

普通高中教科书

# 物理

选择性必修

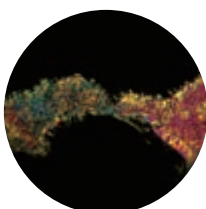
第三册



# 目 录



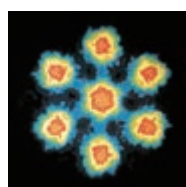
|                     |    |
|---------------------|----|
| <b>第一章 分子动理论</b>    | 1  |
| 1. 分子动理论的基本内容       | 2  |
| 2. 实验：用油膜法估测油酸分子的大小 | 7  |
| 3. 分子运动速率分布规律       | 10 |
| 4. 分子动能和分子势能        | 14 |



|                     |    |
|---------------------|----|
| <b>第二章 气体、固体和液体</b> | 18 |
| 1. 温度和温标            | 19 |
| 2. 气体的等温变化          | 23 |
| 3. 气体的等压变化和等容变化     | 26 |
| 4. 固体               | 31 |
| 5. 液体               | 36 |



|                  |    |
|------------------|----|
| <b>第三章 热力学定律</b> | 45 |
| 1. 功、热和内能的改变     | 46 |
| 2. 热力学第一定律       | 50 |
| 3. 能量守恒定律        | 54 |
| 4. 热力学第二定律       | 59 |



|                       |    |
|-----------------------|----|
| <b>第四章 原子结构和波粒二象性</b> | 66 |
| 1. 普朗克黑体辐射理论          | 67 |
| 2. 光电效应               | 71 |
| 3. 原子的核式结构模型          | 78 |
| 4. 氢原子光谱和玻尔的原子模型      | 84 |
| 5. 粒子的波动性和量子力学的建立     | 92 |



|                |     |
|----------------|-----|
| <b>第五章 原子核</b> | 100 |
| 1. 原子核的组成      | 101 |
| 2. 放射性元素的衰变    | 108 |
| 3. 核力与结合能      | 115 |
| 4. 核裂变与核聚变     | 119 |
| 5. “基本” 粒子     | 126 |

|      |     |
|------|-----|
| 课题研究 | 132 |
| 索引   | 136 |



# 1

## 第一章

# 分子动理论

暮春时节，金黄的油菜花铺满了原野。你有没有想过，为什么能够闻到这沁人心脾的香味呢？古希腊学者德谟克利特早就对此作出了解释，他认为这是由于花的原子飘到了人们鼻子里。德谟克利特认为“只有原子和虚空是真实的”。

这些“花的原子”究竟是怎么运动的？经过很长一段探索历程之后，人们逐渐认识到，这种运动也是自然界中普遍存在的一种运动形式——热运动。热学就是研究物质热运动规律及其应用的一门学科，是物理学的一个重要组成部分。



热学这一门科学起源于人类对于热与冷现象的本质的追求……(这)可能是人类最初对自然法则的追求之一。

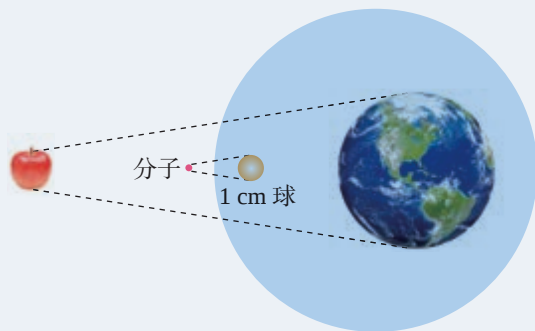
——王竹溪<sup>①</sup>

# 1 分子动理论的基本内容

## 问题 ?

如果我们把地球的大小与一个苹果的大小相比，那就相当于将直径为1 cm的球与分子相比。可见，分子是极其微小的。

我们曾经研究过物体的运动，那么，构成物体的微小分子会怎样运动呢？



## 物体是由大量分子组成的

我们在初中已经学过，物体是由大量分子组成的。需要指出的是：在研究物质的化学性质时，我们认为组成物质的微粒是分子、原子或者离子。但是，在研究物体的热运动性质和规律时，不必区分它们在化学变化中所起的不同作用，而把组成物体的微粒统称为分子。

我们知道，1 mol 水中含有水分子的数量就达  $6.02 \times 10^{23}$  个。<sup>②</sup>这足以表明，组成物体的分子是大量的。人们用肉眼无法直接看到分子，就是用高倍的光学显微镜也看不到。直至1982年，人们研制了能放大几亿倍的扫描隧道显微镜<sup>③</sup>，才观察到物质表面原子的排列。图1.1-1是我国科学

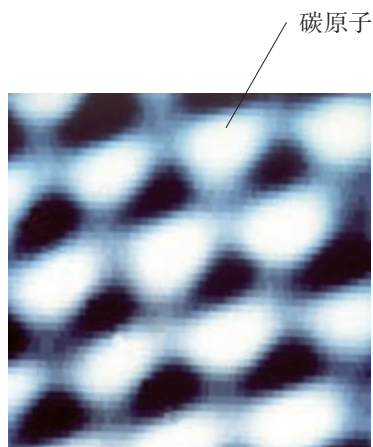


图 1.1-1 石墨表面原子的照片

① 王竹溪（1911—1983），中国物理学家，中国科学院学部委员（现称院士），北京大学教授。

② 1 mol 的任何物质都含有相同的粒子数，这个数量用阿伏加德罗常数表示，即  $N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。

③ 扫描隧道显微镜是一种可以探测物质表面结构的仪器，它通过移动着的探针与物质表面的相互作用，将物质表面原子的排列状态转换为图像信息，获得具有原子尺度分辨力的表面形貌信息。

