

## 第五讲： 能量守恒

**【主要内容】**：简单介绍有哪些不同类型的能量，以及这些能量有什么样的性质。

**【授课重点】**：能量的形式以及能量的意义

### 1、介绍能量的概念

能量是用来描述物质运动能力的一个物理量，它有多种表现形式，如动能、势能、场能等等。经济发展的很大部分来自于能量的发展  
任何能量的形式确立在历史上都经历了很长时间，比如 17 世纪莱布尼茨的“活力”想法，定义为一个物体质量和其速度的平方的乘积，相当于今天的动能的两倍。

### 2、能量守恒

能量守恒定律是经验规律（其实所有的物理定律都是来自于经验），它是物理学中最重要的规律之一

通过大量的实验观测，人们发现能量是守恒的，即其总量不随时间而改变，它是个常数。任何规律都不是先验的，做有限的实验，然后进行归纳推广。在历史上，能量守恒的规律遇到过几次危机。曾多次以为它不是守恒的，但最终的结果仍是能量守恒。

为什么能量会守恒仍然没有完全被人们理解。一般认为这与时间流逝的均匀性有关。即当你今天做实验得到了一个结果，改天做同样的实验也仍得到同样的结果。

第一个提出能量守恒的是 Julius Mayer (1814-1878)，他当时是在研究热力学时提出这个概念。这个结果后来在热力学中表现为热力学第一定律。能量不会无故产生或无故消失，只会由一种形式转变为另一种形式。

例：在伽利略的小球斜板下滑的实验中发现位移和时间的平方成正比。而速度跟时间  $t$  成正比，则距离跟速度的平方成正比；

$$D \propto t^2 \rightarrow v \propto t \rightarrow D \propto t^2$$

由此可以得到

$$FD = \frac{1}{2}mv^2$$

其中  $F$  和  $m$  为比例系数（这样的设定仅是为了和标准的定义一致）。如果定义滑块的动能为

$$T = \frac{1}{2}mv^2$$

定义势能为

$$\phi = -FD + constant$$

则可以发现它们的和  $T + \phi$  是常数。将之称为体系的机械能。

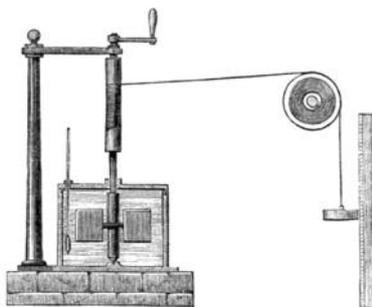
T 举例伽利略小球斜板实验：位移和时间的平方成正比；距离跟时间的平方成正比；速度跟时间  $T$  成正比。

### Historical challenges to establish energy conservation?

#### 热能

对于伽利略斜板实验，我们得到了一个机械能守恒的结论。但是这是当滑块和滑板之间的摩擦非常小，可以忽略的情况下得到的。在一般的情况下，实验的结果并不能得到这个结论。滑块下滑后获得的速度比无摩擦情况下的要小。那么能量是不是就是不守恒了。在这种情况下很显然机械能是不守恒的。但在实验中会发现摩擦的时候会产生热，也就是说滑块和斜板的温度会发生改变。这也是在生活中经常遇到的现象，当天冷的时候我们会摩擦双手以取暖。于是会产生一个猜测，丢失的机械能会不会转变成了热呢？对于热的测量是存在一些困难的。这又与温度的概念有关。

18 世纪末，人们认识了热与运动有关。这为后来焦耳研究热与功的关系开辟了道路。焦耳认为热量和功应当有一定的当量关系，即热量的单位卡和功的焦耳单位焦耳间有一定的数量关系。他在 1840 年设计了热功当量实验。这个实验是



