

# 第八章 时空观的革命——相对论

“牛顿啊，请原谅我，你所发现的道路，在你所在的那个时代，是一位具有最高思维能力和创造力的人所能发现的唯一道路。你所创造的概念，甚至今天仍然指导着我们的物理思想，虽然我们现在知道，如果要更加深入地了解各种联系，那就必须用另外一些离直接经验领域较远的概念来代替这些概念。”

——爱因斯坦在纪念牛顿诞生300周年  
纪念会上的讲话

- ▶ 本章介绍的狭义相对论使几千年来人们的绝对时空观发生了深刻的变革，由此导出的质能关系式  $E = mc^2$ ，为原子能的应用开辟了道路。
- ▶ 1913—1915年，爱因斯坦进一步创立的广义相对论，把牛顿万有引力理论提高到新的场论水平，为宇宙学研究开辟了道路。
- ▶ 在本章学习中，请同学们重视领会爱因斯坦的科学思想。

“科学不仅是定律的集合或一系列不相关事实的目录，它是人类心智的创造，包含了自由发明的思想和概念.....确实，近代物理所创造的实在（Reality）远远离开了以往年代的。”

（《爱因斯坦文集》第一卷p377）

# § 8.1 光速不变性和同时性的相对性

## 一、力学相对性原理和伽利略变换

### 1. 牛顿的时空观

- ▶ 力学讨论的是物体位置随时间的改变，所以牛顿认为首先要对时空性质有所约定。在牛顿之前，时间和空间都是与具体事物的运动联系在一起的，时间是用日月星辰的运动和水漏、沙漏来定义的，空间是用能热胀冷缩的杆来测量的。伽利略引入了相对运动的概念，没引入绝对时空概念。



日冕



沙漏

- ▶ 牛顿的伟大之处在于他引入了抽象的绝对时空：绝对空间是均匀的、无限的和各向同性的；时间是均匀的、无限的，而且时间和空间是相互独立的。牛顿时空观深入人心，尽管后来遭到质疑和批评，但这丝毫不影响牛顿的伟大功绩。

- ▶ 声音靠空气传播，那么光靠什么传播？19世纪的科学家曾假定真空中有一种“刚性”极大的介质，叫“以太”，光靠它传播。当时不少人也猜想：或许“以太”就是牛顿的绝对空间。一切相对于绝对空间做匀速运动的参考系，都是惯性系。

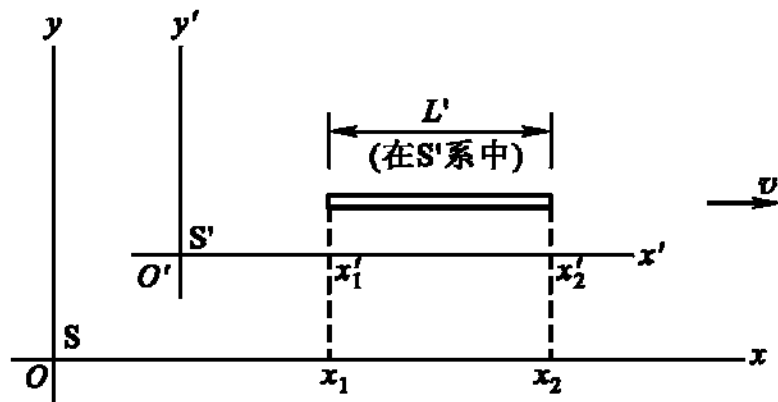
## 2. 力学相对性原理和伽利略变换

力学相对性原理：在两个相互作匀速运动的惯性系内，力学规律是不变的。

在两个惯性系之间的坐标系变化关系，满足伽利略变换。

假定  $t' = t = 0$ ， $O$  和  $O'$  重合，则有

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



伽利略变换正是牛顿力学中关于绝对空间和绝对时间观念的数学表述。时间和长度在两个惯性系里是不变的。

### 3. 马赫和彭加勒的科学思想对爱因斯坦有深刻影响

奥地利物理学家、哲学家**马赫**时历史上最早明确指出绝对时空观是错误的。他指出：“没有一个人能对绝对空间和绝对运动做出论断，它们是纯粹的思想产物，纯粹的理智构造，它们不可能产生于经验之中。正如我们已详细说明的那样，我们所有的力学原理都是与物体的相对位置和相对运动有关的实验的知识。”

法国物理学家**彭加勒**认为：“没有绝对空间，我们能够设想的只是相对运动。”“没有绝对时间，说两个持续时间相等是一种本身毫无意义的主张，只有通过约定才能得到这一主张。”



## 二、测量“以太风”的迈克尔孙-莫雷实验

1. **实验背景：**早期人们类比声波，认为光也是通过某种介质——以太传播的。

**以太应具有以下性质：**

宇宙中存在一种看不见的弹性介质，充满整个宇宙，并且认为以太应该是绝对静止的参考系。电磁波在以太中的传播速度约为 $3 \times 10^8$  m/s。只有相对以太作匀速直线运动的物体才是真正的惯性参考系。于是人们开始寻找以太，寻找绝对参考系。

## 2. 实验目的:

试想, 如果以太的确存在, 则当地球在以太中绕太阳以  $3 \times 10^4 \text{ m/s}$  的速度高速运行时, 在地球上应当感受到“以太风”。人们开始通过各种电学的或光学的实验来证实以太的存在, 若以太存在, 必然能测到光速的各向异性。但是实验却得出了否定的结果。其中最著名的实验当属1887年由迈克尔孙和莫雷所做的迈克尔孙-莫雷实验。