家用扫描隧道显微镜拍摄的石墨表面的原子，图中每个亮斑都是一个碳原子。

## 分子热运动

**扩散** 从许多实验和生活现象中我们都会发现，不同种物质能够彼此进入对方。在物理学中，人们把这类现象叫作**扩散**（diffusion）。扩散现象并不是外界作用（例如对流、重力作用等）引起的，也不是化学反应的结果，而是由物质分子的无规则运动产生的。例如，图 1.1-2 中酱油里的色素分子扩散到了鸡蛋清内。扩散现象是物质分子永不停息地做无规则运动的证据之一。



图 1.1-2 酱油的色素分子扩散到蛋清中

扩散现象在科学技术中有很多应用。例如，在生产半导体器件时，需要在纯净半导体材料中掺入其他元素。这一过程可以在高温条件下通过分子的扩散来完成。

**布朗运动** 19 世纪初，一些人观察到，悬浮在液体中的小颗粒总在不停地运动。1827 年，英国植物学家布朗首先在显微镜下研究了这种运动。下面我们做一个类似的实验。

### 演示

#### 用显微镜观察炭粒的运动

如图 1.1-3，取 1 滴用水稀释的碳素墨汁，滴在载玻片上，盖上盖玻片，放在高倍显微镜下观察小炭粒的运动情况。调节显微镜的放大倍数，如调节至 400 倍或 1 000 倍，观察悬浊液中小炭粒的运动情况。目镜中观察的结果可以通过显示器呈现出来。

改变悬浊液的温度。重复上述操作，观察悬浊液中小炭粒的运动情况。

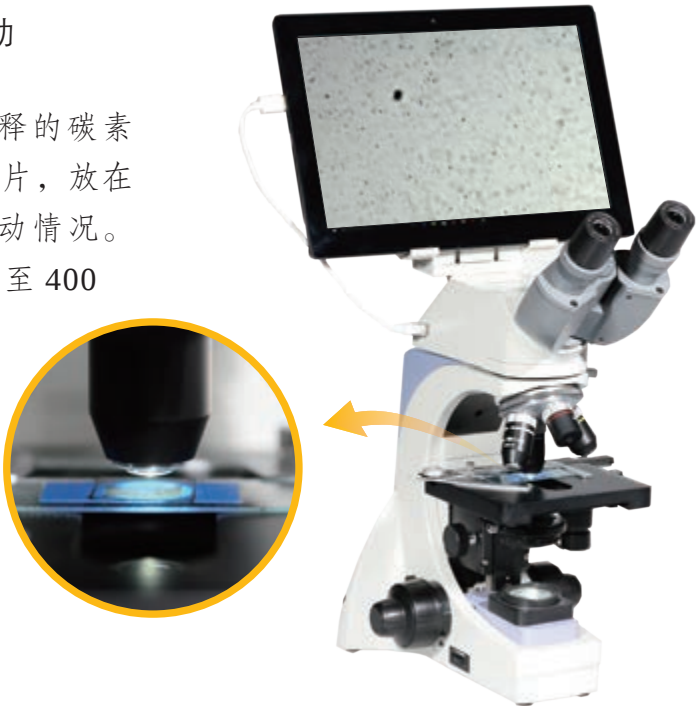


图 1.1-3 观察布朗运动的实验装置

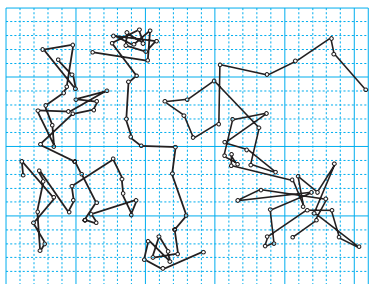


图 1.1-4 三颗微粒运动位置的连线

从实验结果可以看出，小炭粒的运动是无规则的，温度越高，小炭粒的运动越明显。

如果在显微镜下追踪一颗小炭粒的运动，每隔 30 s 把炭粒的位置记录下来，然后用线段把这些位置按时间顺序依次连接起来，便可以得到一条类似于图 1.1-4 中某一颗微粒运动的位置连线。这表明微粒的运动是无规则的。实际上，就是在 30 s 内，微粒的运动也是极不规则的。

当时布朗观察的是悬浮在水中的花粉微粒。他起初认为，微粒的运动不是外界因素引起的，而是其自发的运动。是不是因为植物有生命才产生了这样的运动？布朗用当时保存了上百年的植物标本，取其微粒进行实验，他还用了一些没有生命的无机物粉末进行实验。结果是，不管哪一种微粒，只要足够小，就会发生这种运动；微粒越小，运动就越明显。这说明微粒的运动不是生命现象。后人把悬浮微粒的这种无规则运动叫作**布朗运动**（Brownian motion）。

### 思考与讨论

为什么花粉微粒的运动是无规则的？为什么微粒越小，它的无规则运动越明显？

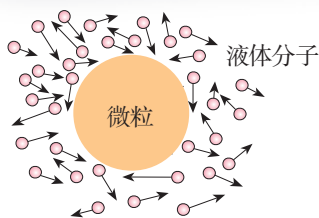


图 1.1-5 液体分子沿各方向对微粒的撞击

► 分子的无规则运动无法直接观察。悬浮微粒的无规则运动并不是分子的运动，但这一现象可以间接地反映液体分子运动的无规则性。

如图 1.1-5，在显微镜下看起来连成一片的液体，实际上是由许许多多分子组成的，液体分子不停地做无规则运动，不断地撞击微粒。在某一瞬间，微粒在某个方向受到的撞击作用较强；在下一瞬间，微粒受到另一方向的撞击作用较强，这样就引起了微粒无规则的运动。