把一个机械能转化成热量，然后看之间是否有固定的比例关系，我们看到图中有个重物，从上往下，就有一个机械能的损失，如果不损失的话是非常快的掉下来，

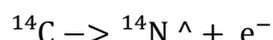
势能转化为动能。在实验中容器，里面装了水，里面有个叶片，绳子拉的时候会转，叶片和水发生了摩擦产生阻力，使得重物的下落变得非常缓慢，其动能基本可以忽略，那么势能跑哪里去了呢？容器中水的温度会发生变化。测量水温的变化，观察它与势能减少之间的关系。通过实验，发现了有这样一个关系

$$1\text{cal} = 4.1860\text{J}$$

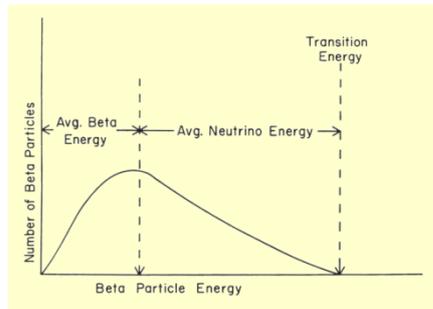
不过当时没有这么高的精度，大概 4.1 的样子，这已经很好了。这一结果称为热功当量。现在的实验为了方便，把机械能改成电能，里面用电热丝加热，看电能和热能之间的转换关系，最后得到的结果还是一样的。既然机械能和热能有个固定的转换关系，那么这两个量就可以认为是同样的物理量。考虑了热能之后能量守恒的关系又恢复了。

#### Energy non-conservation in beta decay?

原子的衰变意味着原子是不稳定的，我们最早会提问，物质的结构是什么，物质组成部分的最小单位是什么？或者说是否有最小单位？如果有，能不能改变？早期人们是希望能改变的，所以出现炼金术，希望能把一块石头变成金子，但是后来发现元素是很难改变的。1898 年居里夫人发现了具有放射性的镭元素，获得诺贝尔奖。镭衰变后会变成其他元素。从一个元素变成另外一个元素，伴随这个变化，会放出一些射线，后来发现就是电子。这种衰变被称为贝塔衰变。前面讲过的炭的衰变，就是贝塔衰变。碳 14 的衰变方程如下。



碳 14 的寿命大约为 5730 年。对于静止的碳 14 原子，其衰变后变为氮原子核电子。考虑到氮原子质量比电子质量大的非常多，衰变后氮原子也是近似静止的，而电子则高速飞出。这样氮原子的动能可以基本忽略，只要考虑电子的动能就够了。如果碳 14 衰变过程释放的能量是不变的话，电子应该获得一个确定的动能。但实验上发现不是这样的！实验上要测电子式一个统计的结果，假如能做到对一个一个的炭去测，第一个炭是一个值，第二个炭可能就不是那个值，第三个又换了个值。实验中最后统计来说我们得到了一条曲线，这个曲线是一个连续的曲线，而不是一个唯一的值，这个和刚才的推论是矛盾的。（如图所示）



从上图我们再考虑是不是氮有问题，忽略其动能是否有问题？计算一下动能会发现其影响要比这个小很多，所以氮的动能不会对上图这样一个结果起到决定性作用。但有另外的一个东西会对它有影响：它实际上还有核能，也就是说原子核会处于不同的状态。同样是氮原子，但原子核处于不同状态，能量是不一样的，我们可以把这个算进去。但算进去又发现问题会更大：通过实验会发现核能是分立的，不是连续的，而这里得到一个连续的曲线图，因此肯定有问题。所以当时人们觉得在这样一个过程里能量就是不守恒的，后来泡利提出一个新的想法解决了这个问题：这里不是能量不守恒，而是少了一个东西！泡利认为在衰变过程中还放出了一个他称之为中微子的粒子，这个粒子质量非常小，不带电，因此在实验中很难观测到，它带走了额外的能量。加上这个能量，能量守恒就恢复了。后来的确发现了这一粒子。

**能量的形式，从特性上来分类：**

#### Gravitational energy

物质之间都存在万有引力场，这个引力场所具有的能量称为引力能。在地球表面附近，这个引力能就是重力势能 $mgh$ ，其中  $m$  为质量， $g$  为万有引力常数， $h$  为高度。

#### Kinetic energy

动能是最常见的能量形式，当物体运动时所具有的能量，低速运动时具体形式为 $\frac{1}{2}mv^2$ 。对于高速（相当于光速而言）运动的物体，其动能有另外的形式。