### 3. 实验装置和基本原理

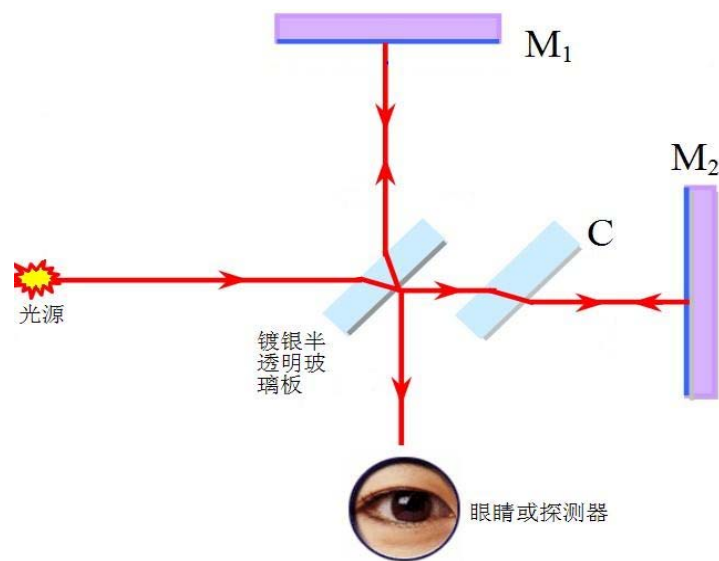
由于地球相对以太运动，则到达探测器的两束光的时间差为  $t_2$  (由  $M_2$  反射回来) 和  $t_1$  (由  $M_1$  反射回来)。

$$t_2 = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{2cL}{c^2 - v^2} \approx \frac{2L}{c} \left( 1 + \frac{v^2}{c^2} \right)$$

$$\frac{1}{4} c^2 t_1^2 = L^2 + \frac{1}{4} v^2 t_1^2$$

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

$$t_2 - t_1 = L \frac{v^2}{c^3}$$



这个时间差，将引起两束光的光程差（即相位差）。实验中让整个仪器在水平面上平稳地转动，使以太的方向连续地改变，明暗有变化相当于  $\Delta t$  的值连续改变，将可观察到干涉条纹的移动。

#### 4. 实验结果

结果是看不到条纹的任何变化，也就是测不到“以太风”的存在。

**“零结果”**

## 5. 洛伦兹的工作

在迈克尔孙-莫雷实验后，洛伦兹为了支持“以太”存在的说法，引入了“长度收缩”的假设，认为物体在运动时，在运动方向上会发生长度收缩，从而使到达探测器的两束光的 $\Delta t \rightarrow 0$ ，以至看不到条纹运动。另外，他还在1895年又提出了一个关于时间的变换式的假设：

$$t' = t - \frac{v}{c^2} x$$

式中  $t'$  为地球系统的时间， $t$  为“以太”系统的时间。在上述两假设下，洛伦兹证明了在  $v/c$  的一级近似下，地球系统与“以太”系统的电磁规律是相同的。但是他却认为，在他的理论中  $t$  是真实时间，而  $t'$  的引入完全是一种辅助手段。可见， $t$  和  $t'$  意义不同，处于不同等地位。“以太”坐标是一个处于特殊地位的优越坐标系，也就是说，电磁现象并不真的符合相对性原理。

洛伦兹的工作，最后被爱因斯坦的狭义相对论所取代，但是他的贡献不可忽视，正如爱因斯坦所说：

“相对论实在可以说是对麦克斯韦和洛伦兹的伟大构思画了最后一笔，因为它力图把物理学扩充到包括引力在内的一切现象。”

### 三、爱因斯坦的追光佯谬，狭义相对论的两个基本原理

#### 1. 爱因斯坦的追光佯谬的提出

##### ► 提出的背景

(1) 迈克尔孙-莫雷实验以及洛伦兹的工作的启发。尽管在爱因斯坦的文章中并没有提到迈克尔孙-莫雷实验，也许在他看来，一个或几个特殊实验都不足以确立一个普遍原理，他所追求的是把理论建立在基本原理之上。



(2) 马赫和彭加勒等人对牛顿的绝对时空观提出尖锐的批评，为爱因斯坦放弃时间的绝对性打下了思想基础。爱因斯坦曾说过：

“马赫的真正伟大就在于他的不妥协的怀疑态度和独立性。”

▶ 对于当时已被人们普遍接受的绝对时间-空间概念，爱因斯坦在青少年时代就提出了异疑。他的好奇心和大胆的思辨使他在16岁时（1895年），就提出了一个理想实验：

“假使一个人能以光的速度和光波一起跑，会看到什么现象呢？”



既然光是电场和和磁场不停地振荡，交互变化而推动向前的波，难道那时会看到只是在振荡着的电磁场而不向前传播吗？

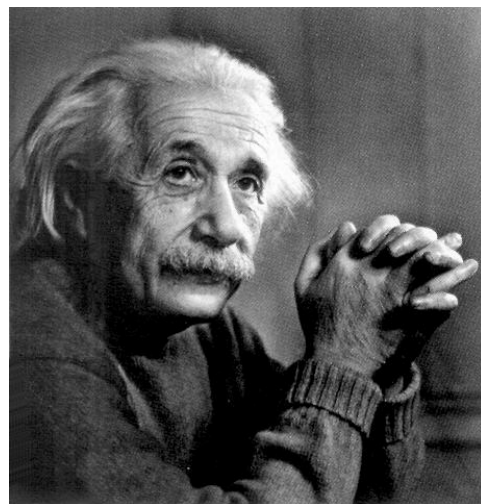
**这可能吗？**

凭直觉，爱因斯坦给出的答案是：

**“人永远也追不上光”**

爱因斯坦说：

“只有大胆的思辨而不是经验的堆积，才能使我们进步。”