悬浮在液体中的微粒越小，在某一瞬间跟它相撞的液体分子数越少，撞击作用的不平衡性就表现得越明显，并且微粒越小，它的质量越小，其运动状态越容易被改变，因而，布朗运动越明显。如果悬浮在液体中的微粒很大，在某一瞬间跟它相撞的分子数很多，各个方向的撞击作用接近平衡，这时就很难观察到布朗运动了。

**热运动** 在扩散现象中，温度越高，扩散得越快。观察布朗运动，温度越高，悬浮微粒的运动就越明显。可见，分子的无规则运动与温度有关系，温度越高，这种运动越剧烈。因此，我们把分子这种永不停息的无规则运动叫作**热运动**（thermal motion）。温度是分子热运动剧烈程度的标志。

## 分子间的作用力

气体很容易被压缩，说明气体分子之间存在着很大的空隙。固体或液体不容易被压缩，那么，分子之间还会有空隙吗？



### 做一做

向 A、B 两个量筒中分别倒入 50 mL 的水和酒精（图 1.1-6 甲），然后再将 A 量筒中的水倒入 B 量筒中，观察混合后液体的体积（图 1.1-6 乙）。它说明了什么问题？

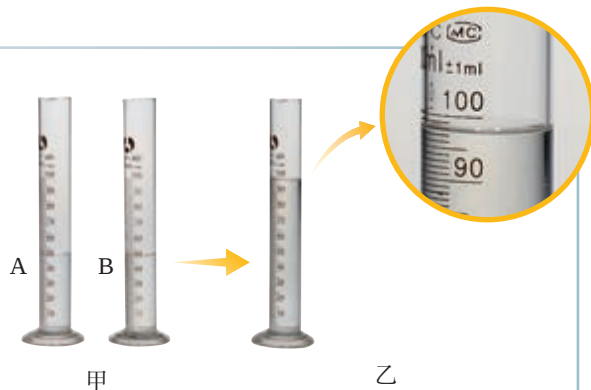


图 1.1-6 观察液体混合后体积的变化

水和酒精混合后的总体积变小了。这表明液体分子间存在着空隙。再如，压在一起的金块和铅块，各自的分子能扩散到对方的内部，这表明固体分子之间也存在着空隙。分子间有空隙，大量分子却能聚集在一起，这说明分子之间存在着相互作用力。

当用力拉伸物体时，物体内部各部分之间要产生反抗拉伸的作用力，此时分子间的作用力表现为引力。

当用力压缩物体时，物体各部分之间会产生反抗压缩的作用力，此时分子间的作用力表现为斥力。

分子之间的引力或斥力都跟分子间距离有关，那么，它们之间有怎样的关系呢？

研究表明，分子间的作用力  $F$  跟分子间距离  $r$  的关系如图 1.1-7 所示。

当  $r < r_0$  时，分子间的作用力  $F$  表现为斥力；

当  $r = r_0$  时，分子间的作用力  $F$  为 0，这个位置称为平衡位置；

当  $r > r_0$  时，分子间的作用力  $F$  表现为引力。

那么，分子间为什么有相互作用力呢？

我们知道，分子是由原子组成的。原子内部有带正电的原子核和带负电的电子。分子间的作用力就是由这些带电粒子的相互作用引起的。

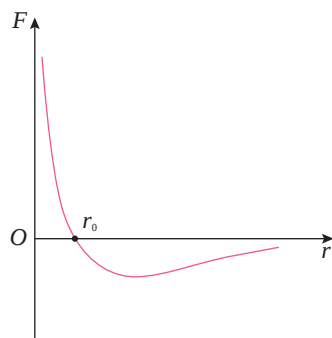


图 1.1-7 分子间作用力与分子间距离的关系

## 分子动理论

我们已经知道：物体是由大量分子组成的，分子在做永不停息的无规则运动，分子之间存在着相互作用力。这就是分子动理论的基本内容。

在热学研究中常常以这样的基本内容为出发点，把物质的热学性质和规律看作微观粒子热运动的宏观表现。这样建立的理论叫作**分子动理论**（molecular kinetic theory）。

由于分子热运动是无规则的，所以，对于任何一个分子而言，在每一时刻沿什么方向运动，以及运动的速率等都具有偶然性；但是对于大量分子的整体而言，它们的运动却表现出规律性。在本章第3节我们将研究分子运动速率的分布规律。

### 练习与应用

1. 把铜块中的铜分子看成球形，且它们紧密排列，试估算铜分子的直径。铜的密度为  $8.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，铜的摩尔质量为  $6.4 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$ 。

2. 标准状态下氧气分子间的平均距离是多少？氧气的摩尔质量为  $3.2 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$ ，1 mol 气体处于标准状态时的体积为  $2.24 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 。

3. 以下关于布朗运动的说法是否正确？说明理由。

（1）布朗运动就是分子的无规则运动。

（2）布朗运动证明，组成固体小颗粒的分子在做无规则运动。

（3）向一锅水中撒一点胡椒粉，加热时发现水中的胡椒粉在翻滚。这说明温度越高布朗运动越剧烈。

（4）在显微镜下可以观察到煤油中小粒灰尘的布朗运动，这说明煤油分子在做无规则运动。

4. 小张在显微镜下观察水中悬浮的细微粉笔末的运动。他把小颗粒每隔一定时间的位置记录在坐标纸上（图 1.1-8），于是得出结论：

固体小颗粒的无规则运动证明水分子的运动是无规则的。小李不同意小张的结论，他认为：“小颗粒沿着笔直的折线运动，说明水分子在短时间内的运动是规则的，否则小颗粒怎么会沿直线运动？”对此，说说你的看法。