#### Heat energy

现在人们知道，热能的根本还是机械能，是每个分子的运动叠加。温度越高，分子动的越快。

#### Elastic energy

弹性能为弹簧压缩或伸长时所具有的能量。

### Electric energy

电能是电场所具有的能量，很多能量的本质就是电磁能。

### Chemical energy

化学能是化学变化中产生或吸收的能量，对应于元素化合到一起时的化合能。燃油所具有的能量既是化学能又是生物能。

### Radiant energy

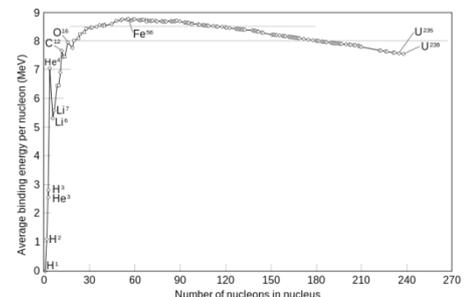
辐射能是各类辐射时所具有的能量，不同类型的辐射其能量本质不同。如电磁辐射或光辐射其辐射能为电磁能，贝塔辐射的辐射能为电子动能。

### Nuclear energy

核能为原子核发生变化时产生或吸收的能量。太阳为我们提供了大量的能量，其来源是氢发生核聚变的过程，并以光和中微子的形式放出。两个分离的质子结合在一起时会放出结合能，这个能量以伽马辐射和热的形式放出。目前的核电站利用的不是核聚变过程，而是核裂变过程。

核能不是电磁能，虽然电磁之间的相互作用是非常重要的，但是核能对于我们现在的社会也是相当重要的，在中国不是很明显。而在欧洲很多国家用的电大部分是核能，核能是强弱相互作用对应的能量。核能通常有两种，一种是聚变，一种是裂变。比如我们几乎所有的能量来源于太阳，太阳在干什么呢？它在不停的“放氢弹”，氢在聚合成其它原子的过程中释放出能量，比如两个质子放在一起，它们离得远的时候其实中间是有能量的，放进了能量反而变小，能量从大到小，多出来的部分就释放出来了，这个能量就称为原子的结合能，小原子聚合成大原子，之间有个能量差别，这个能量的变现形式主要是热和光电磁。

可控的核聚变还没有完全实现，人们现在做的比较好的是裂变，裂变就是把大的原子，比如  $U_{235}$ ，中子数和质子数加到一起有 235 个，很大的东西，让它比如一分为二。我们发现它会放出能量，刚才是放一起了，结合能变小，现在分开了，也发生同样的事情，这个过程相对容易，所以现在所有的核电厂都使用裂变。下面是一张图，代表不同的原子对应的结合能。



从上图看出两头低中间高，横轴对应的是核子数的多少，从而判断是哪类原子，比如中间高的地方实际上是铁。从图中可以看出由一个元素变成另外一个元素，能量释放的大小。这张图解释了为什么说核聚变能量要比核裂变大很多。

一个新的问题是，我们有那么多的能量，是不是都可以拿来用？早期把这个问题研究得比较透彻的不是物理学家，而是工程师卡诺，他考虑了一个热机的热效率可以达到多高。

### Mass energy

爱因斯坦发展出来的相对论发现质量和能量之间也是可以相互转换的，因此质量也可以看成一种能量形式，其大小为  $E = mc^2$ ，其中  $c$  为光速。

### Useful energy

人类做的很多事情就是找各种各样容易使用的能源。有些能源比另外一些能源更有些，我们现在常用的能源是煤炭，石油和引力造成的能量，比如水电站等。

### Energy crisis

随着现代社会的高度发展，人们对能量的需求高速膨胀。而能作为能源的资源是有限的。有可能几十年后地球上现有的能源将不够人类使用。因此发现和开发新能源是一件很紧迫的事情。

### 物质守恒

和能量守恒紧密相关的还有物质守恒。能量和质量，我们甚至可以认为是同一种东西的不同表现，它们可以互相转化。刚开始化学家在密闭容器里燃烧，发现物质质量不变，但是随着发展，到原子原子核的结构，发现这种形式不够，只计算质量，发现似乎质量会发生改变。比如计算两个质子，一个氦，结果不等，氦的质量小，那质量去哪里了？我们需要算结合能， $E=MC^2$ ，所以现代物理中，我们要将能量守恒和物质守恒结合到一起考虑。