## 2. 狭义相对论的两个基本原理

爱因斯坦学习、研究、思考了10年，于1905年发表了6篇论文，其中提出了划时代的“光的量子论”（§ 4.4中已介绍过）和“狭义相对论”。

他把狭义相对论建立在两个基本原理上：

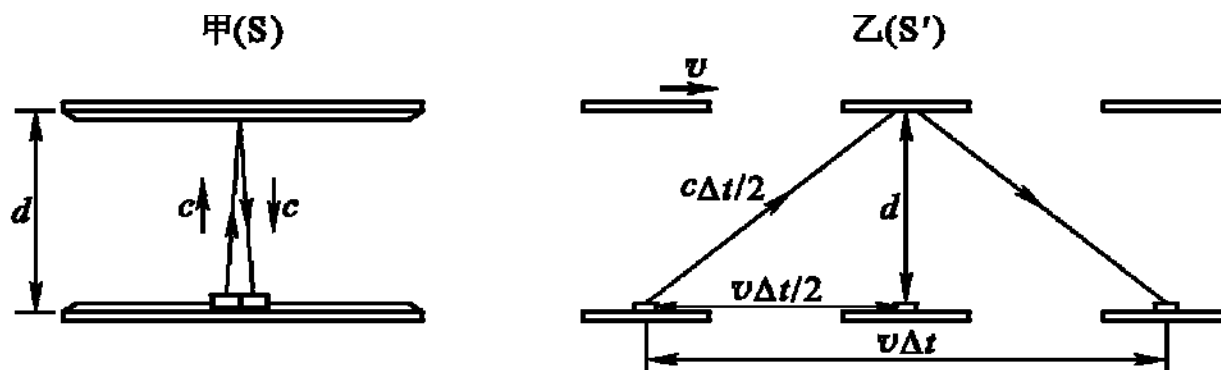
(1) **光速不变原理**：在任何惯性参考系内真空中的光速是不变的，各向同性的，与光源的速度无关，为  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

(2) **相对性原理**：物理学的规律在任何惯性参考系内都是一样的。

这两条基本原理互相联系，由光速不变原理可导出“洛伦兹变换”（下节讨论），在此变换下，才能使电磁运动方程形式不变，使相对性原理成立。

同时电磁运动规律不变，也保证了光速不变（即导出“洛伦兹变换”的前提）。这也说明了理论本身是完全自洽的。

## 四、由光速不变原理导出同时相对性



利用一个标准钟——光钟来说明同时相对性。也就是要利用光速不变原理来导出“运动钟”比“静止钟”走得慢。走得慢说明时间的单位变长了。

对静止在S系的钟，甲看到光来回反射一次的时间是：

$$\Delta t_0 = \frac{2d}{c}$$

在  $S'$ 系，静止的钟对甲来说是运动的钟，来回一次的时间是：

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

由于计时单位  $\Delta t > \Delta t_0$  ，所以，甲说：运动的钟变慢了。当然在  $S'$  系中的乙看来，  $S$  系的钟也变慢了。

这就是**同时的相对性**。

这在实验上已得到了证实，包括高速宇宙飞船中原子钟变慢（1971年），高速飞行的  $\mu$  子衰变寿命有静止时的  $\tau_0$  延长到运动时的

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

## § 8.2 洛伦兹收缩 洛伦兹变换 速度相加定律

### 一、由光速不变原理导出洛伦兹收缩

也就是利用光速不变原理可导出运动物体的长度变短。本节中是将导出运动列车的长度变短。

在运动列车上的观察者测到的列车长度为 $L_0$ ，在地面上的观察者测到的列车长度为

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

也就是说，在地面上看，运动列车的长度比它静止时要缩短些。由上节知，这个式子最早由洛伦兹提出，但他的解释不正确，现在从狭义相对论正确的观点导出它。

讨论如下：有一列车，在车顶中部M 处有一光源，设M 在 S'系（固定在列车上）的原点 O' 处。当列车运动到 O' 与在地面上的S系的原点 O 重合时，M 处发一闪光。此闪光经车顶头部和尾部的A、B两镜子反射后回到 M 点。

由 S' 系看来，列车长为  $L_0$ ，来回的时间相等，都为：

$$t'_{M \rightarrow M} = \frac{L_0}{c}$$



由S系看来，列车长为 $L$ ，计算可得：

$$t_{M \rightarrow M} = \frac{L}{c(1 - \frac{v^2}{c^2})}$$

由于运动钟变慢，则有

$$t_{M \rightarrow M} = \frac{t'_{M \rightarrow M}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

由上面三式可得：

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

## 二、洛伦兹变换

发生在空间-时间中的一个事件，在S参考系中记为  $(x, y, z, t)$ ，在  $S'$  系（相对S系沿  $x$  轴以速度  $v$  做匀速运动）中记为  $(x', y', z', t')$ ，它们之间的变换关系在狭义相对论中由光速不变原理可导出为：

$$\text{从S系} \rightarrow \text{S'系: } \left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{array} \right.$$

从S'系→S系:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{array} \right.$$

上述变换称为洛伦兹变换，是一个线性变换。

由上可见：

- (1) 上面两组公式只是以 $-v$ 代替 $v$ ，表示S系和S'系是彼此平等的。
- (2) 当 $v/c \rightarrow 0$ ，则洛伦兹变换回到伽利略变换。
- (3) 再看上小节高速列车的例子，当 $O$ 与 $O'$ 重合时，M发出了一个闪电，此时取 $t = t' = 0$ 。则在S系看来，下一时刻的光到达以S系原点 $O$ 为中心的一个球面，而在S'系看来，是以 $O'$ 为中心的另一个球面。这两个球面不重叠，也无法于同一时间在同一张图上画出。
- (4) 用洛伦兹变换做简单计算可得，空间和时间坐标的组合 $(x^2 + y^2 + z^2) - c^2 t^2$ 是一个洛伦兹变换下的“不变量”。