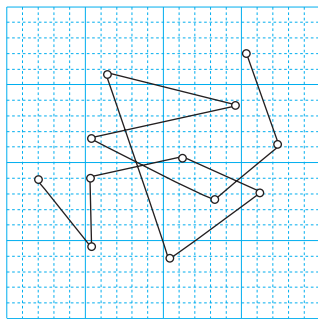


图 1.1-8

5. 请描述：当两个分子间距离由  $r_0$  逐渐增大，直至远大于  $r_0$  时，分子间的作用力表现为引力还是斥力？当两个分子间距离由  $r_0$  逐渐减小，分子间的作用力表现为引力还是斥力？

## 2 实验：用油膜法估测油酸分子的大小

分子十分微小。以水为例，一个直径为 $10^{-3}\text{mm}$ 左右的水珠，它的大小与细菌差不多，用肉眼无法观察，就是在这样小的水珠里，分子的个数竟比地球上人口的总数还多上好几倍！

那么，通过什么途径可以知道分子的大小呢？下面我们通过一个实验来估测分子的大小。

### 实验思路

为了估测油酸分子的大小，我们把1滴油酸滴在水面上，水面上会形成一层油膜，油膜是由单层油酸分子( $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$ )中的烃基 $\text{C}_{17}\text{H}_{33}-$ 组成的。<sup>①</sup>

尽管油酸分子有着复杂的结构和形状，分子间也存在间隙，但在估测其大小时，可以把它简化为球形处理，并认为它们紧密排布(图1.2-1)。测出油膜的厚度 $d$ ，它就相当于分子的直径。

实验中，为了使油酸充分展开，获得一块单分子油膜，我们需要将油酸在酒精中稀释后再滴入水中。这样的油酸酒精溶液滴在水面，溶液中的酒精将溶于水并很快挥发，从而获得纯油酸形成的油膜。

这里可以粗略地认为，油膜的厚度等于1滴油酸酒精溶液中纯油酸的体积 $V$ 与它在水面上摊开的面积 $S$ 之比。

► 建立模型、进行合理的估算在物理学的学习和研究中是很有用的。

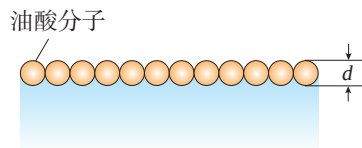


图 1.2-1 水面上单分子油膜的示意图

### 物理量的测量

#### 1. 测量1滴油酸酒精溶液中纯油酸的体积 $V$ 。

配制一定浓度的油酸酒精溶液。<sup>②</sup>用注射器吸取一段油

<sup>①</sup> 油酸分子中的一部分是羧基 $-\text{COOH}$ ，它对水有很强的亲合力；而另一部分烃基 $\text{C}_{17}\text{H}_{33}-$ 对水没有亲合力，要冒出水面。因此，油酸分子会一个个地直立在水面上形成单分子油膜。

<sup>②</sup> 可以向1 mL油酸中加酒精，直至总量达到500 mL。



图 1.2-2 记录油酸酒精溶液的滴数

酸酒精溶液，由注射器上的刻度读取该段溶液的总体积，再把它一滴一滴地滴入烧杯中（图 1.2-2），记下液滴的总滴数。用它们的总体积除以总滴数，得到 1 滴油酸酒精溶液的体积，再计算其所含纯油酸的体积  $V$ 。

## 2. 测量 1 滴油酸酒精溶液在水面上形成的油膜面积 $S$ 。

在浅盘里盛上水，一只手捏住盛有爽身粉的布袋，另一只手拍打，将爽身粉均匀地撒在水面上（图 1.2-3 甲）。然后，用注射器向水面上滴 1 滴油酸酒精溶液（图 1.2-3 乙），油酸立即在水面散开，形成一块油膜。油膜上没有爽身粉，可以清楚地看出它的轮廓（图 1.2-3 丙）。待油膜形状稳定后，将事先准备好的带有坐标方格的玻璃板放在浅盘上，在玻璃板上描下薄膜的形状（图 1.2-3 丁）。