## Lecture 6: Kinetics of a point particle

### 质点

质点是一种理想模型，它没有大小，为数学上的点粒子。在物理研究中做近似是一种非常重要的方法。好的近似在简化问题的同时又没有丢失其中重要的物理。质点模型就是一种近似。比如在考虑地球如何绕太阳运动的过程中将太阳和地球都看成质点就是一个“足够好”的近似。在判断一个近似是否“足够好”的一个重要标志是看近似所造成的误差大小与观测误差大小之间的关系。如果近似所造成的误差远大于观测误差，那么这样的近似就不够好。通常当物体大小与运动范围相比小得多的情况下都是可以做质点近似的。

在实际观测中，我们不可能测量物体上所有的点，只能测量其上的几个点。测量中将假设所有的点的运动轨迹都是光滑曲线。其实我们并不知道时间和空间是否是连续的，甚至于我们并不知道讨论无限精度的测量是否有意义。从实验的角度看，考虑到存在测量误差，因此在误差精度内将运动轨迹考虑为光滑曲线是可行的。

在质点近似下，物体的运动在数学上就可以用一条曲线来表示。对于一维运动，如果坐标记为  $s$  的话，其运动轨迹就记为  $s(t)$ 。

### 速度、加速度

由运动轨迹计算速度和加速度需要引入微积分的概念。以速度为例，微积分的基本思想是以平均速度出发，将计算平均速度的时间间隔推到无穷小，从而得到的极限。考虑在一小段时间间隔  $\Delta t$  内质点运动的距离为  $\Delta x$ ，则这段时间中的平均速度为

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

一般来说， $\Delta t$  不同时，所得到平均速度也会不同。但当将  $\Delta t$  变得越来越小时，所得到的平均速度会趋于一个常数。此常数定义了瞬时速度

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} \equiv \frac{ds}{dt}$$

$\frac{ds}{dt}$  称为  $s$  对  $t$  的微分。在实际测量中  $\Delta t$  不会是无穷小的，因此实际测量出来的速度都是平均速度。但只要  $\Delta t$  足够小，所得到的平均速度就是瞬时速度的很好的近似。对于加速度可以相同的方式来计算和测量。

## 运动路程

在知道了速度随时间变化 $v(t)$ 的情况如何计算经过一段时间后质点运动的距离呢？这和知道了路径计算速度是相反的过程。类似地也可以用近似取极限的方法。

考虑一系列时间间隔 $\Delta t_i, i = 1 \dots N$ 。如果在每个时间间隔中质点的平均运动速度为 $\bar{v}_i$ ，则总的运动距离应该为

$$s = \sum_i \bar{v}_i \Delta t_i$$

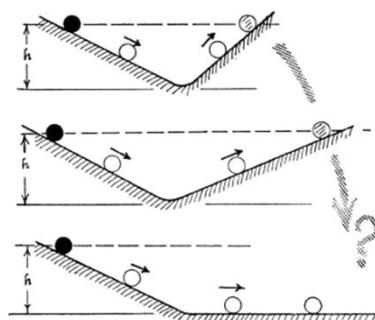
当取极限让每个 $\Delta t_i$ 都趋于无穷小的时候（此时 $N$ 趋于无穷大），求和中的 $\bar{v}_i$ 将趋向瞬时速度。将这样的极限记为

$$s = \int v(t) dt$$

这称为积分。

## 牛顿第一定律：力及其影响

历史上曾以为力是使得物体运动的原因，当推一个物体的时候用力物体就开始运动，但不推了物体就会停下来。亚里士多德因此认为有了力物体才能运动。伽利略仔细考虑了他的斜板滑块实验。如果将两个斜板对接到一起（如图所示），然后在某个高度 $h$ 放开滑块。滑块下滑后会冲到对面的斜面上，并且上升到相同的高度上。当然，在实际实验中由于斜面的光滑程度，滑块不会上升到相同的高度上去，而是会稍低一些的地方。伽利略观察到这是由于斜面粗糙造成的，改善斜面的粗糙程度，让它光滑一些，滑块就是冲的更高。于是他设想如果是特别光滑的话，滑块应该升到相同的高度。这样的设想现在称为理想实验。之后的推理都是按照理想实验的方式进行的。