### 三、由洛伦兹变换可导出“运动钟变慢”和“运动尺变短”

#### 1. 导出运动钟变慢

设S'系相对S系沿x轴以速度v运动。在S系中观察者甲看S'系中乙的钟时，乙钟坐标x不断变化，但x'是保持不变。为此我们用（8-2-6）式中的变换关系，有

$$t_1 = \frac{t'_1 + \frac{v}{c^2} x'_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad t_2 = \frac{t'_2 + \frac{v}{c^2} x'_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

上两式中， $x'_1 = x'_2$ 。于是有

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

这表示在甲看来计时单位  $\Delta t > \Delta t'$ ，即甲认为运动的钟变慢了。

## 2. 导出运动尺变短

在S'系中乙所测到的静止的尺的长度为

$$\Delta x' = x'_2 - x'_1 = L_0 \quad (\text{与} t' \text{无关})$$

而在S系中的甲必须同时去测尺的端点的坐标之差才能正确表示其所测到的尺的长度 $L$ , 也就是时间 $t$ 一样。因此要用(8-2-5)式中变换式, 可写出:

$$x'_1 = \frac{x_1 - vt_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad x'_2 = \frac{x_2 - vt_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

现  $t_1 = t_2$ , 所以

$$x'_2 - x'_1 = L_0 = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{L}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

即有

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

这就是运动尺变短了。

## 四、速度相加定律

例图中，一名运动员在高速列车上飞跑。假定高速列车（S'系）相对地面（S系）以 $v=0.9c$ 运动，运动员又以 $u'=0.9c$ 在S'系中运动。则相对地面讲，运动员的速度 $u$ 多大？

若按伽利略变换，则 $u=u'+v=1.8c$ 。这不可能，错在何处？原来是该用洛伦兹变换了。对于匀速运动，很易证明

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$$

对上述例子，有  $u = \frac{0.9c + 0.9c}{1 + \frac{(0.9c)(0.9c)}{c^2}} = 0.9945c$



## § 8.3 质量随速度而增大 质能关系

上面讨论了相对论运动学，现在有必要转入动力学讨论。

### 一、质-能等价关系的导出以及动力学基本方程

#### 1. 爱因斯坦的大胆猜测

热力学告诉我们，“内能”与物体的质量是成正比的，据此爱因斯坦大胆猜测：一个物体的质量与它所含的全部能量成正比。根据量纲分析，可猜测比例常数等于 $c^2$ ，对一个质量为 $m$ ，运动速度为 $v$ 的粒子，总能量为：

$$E = mc^2$$

此式对否？下面将进一步论证。

对一个静止质量为 $m_0$ 的粒子，有静止能量：

$$E_0 = m_0 c^2$$

对这个粒子，经典力学早就知道，低速运动粒子的动能等于 $\frac{1}{2}m_0 v^2$ ，此动能应视为粒子能量的增量 $\Delta E$ ，考虑到对高速运动的粒子，增量还不止这些。

$$E = mc^2 = m_0 c^2 + \Delta E = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2 + \dots$$

## 2. 动力学基本方程

由上面可以进一步猜测动质量

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m_0 \left( 1 + \frac{v^2}{2c^2} + \dots \right)$$

$$E = mc^2 = m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0v^2 + \dots$$

$$p = mv = \frac{m_0v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

由上面式子可得：

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

还可定义狭义相对论下的动能 $T$ 为：

$$T = mc^2 - m_0 c^2$$

3. 上面这些式子他猜对了否？

通过一个粒子吸收一个光子的实例，可以论证（具体计算见教材），他猜对了。

## 二 狭义相对论中的多普勒效应

### 1. 纵向多普勒效应

从上面一个粒子吸收一个光子的实例中，已经得到了入射光子在S系中的频率为 $\nu$ ，则当S'系观察者以速度 $v$ 离开光源去看这个光子时，他测到的频率为

$$\nu' = \nu \frac{1 - \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \nu \sqrt{\frac{1 - v/c}{1 + v/c}}$$

向光源运动时

$$\nu' = \nu \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

不同于声波，上面两种形式可合并为（对声波，两种形式不能合并）

$$\nu' = \nu \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

只要观察者向光源运动时 $v$ 取正，离开时 $v$ 取负即可。

## 2. 横向多普勒效应

不同于声波（只有纵向多普勒效应），对光波还有横向多普勒效应。假定光源静止在 $S'$ 系中，发光的频率为 $\nu_0$ 。 $S'$ （即光源）以速度 $v$ 相对于实验室 $S$ 系（沿 $S$ 的 $x$ 轴）运动， $x'$ 轴与 $x$ 轴平行。注意此时光线与 $x'$ 轴的夹角 $\theta'$ 与此光线与 $x$ 轴的夹角 $\theta$ 并不相等，由洛伦兹变换可证得

