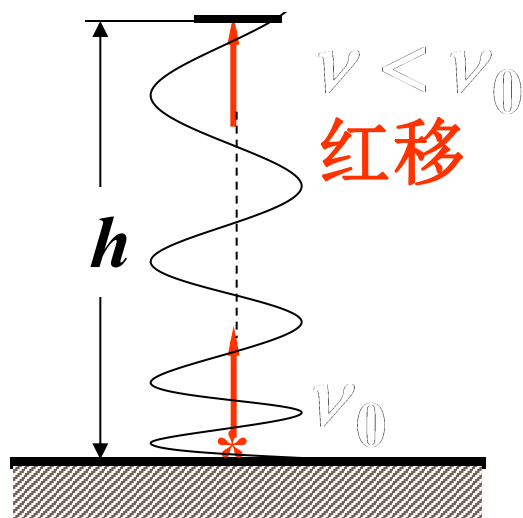
频率大（波长小）      频率小（波长长）

这称为引力红移现象。



光波从一个大质量物体表面  
出射时频率会发生红移

1960年,庞德等人用穆斯堡尔效应在地面上测量到了  
地球引力场中的红移。




(1957年穆斯堡尔在做博士论文时, 解决了 $\gamma$ 射线的频率由于原子核反冲引起的反冲红移)

在  $h = 22.6\text{m}$  高的塔底部, 放上  $^{57}\text{Co}$   $\gamma$  源, 它发射  $4.4\text{ keV}$  的  $\gamma$  射线; 塔顶放  $^{57}\text{Fe}$  的接收器。

$$\left(\frac{\Delta\nu}{\nu}\right)_{\text{实验}} = \frac{\nu - \nu_0}{\nu} = -(2.57 \pm 0.26) \times 10^{-15}$$

$$\left(\frac{\Delta\nu}{\nu}\right)_{\text{理论}} = -2.46 \times 10^{-15}$$

} 相符

引力场强（低处） 引力场弱（高处），  
频率大（波长小）      频率小（波长大）  
节奏慢  
一切过程变慢

说明引力场较弱的地方与引力场较强的地方  
相比，也有时间膨胀效应。

时间也与引力有关!