当然，在实际实验中由于斜面的光滑程度，滑块不会上升到相同的高度上去，而是会稍低一些的地方。伽利略观察到这是由于斜面粗糙造成的，改善斜面的粗糙程度，让它光滑一些，滑块就是冲的更高。于是他设想如果是特别光滑的话，滑块应该升到相同的高度。这样的设想现在称为理想实验。之后的推理都是按照理想实验的方式进行的。

理想实验在通过实际实验设想在“理想”情况下会发生什么样的事情。这种“理想”情况可能是在实际实验中无法实现的。利用理想实验是物理学中最重要的研究手段之一。

伽利略进一步考虑在上面的实验中改变第二块斜板的角度的，在预计中，滑块上升的高度不会改变。但在不同的倾角下，水平方面滑块运动的距离是不同的。

那么将倾角变得很小，甚至于水平会怎么样。没有倾角时，伽利略认为滑块会一直运动下去。而这一结果与亚里士多德所描述的不同。

以此实验出发，牛顿发展出了牛顿第一定律，也称为惯性定律：当一个物体不受外力，或所受外力和为零时，物体保持匀速直线运动。这一定律是依赖于观测者的，不是所有的观测者都会得到这样的结论的。有一类参照系中的观测者发现物体运动符合这一定律。这类参照系称为惯性参照系。以后在没有特别声明的情况下，我们默认使用惯性参照系。

### 加速度

根据牛顿第一定律，没有力的时候物体保持匀速直线运动。那么有力的时候物体的运动状态就有可能发生改变，因此需要描述物体的运动状态如何改变的，这样就需要定义加速度的概念，即物体速度的变化率。类似于速度的定义，定义平均加速度为

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

而瞬时加速度为

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

当然类似的还可以定义加速度的变化率，但在一般情况下这样的物理量用处不大。

### 三维空间

我们所处的空间并不是一维的，而是三维的，因此需使用三维坐标。在三维坐标下，质点的坐标由三维矢量表示

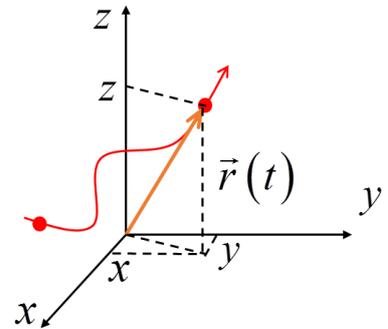
$$\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k}$$

利用三维矢量计算，同样可以定义瞬时速度

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \dot{x}\vec{i} + \dot{y}\vec{j} + \dot{z}\vec{k}$$

### 惯性系与伽利略坐标变换

牛顿第一定律是在惯性系中成立的，但惯性系不只有一个。实际上相对以匀速直线运动的参照系都是惯性系。那么如何从一个惯性系变到另一个惯性系中呢，这就需要用伽利略坐标变换。如果一个质点在某个惯性系中的坐标为 $\vec{r}, t$ ，在另



一个惯性系中的坐标为 $\vec{r}', t'$ 。第二个惯性系相对于第一惯性系以速度 $\vec{v}$ 匀速直线运动，则两个惯性系中的坐标变换关系为

$$\vec{r} = \vec{r}' + \vec{v}t', \quad t = t'$$

注意在伽利略变换中空间和时间是分离的，时间是绝对的。这在高速运动时并不正确，相应的修正为洛伦兹变换。

在伽利略变换下，同一质点在不同参照系下运动速度是不同的，但加速度是相同的，这是因为惯性系间相对运动的速度是常矢量，不随时间变化。

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}'}{dt'} + \vec{v}, \quad \vec{a} = \vec{a}' \quad \frac{d\vec{v}}{dt} = 0$$

课前预读：

《费曼物理学讲义》I：Chap.4&8

《新概念物理教程：力学》：第一章第1、4、5节、第三章第1、3节

Recitation

内容：讨论能量及测量误差、

- 以自由落体照片讨论相关误差产生的机制和测量方法。
  - 系统误差和测量误差，强调误差的定量计算
- 能量的本质和转化
- 初步了解势能曲线
- 讨论为何考虑一个物体的动能时忽略了物体中分子原子的运动