$$\cos \theta' = \frac{\cos \theta - \beta}{1 - \beta \cos \theta}$$

当 $\theta=90^\circ$ 时，即光方向垂直S系中的x轴时，在S系的观察者测得的表观频率降低为

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

上式是一般教科书中所给出的横向多普勒效应，当 $\theta'=90^\circ$ 时，即光方向垂直S'系的 $x'$ 轴时，在S系的观察者测得的表观频率升高为

$$\nu = \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

也是一种横向多普勒效应。

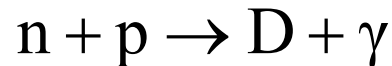
### 三、核的聚变和裂变 太阳能 原子能

通常讲的原子能就是指聚变和裂变过程中所释放的能量。

#### 1. 核的聚变

轻核聚合成较重的核而释放出能量的过程称为轻核聚变。

例如先看一个最简单的例子：一个质子和一个中子结合成一个较重的氘核，它将释放出2.224 MeV的能量（以 $\gamma$ 射线形式放出）



这个能量称为氘核的结合能。



实际对每个核，当其中这些质子和中子，由于吸引相互结合在一起成为一个原子核的过程中都有能量放出，这个能量就是这个核的结合能。

实际结合能的计算很简单，利用质能关系，可得质子和中子结合放出的结合能，即上述  $E_\gamma$  为

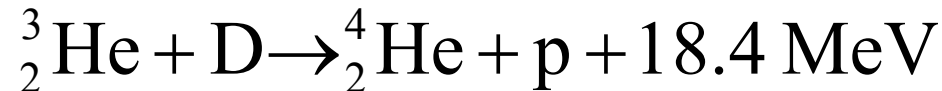
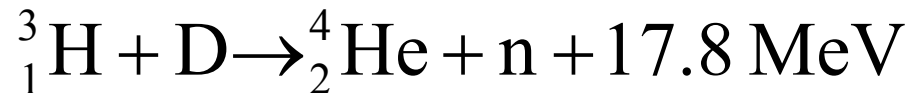
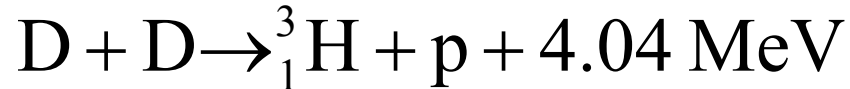
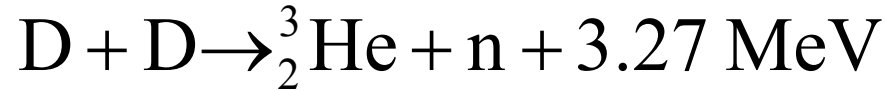
$$E_\gamma = m_n c^2 + m_p c^2 - m(\text{D})c^2$$

实际要用原子质量计算，可改为

$$E_\gamma = [m_n + M(^1\text{H}) - M(^2\text{H})]c^2$$

上述  $m$  表示核质量， $M$  表示原子质量。

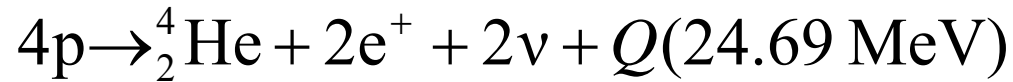
常用的聚变反应有下面4个：



## 2. 太阳能

对轻原子核聚变反应的研究，可以追溯到20世纪30年代对太阳的研究。1938年，物理学家证明，太阳里进行的氢核聚变成氦核的反应，使它还能光芒万丈地燃烧几十亿年。

太阳能来自太阳中氢核不断发生聚变反应的结果。  
忽略反应细节，从总的结果看，可写为：



$Q$ 值计算见教材。

根据计算，可知聚变反应引起的太阳质量减小率只是 $3 \times 10^{-19}/\text{s}$ ，是很小的量。目前太阳处于“中年”，估计太阳还有寿命**50**亿年。

### 3. 核聚变能源有许多无可比拟的优点：

- (1) **能量巨大**，核聚变比核裂变释放出更多的能量。聚变反应中每个核子平均贡献的能量是铀235的裂变反应的四倍。
- (2) **资源丰富**，重核裂变使用的主要原料是铀，目前探明的储量仅够使用约1000年；而轻核聚变使用的燃料是海水中的氘，1升海水能提取30毫克氘，在聚变反应中能产生约等于300升汽油的能量，即“1升海水约等于300升汽油”，地球上海水中就有45万亿吨氘，足够人类使用百亿年。

(3) **成本低廉**，1千克氘的价格只为1千克浓缩铀的1/40。

(4) **安全、无污染**，核聚变不产生放射性污染物，万一发生事故，反应堆会自动冷却而停止反应，不会发生爆炸。

总之，受控核聚变的燃料取之不尽、用之不竭，核聚变能源将是21世纪最理想的“长寿”能源。

## 4. 核裂变

重核裂变为两个中等核而释放能量的过程称为重核裂变。 $^{235}\text{U}$ 和 $^{239}\text{Pu}$ 是常用的两种裂变核，可用做反应堆和原子弹中的核燃料。例如，一个概率较大的不对称裂变：



容易计算出：

$$\begin{aligned} Q &= [m_{\text{n}} + m({}_{92}^{235}\text{U})]c^2 - [m({}_{56}^{144}\text{Ba}) + m({}_{36}^{89}\text{K}) + 3m_{\text{n}}]c^2 \\ &= 173.6\text{MeV} \end{aligned}$$

即一次裂变约有180MeV可资利用的核能。

核裂变有两个重要特征：

(1). 裂变产物通常是一块较重，一块较轻，即不对称裂变的概率大。

(2). 裂变产物由于相比它们的稳定核都是有多余电子的，所以都有 $\beta$ -放射性（寿命很长），由于原子核常处于激发态，所以有大量 $\gamma$ 射线放出。因此对放射性废物的处理极为重要。

由于可燃化石燃料（煤、石油等）贮藏已不多（估计煤可维持一二百年，石油、天然气可维持半个世纪），发展核能是非常必要的。

## § 8.4 广义相对论简介

### 一、等效原理和广义协变原理

本节主要介绍广义相对论的两个基本原理和引力场的时空弯曲特点，以及一些重要实验

#### 1. 狭义相对论存在的缺陷

- ▶ 狭义相对论改变了人们对时空观的认识，是一个革命性的突破。但是所讨论的各个参考系都只限于惯性系，它们彼此作匀速相对作用；另外，20世纪初人们只知道两种相互作用：引力和电磁作用，可是**狭义相对论未能完全解决引力问题**，万有引力定律无法纳入相对论，因此爱因斯坦并不甘心。