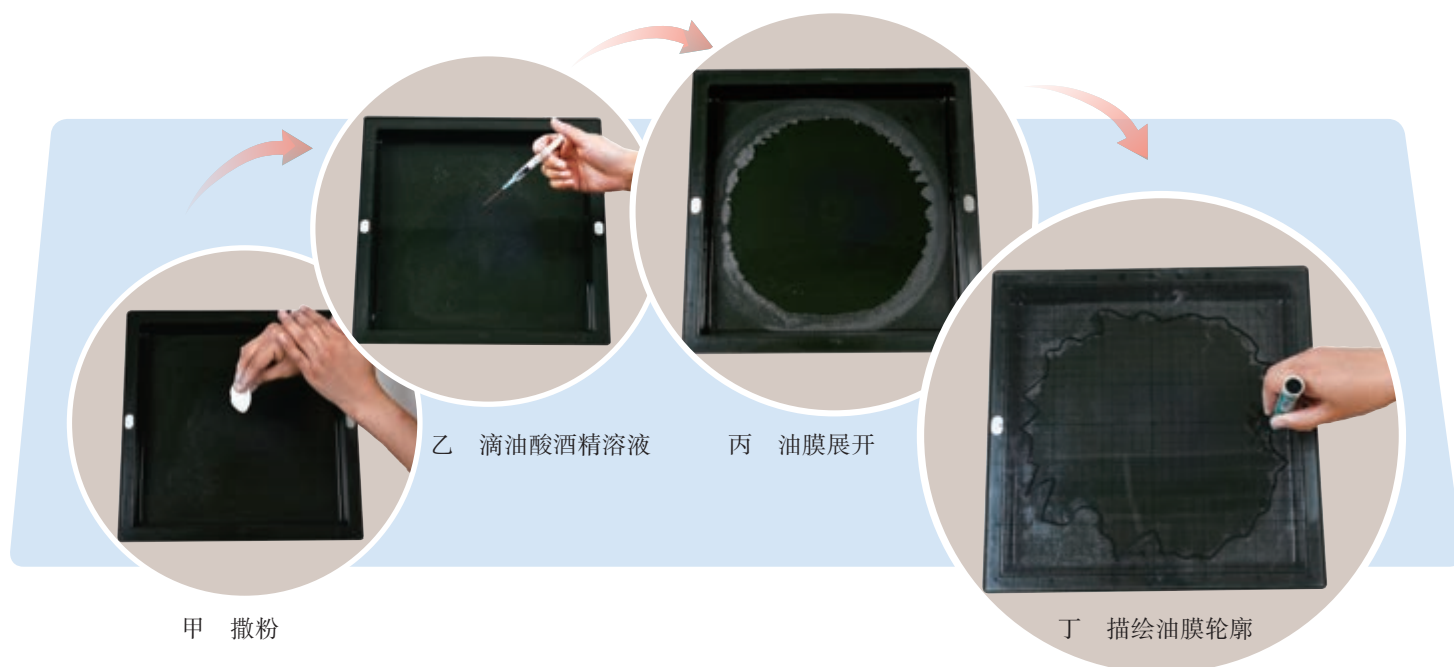


图 1.2-3 记录油酸薄膜的形状

► 用油膜法估测油酸分子直径的大小是一种通过测量宏观量来测量微观量的方法。

根据画有油膜轮廓的玻璃板上的坐标方格，计算轮廓范围内正方形的个数，不足半个的舍去，多于半个的算一个。然后，把正方形的个数乘单个正方形的面积就得到油膜的面积  $S$ 。

## ■ 数据分析

用 1 滴油酸酒精溶液中纯油酸的体积  $V$  和该油膜面积  $S$  计算出油膜厚度，即油酸分子的直径

$$d = \frac{V}{S}$$

大量实验结果表明，尽管所用的测定分子大小的方法不同，测出的结果也有差异，但数量级是一致的。除了一些有机物质的大分子外，多数分子大小的数量级为  $10^{-10}$  m。

## 练习与应用

1. 把一片很薄的均匀塑料薄膜放在盐水中，调节盐水的密度，使薄膜能在盐水中悬浮，此时盐水的密度为  $1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。用天平测出尺寸为  $10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  的这种塑料薄膜的质量是  $36 \text{ g}$ ，请计算薄膜的厚度。

2. “用油膜法估测油酸分子的大小”实验，有两个非常巧妙的设计，请你借鉴这两个设计思路，完成以下实验：

(1) 现需要在一个烧杯中倒入  $0.01 \text{ g}$  食盐供以后做实验用，但现有的电子秤最小只能称  $1 \text{ g}$  的质量，怎么办？请定量地具体说明操作的步骤。

(2) 有一小捆粗细均匀的细铁丝，要较精确地测量细铁丝的横截面积，你认为应该怎样测量？说出所需的器材和测量方法。

3. 在做“用油膜法估测油酸分子的大小”实验时，每  $10^3 \text{ mL}$  油酸酒精溶液中有纯油酸  $1 \text{ mL}$ 。用注射器测得  $58$  滴这样的溶液为  $1 \text{ mL}$ 。把

$1$  滴这样的溶液滴入盛水的浅盘里，等油膜形状稳定后，把玻璃板盖在浅盘上并描画出油膜的轮廓，如图 1.2-4 所示。图中正方形小方格的边长为  $1 \text{ cm}$ 。

(1)  $1$  滴油酸酒精溶液中含有的纯油酸的体积是多少？

(2) 油膜的面积是多少？

(3) 按以上数据，估算油酸分子的大小。

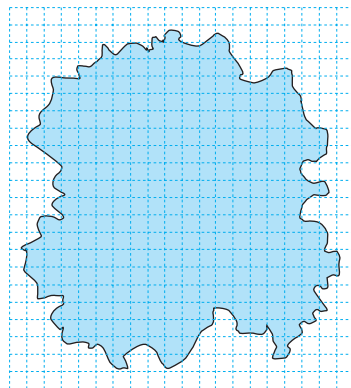


图 1.2-4

### 3 分子运动速率分布规律

#### 问题 ?

伽尔顿板的上部规则地钉有铁钉，下部用竖直隔板隔成等宽的狭槽，从顶部入口投入一个小球时，小球落入某个狭槽是偶然的。

如果投入大量的小球，就可以看到，最后落入各狭槽的小球数目是不相等的。靠近入口的狭槽内的小球数目多，远离入口的狭槽内小球的数目少。

重复几次实验你会发现，其分布情况遵从一定的规律。由此你能得到什么启发吗？



在一定条件下，若某事件必然出现，这个事件叫作必然事件；若某事件不可能出现，这个事件叫作不可能事件。若在一定条件下某事件可能出现，也可能不出现，这个事件叫作随机事件。大量随机事件的整体往往会表现出一定的规律性，这种规律就叫作**统计规律**（statistical regularity）。