- ▶ 科学灵感是一种超逻辑的科学思维，但是科学创新往往来自科学灵感。爱因斯坦日夜思考如何解决狭义相对论的不足。可是他说：“有一天，转机突然出现了。我坐在伯尔尼专利局的椅子上，突然想到，如果一个人自由下落，他会感觉不到他的体重。我很吃惊，这个简单的推理实验对我影响至深，竟把我引向了引力理论。我继续设想一个下落的人处于加速的情况。此时，他的感觉和判断都是在加速运动的参考系里发生的。我决定把相对论扩展到加速运动的参考系，我认为这样做可能同时解决引力问题。”

## 2. 等效原理和广义协变原理

(1) **等效原理**：爱因斯坦关于把惯性质量和引力质量等同起来，或把加速度与引力场等同起来的假设，称为等效原理。更明确的讲应该是：**一个有引力场作用的参考系，同一个没有引力作用，但做加速运动的参考系，对物理过程的描述是等效的。**它是建立广义相对论的一个基本原理。这个原理的提出，可通过按爱因斯坦想法所做的两个假想实验来看。

先假设你乘电梯情况，脚下放一磅秤。当电梯向上加速（ $a$ 向上）时，你会感受到一个向下的惯性力

$F_{\text{inertial}} = -ma$ ，磅秤读数为

$$F = m'g + ma$$

其中 $m'$ 为引力质量， $m$ 为惯性质量。当电梯向下加速时，磅秤读数为

$$F = m'g - ma$$

假想吊电梯的钢索突然断裂，电梯与人一起自由下落，此时磅秤读数为0，这意味着**惯性质量 $m$ 等于引力质量 $m'$** 。按牛顿力学， $m$ 定义来自运动定律， $m'$ 定义来自万有引力定律。爱因斯坦把两者相等性作为广义相对论的一个基本原理提出来。

同样，观察者在密封的电梯内，看不到电梯外的情况。若电梯停止时，观察者可看到自由的物体在引力场中以加速度 $g$ 落向电梯底部。假如电梯在没有引力场的太空中以加速度 $g$ 向上运动，他也会看到自由物体以加速度 $g$ 落向电梯底部。观察者看到的都是自由物体落向底部，但前者是引力效应，后者是惯性力效应。若引力质量等于惯性质量时，观察者不可能通过任何力学实验来判别电梯是停在引力场的地面，还是在无引力场的太空中加速运动。由此实验可理解加速度与引力场的等同性。

可见根据等效原理，一定可找到一个有相应加速度的参考系，在局部空间范围内消去引力场，这种“加速参考系”被称为“局部惯性系”。

## (2) 广义协变原理（广义相对性原理）

作为相对性原理的推广，广义相对性原理可以表述为“广义协变原理”：物理方程在一般的引力场中也成立。严格讲这里“成立”是指满足两个条件：

- ①此方程在无引力场时应与狭义相对论的定律形式一致。
- ②此方程是协变的，即在广义坐标变换下（注意不再是洛伦兹变换）方程形式保持不变。

## 二、有引力场的空间-时间是弯曲的

### 1. 弯曲空间（黎曼几何）的特点

在狭义相对论中认为时、空相互无关，不再独立，是一个整体，称为四维空间。有引力场的空间-时间（四维空间）是弯曲的。

如何理解有曲率的四维空间，这是很难想象的。事实上，三维空间有弯曲，也已经难以想象了。只能回到二维空间去理解什么是弯曲（不平坦）。

举例：二维弯曲球面。所谓二维指只需两个数（经度和纬度）就可以标定球面上一点。对二维球面，已不是平直空间，与平直的欧氏（欧几里德）空间有不同的特点。前者用黎曼几何描述，后者用欧几里德几何描述，两者不同点见下表。

	空间曲率	平行线	三角形内角之和	圆周率	两点间最短线	例
黎曼几何	正	无	$>180^\circ$	$<\pi$	不是直线	球面
欧几里德几何	零	一条	$=180^\circ$	$=\pi$	直线	平面

## 2. 万有引力是时空弯曲的表现

爱因斯坦推测引力效应可能是一种几何效应。万有引力不是一般的力，而是时空弯曲的表现。由于引力与质量有关，所以时空弯曲与物质的存在和运动有关。举如下一个形象的例子说明。



假使有4个人各拉紧床单的一角，床单这个二维空间就是平坦的。放一个小玻璃球在上面，如果不去推它，它就会保持静止或匀速直线运动状态（假定摩擦力可忽略）。如果在床单中央放一大球，床单就会凹下去，这个二维空间就弯曲了。这时如果再放一个小玻璃球在床单上，它就会滚向中央的大球。按牛顿观点，这是由于大球用“万有引力”吸引小球。按爱因斯坦观点，则是由于大球的存在使空间弯曲了，并不存在什么“引力”，**小球落向大球乃是弯曲空间中的自由（惯性）运动**。这时如果给小球一个横向速度，它就会绕大球转起来。按牛顿观点，这是由于小球受大球引力而沿圆形轨道运动。按爱因斯坦观点，小球并未受到任何力，只是在弯曲空间中做自由运动。

注意到，上面比喻仅仅是直观的讲了弯曲空间，实际广义相对论说的是四维“时空”的弯曲。太阳的存在，使四维时空弯曲了。行星绕日运动就是在弯曲时空中的惯性运动。按此观点，早年，伽利略所认为的行星绕日运动也是惯性运动的想法，其实是正确而深刻的。

### 3. 弯曲时空几何等同于引力场物理

爱因斯坦所给出的广义相对论基本方程，又称爱因斯坦场方程。此方程把几何学与引力论融合为一个整体，把时空与物质运动融合为一个整体。在场方程中把反映时空曲率的量与联系物质分布和运动的量（能量和动量）联系起来。场方程是由一组非线性偏微分方程组成。方程中包含了万有引力常数 $G$ 和光速 $c$ ，自然的引入了物质引力对时空的影响。方程求解很困难，爱因斯坦当时求得一些近似解，提出了三个检验广义相对论的实验：引力红移、光线偏折、轨道进动。后来都得到了证实。

### 三. 广义相对论的实验验证

#### 1、光在引力场中的红移

1907年爱因斯坦由广义相对论预言：光的频率在引力场中也会减少（即可见光向红色移动），称引力红移，相反也可能升高，称引力紫移。

1960年美国科学家庞德和里布卡首先在地球上利用穆斯堡尔效应，测得了光子从高塔上（ $H=21.3\text{ m}$ ）向下发射，在地面上测量到了光子频率的微小增高。

$$\Delta E = h\Delta\nu = mgH = \frac{h\nu}{c^2} gH$$

所以 
$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{Hg}{c^2} = 2 \times 10^{-15}$$