#### 气体分子运动的特点

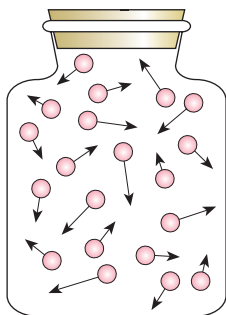


图 1.3-1 气体分子运动的示意图

热现象与大量分子热运动的统计规律有关。要研究气体的热现象，就要了解气体分子运动的特点。

我们可以认为，液体的分子是一个挨着一个地排列的。液体变为气体后，体积要增大上千倍，可见，气体分子间距离大约是分子直径的 10 倍左右。分子的大小相对分子间的空隙来说很小，所以，可以把气体分子视为质点。由于气体分子间距离比较大，分子间的作用力很弱，通常认为，气体分子除了相互碰撞或者跟器壁碰撞外，不受力而做匀速直线运动，气体充满它能达到的整个空间（图 1.3-1）。

虽然气体分子的分布比液体稀疏，但分子的数密度<sup>①</sup>仍然十分巨大，分子之间频繁地碰撞，每个分子的速度大小和方向频繁地改变。分子的运动杂乱无章，在某一时刻，向着任何一个方向运动的分子都有，而且向各个方向运动的气体分子数目几乎相等。当然，这里说的数目相等，是针对大量分子而言的，实际数目会有微小的差别，由于分子数极多，其差别完全可以忽略。

分子运动速率分布图像

尽管分子做无规则运动，速率有大有小，但大量分子的速率却按一定的规律分布。下表是氧气分子在 0℃ 和 100℃ 两种不同情况下的速率分布情况。图 1.3-2 是根据表格中的数据绘制的图像。

表 氧气分子的速率分布

| 速率区间 / (m · s <sup>-1</sup> )  |      | 100<br>以下 | 100<br>~<br>200 | 200<br>~<br>300 | 300<br>~<br>400 | 400<br>~<br>500 | 500<br>~<br>600 | 600<br>~<br>700 | 700<br>~<br>800 | 800<br>~<br>900 | 900<br>以上 |
|--------------------------------|------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 各速率区间的<br>分子数<br>占总分子数的<br>百分比 | 0℃   | 1.4       | 8.1             | 17.0            | 21.4            | 20.4            | 15.1            | 9.2             | 4.5             | 2.0             | 0.9       |
|                                | 100℃ | 0.7       | 5.4             | 11.9            | 17.4            | 18.6            | 16.7            | 12.9            | 7.9             | 4.6             | 3.9       |

可以看到，0℃ 和 100℃ 氧气分子的速率都呈“中间多、两头少”的分布，但这两个温度下具有最大比例的速率区间是不同的：0℃ 时，速率在 300 ~ 400 m/s 的分子最多；100℃ 时，速率在 400 ~ 500 m/s 的分子最多。100℃ 的氧气，速率大的分子比例较多，其分子的平均速率比 0℃ 的大。从这里我们可以直观地体会“温度越高，分子的热运动越剧烈”这句话的含义。

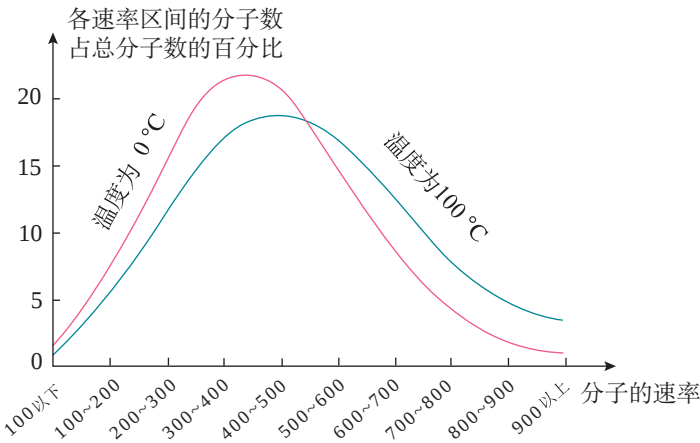


图 1.3-2 氧气分子的速率分布图像

① 分子的个数与它们所占空间体积之比叫作分子的数密度，通常用  $n$  表示。

## 气体压强的微观解释

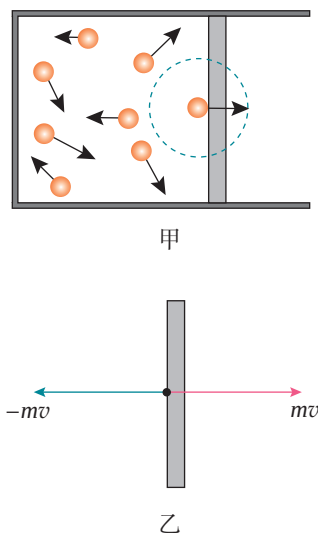


图 1.3-3 气体分子与器壁碰撞的示意图

从分子动理论的观点来看，气体对容器的压强源于气体分子的热运动，当它们飞到器壁时，就会跟器壁发生碰撞（可视为弹性碰撞），就是这个撞击对器壁产生了作用力，从而产生了压强。如图 1.3-3 甲，选择一个与器壁发生正碰的气体分子为研究对象，由于是弹性碰撞，所以气体分子与器壁碰撞前后的动量大小为  $mv$ ，方向相反（图 1.3-3 乙），气体分子受到的冲量为

$$F\Delta t = -mv - mv = -2mv$$

气体分子受到的作用力为

$$F = -\frac{2mv}{\Delta t}$$

根据牛顿第三定律，器壁受到的作用力为

$$F' = \frac{2mv}{\Delta t}$$

同理，我们也可以求出气体分子与器壁发生斜碰时分子给器壁的作用力。

► 分子动理论将气体系统的宏观性质归结为分子的热运动及其相互作用，揭示了宏观现象的微观本质。

气体对容器的压强是大量气体分子不断撞击器壁的结果。<sup>①</sup>或许有人会问，这种撞击是不连续的，为什么器壁受到的作用力却是均匀不变的呢？下面我们用豆粒模拟气体分子做一个实验。