**1960年后，实验测得了太阳的引力红移。**

## 2. 光线或无线电波在经过引力场时的偏折

能量为 $E=h\nu$ ，相应质量

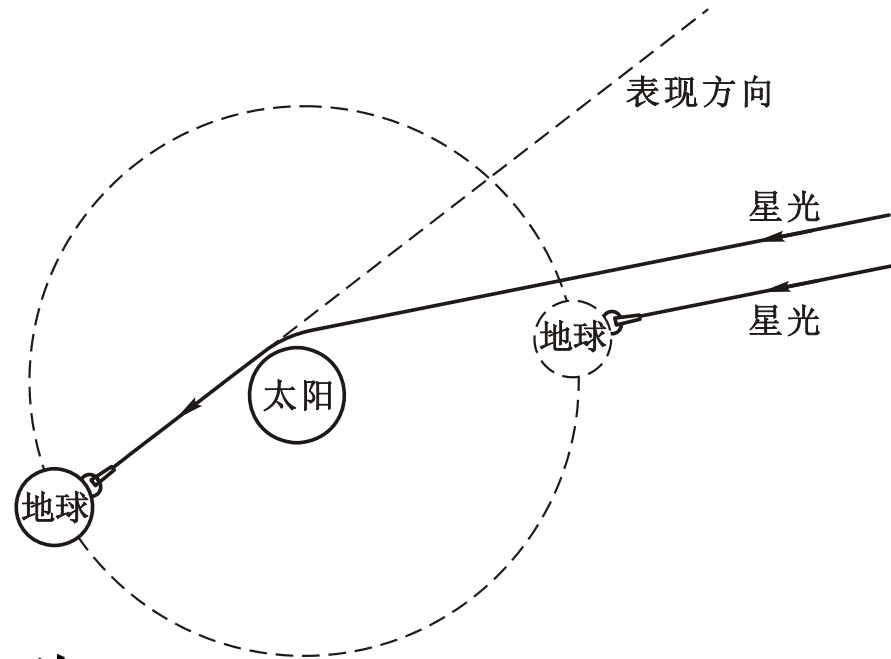
为 $m = \frac{h\nu}{c^2}$ 的光子，在经过

太阳表面附近时，由于引力场作用（时空弯曲）会偏离

直线。按广义相对论计算偏转角为：

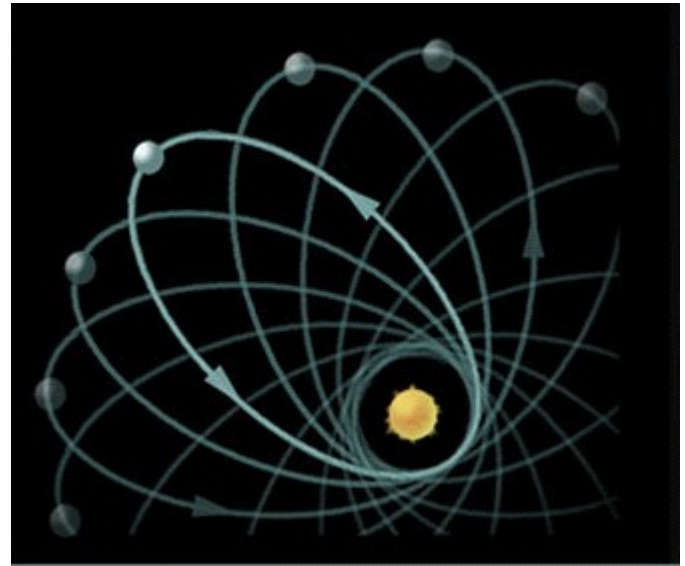
$$\alpha = \frac{4Gm}{c^2 R} = 1.75''$$

这结果是用牛顿力学和万有引力定律所得结果的2倍。  
该结果1919年得到了实验的证实，全球为之轰动。



### 3. 水星轨道近日点的进动

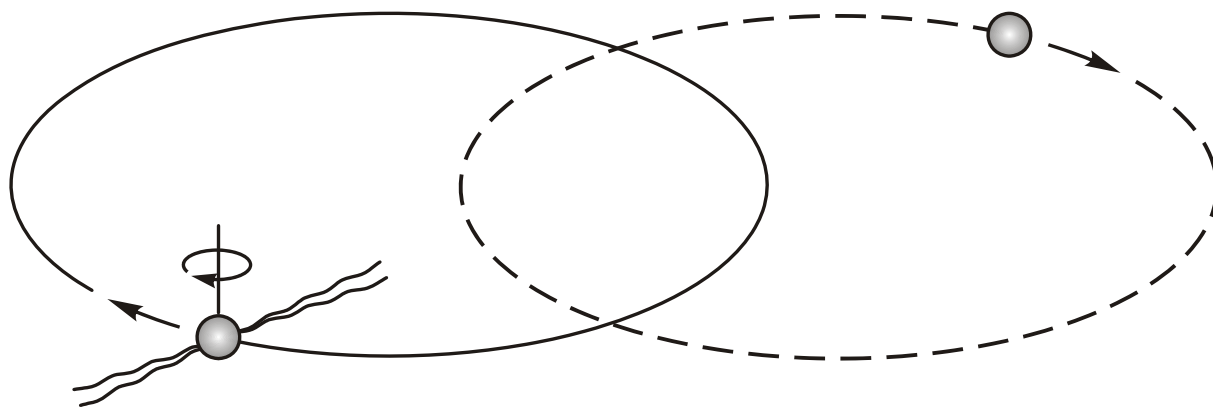
爱因斯坦还计算出了最靠近太阳的行星——水星的椭圆轨道会发生进动。这是因为根据广义相对论，在太阳周围空间发生弯曲，使行星运动轨道进一步弯向太阳，于是不再是一个封闭的椭圆了。行星每转一圈又回到近日点时，近日点位置有一个移动，这现象称为行星近日点的进动。也得到了实验的证实，这是广义相对论得到证实的第一个实验。



水星进动

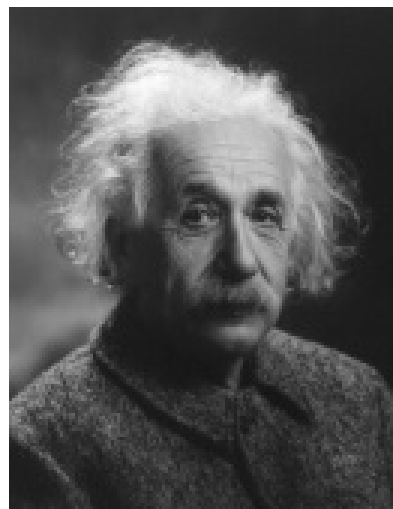
#### 4. 双星的引力辐射

广义相对论还预言了物质做加速运动时有了引力波发射。由于引力辐射比电磁辐射弱得多，因此所引起的能量损失也非常小。在地球上至今未观察到引力波。20世纪70年代以后，在天体运动中观察到了一脉冲双星系统的轨道周期有微小变短的现象，计算表明这是由于辐射引力波引起的。



## 四. 一位伟大的科学家和思想家

- ▶ 英国著名杂志《物理世界》在100位著名物理学家中评选出的10位最伟大者中，爱因斯坦排名第一。

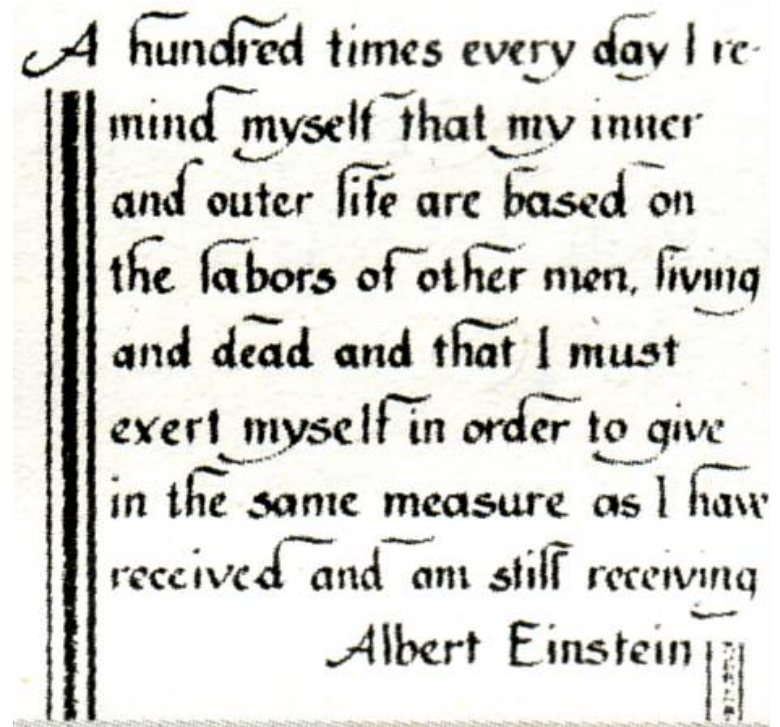


爱因斯坦

- ▶ 在1999年英国广播公司（BBC）通过网上评选出的1000年来最伟大的10位思想家中，爱因斯坦在马克思之后排名第二。



- ▶ 爱因斯坦留给他儿子的一张座右铭上写着：“**每天都无数次地提醒自己，我的内心和外在的生活，都是建立在其他活着的和死去的人的劳动的基础上。我必须竭尽全力，像我曾经得到的和正在得到的那样，作出同样的贡献。**”正是对社会、对人类的强烈责任感，激励他为科学事业孜孜不倦奋斗终身。在他逝世前夕还让他儿子把科研手稿取出来打算继续工作。



A hundred times every day I remind myself that my inner and outer life are based on the labors of other men, living and dead and that I must exert myself in order to give in the same measure as I have received and am still receiving

Albert Einstein

- ▶ 爱因斯坦的教育思想值得现代教育借鉴，他在《论教育》中一再强调：“学校的目标是培养具有独立行动和独立思考的人，不过他们要把为社会服务看作是自己人生的最高目的。”
- ▶ 1954年4月17日状况稍有些好转，他就要继续作关于统一场论的计算工作，不幸第二天凌晨与世长辞。
- ▶ 爱因斯坦逝世时留下遗嘱：“不举行葬仪，不建坟墓，不立纪念碑，把大脑献给医学事业，把骨灰撒到不为人知的地方”