### 演示

#### 模拟气体压强产生的机理

把一颗豆粒拿到台秤上方约 20 cm 的位置，放手后使它落在秤盘上，观察秤的指针的摆动情况。

再从相同高度把 100 颗或者更多的豆粒均匀连续地倒在秤盘上（图 1.3-4），观察指针的摆动情况。

使这些豆粒从更高的位置落在秤盘上，观察指针的摆动情况。

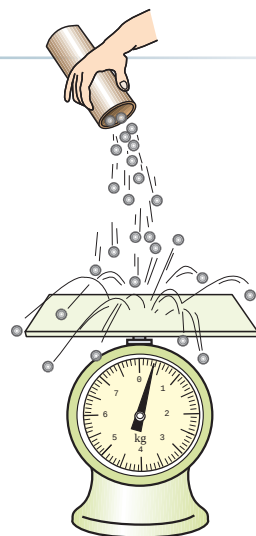


图 1.3-4 模拟气体压强产生机理的实验

<sup>①</sup> 气体对容器的压强公式可以根据气体分子运动的统计规律推导出来，中学阶段对此不作要求。

实验表明，单颗豆粒给秤盘的压力很小，作用时间也很短，但是大量的豆粒对秤盘的频繁碰撞，就对秤盘产生了一个持续的均匀的压力。

可见，对于单个分子来说，这种撞击是间断的、不均匀的，但是对于大量分子总的作用来说，就表现为连续的和均匀的了。器壁单位面积上受到的压力，就是气体的压强。

从微观角度来看，气体分子的数量是巨大的。一方面，若某容器中气体分子的平均速率越大，单位时间内、单位面积上气体分子与器壁的碰撞对器壁的作用力就越大；另一方面，若容器中气体分子的数密度大，在单位时间内，与单位面积器壁碰撞的分子数就多，平均作用力也会较大。

## 练习与应用

1. 从宏观上看，一定质量的气体体积不变仅温度升高或温度不变仅体积减小都会使压强增大。从微观上看，这两种情况有没有区别？

2. 体积都是1 L的两个容器，装着质量相等的氧气，其中一个容器内的温度是0℃，另一个容器的温度是100℃。请说明：这两个容器中关于氧分子运动速率分布的特点有哪些相同？有哪些不同？

3. 有甲、乙、丙、丁四瓶氢气。甲的体积为 $V$ ，质量为 $m$ ，温度为 $t$ ，压强为 $p$ 。乙、丙、丁的体积、质量、温度如下所述。

(1) 乙的体积大于 $V$ ，质量、温度和甲相同。

(2) 丙的温度高于 $t$ ，体积、质量和甲相同。

(3) 丁的质量大于 $m$ 、温度高于 $t$ ，体积和甲相同。

试问：乙、丙、丁的压强是大于 $p$ 还是小于 $p$ ？或等于 $p$ ？请用气体压强的微观解释来说明。

4. 我们知道，大量随机事件的整体会表现出一定的规律性。例如，某一区域各辆共享单车的行驶方向是随机事件，但大量随机事件的统计结果就能显示出一定的规律。

某人想利用共享单车的大数据为本市规划的几条公交线路提供设计思路。图1.3-5显示了共享单车停放位置的分布图，共享单车的数据系统中也能记录用户每次使用共享单车的时间、路程等信息（图1.3-6）。据此可以统计“在某区域、某时段沿不同道路骑行的人数”“在某区域、某时段沿某道路骑行超过1 km、2 km、3 km的人数”等。你认为还可以统计哪些对规划公交线路有价值的统计数据？请说出利用这些统计数据的思路。



图 1.3-5



图 1.3-6

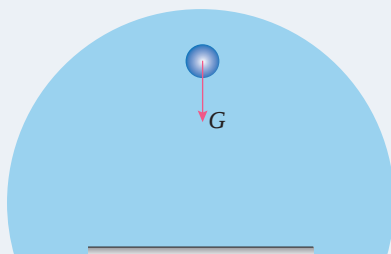
## 4

## 分子动能和分子势能

## 问题



地面附近的物体所受的重力是  $G$ ，由于重力做功具有跟路径无关的特点，所以存在重力势能。重力势能由地球和物体的相对位置决定。分子间的作用力做功是否也具有这一特点呢？



## 分子动能

► 人们利用分子动理论通过对大量分子求统计平均，建立了宏观量与相应的微观量统计平均值的关系。

分子不停地做无规则运动，那么，像一切运动着的物体一样，做热运动的分子也具有动能，这就是分子动能。物体中分子热运动的速率大小不一，所以各个分子的动能也有大有小，而且在不断改变。在热现象的研究中，我们关心的是组成系统的大量分子整体表现出来的热学性质，因而，这里重要的不是系统中某个分子的动能大小，而是所有分子的动能的平均值。这个平均值叫作分子热运动的平均动能。

► 过去我们说，“温度是分子热运动剧烈程度的标志”，现在就能进一步说，“物体的温度是它的分子热运动的平均动能的标志”。

温度升高时，分子的热运动加剧，温度越高，分子热运动的平均动能越大。温度越低，分子热运动的平均动能越小。因此可以得出结论：物体温度升高时，分子热运动的平均动能增加。这样，分子动理论使我们懂得了温度的微观含义。

## 分子势能



## 思考与讨论

分子势能的大小由分子间的相对位置决定，这说明分子势能  $E_p$  与分子间距离  $r$  是有关系的。那么，它们之间存在怎样的一种关系呢？

分子间存在着相互作用力，可以证明分子间的作用力所做的功与路径无关，分子组成的系统具有分子势能。

如图 1.4-1，设两个分子相距无穷远<sup>①</sup>，我们可以规定它们的分子势能为 0。让一个分子 A 不动，另一个分子 B 从无穷远处逐渐靠近 A。在这个过程中，分子间的作用力（图 1.4-2 甲）做功，分子势能的大小发生改变。



图 1.4-1 两个分子相互作用的示意图

当分子 B 向分子 A 靠近，分子间距离  $r$  大于  $r_0$  时，分子间的作用力表现为引力，力的方向与分子的位移方向相同，分子间的作用力做正功，分子势能减小。

当分子间距离  $r$  减小到  $r_0$  时，分子间的作用力为 0，分子势能减到最小。

越过平衡位置  $r_0$  后，分子 B 继续向分子 A 靠近，分子间的作用力表现为斥力，力的方向与分子的位移方向相反，分子间的作用力做负功，分子势能增大。

可见，分子势能的大小是由分子间的相对位置决定的。

由以上分析可知，如果选定分子间距离  $r$  为无穷远时的分子势能  $E_p$  为 0，则分子势能  $E_p$  随分子间距离  $r$  变化的情况如图 1.4-2 乙所示。分子势能  $E_p$  随分子间距离  $r$  的变化有最小值，即当  $r = r_0$  时，分子势能最小。

物体的体积变化时，分子间距离将发生变化，因而分子势能随之改变。可见，分子势能与物体的体积有关。

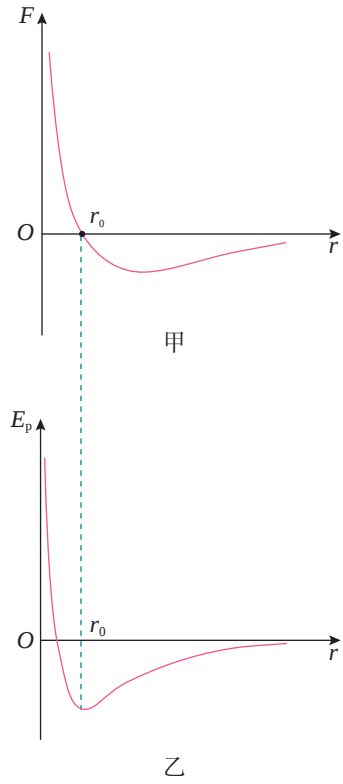


图 1.4-2 分子间的作用力与分子势能

## 物体的内能

物体中所有分子的热运动动能与分子势能的总和，叫作物体的**内能**（internal energy）。任何物体都具有内能。

分子热运动的平均动能与温度有关，分子势能与物体的体积有关。一般说来，物体的温度和体积变化时它的内能都会随之改变。

<sup>①</sup> 两个分子相距无穷远是指它们之间几乎没有相互作用时的距离。

## 思考与讨论

物体下落的时候，物体中的分子在做无规则热运动的同时还共同参与竖直向下的落体运动。再如，地面上滚动的足球，球内的气体分子在做无规则热运动的同时，还共同参与水平地面上的运动。当足球静止在地面上时（图 1.4-3），其中的气体分子是否还具有能量呢？



图 1.4-3

应当指出，组成物体的分子在做无规则的热运动，具有热运动的动能，它是内能的一部分；同时物体还可能做整体的运动，因此，还会具有动能，这是机械能的一部分。后者是由物体的机械运动决定的，它对物体的内能没有贡献。

## 练习与应用

1. 在一个密闭容器内有一滴  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  的水，过一段时间后，水滴蒸发变成了水蒸气，温度还是  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。它的内能是否发生了变化？为什么？

2. 在一个真空的钟罩中，用不导热的细线悬吊一个铁块，中午时铁块的温度是  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，晚上铁块的温度是  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。铁块的内能是否发生了变化？为什么？

3. 有人说：“在高速列车的速度由小变大的过程中，列车上所有物体的动能都在增大，组成

这些物体的分子的平均动能也在增大。既然温度是分子平均动能的标志，因此在这个过程中列车上物体的温度是在升高的，只是升高得并不大，我们感觉不到而已。”你说对吗？为什么？

4. 有人说：“当我们把一个物体举高时，组成物体的每个分子的重力都做了负功，因此分子势能增大，这就导致物体的内能增大，我们举起物体所做的功，就等于物体内能的增加量。”你说对吗？为什么？

## A 组

1. 为什么说任何物体都具有内能？物体的体积不变，温度升高时，它的内能怎样变化？

2. 当分子间距离为  $r_0$  时，分子间的作用力为 0。分析当分子间的距离从  $0.9 r_0$  增大到  $10 r_0$  的过程中，分子间的作用力及分子势能的大小是如何变化的？

3. 钻石是首饰和高强度的钻头、刻刀等工具中的主要材料。设钻石的密度为  $\rho$ ，摩尔质量为  $M$ ，阿伏加德罗常数为  $N_A$ ，请写出质量为

$m$  的钻石所含有的分子数，推导钻石分子直径的表达式（计算时可认为组成钻石的分子是一个紧挨着一个的小球）。

4. 气体分子间的空隙很大，可将单个气体分子平均占有的空间看作以下模型：将气体所占的整个空间分成若干个小立方体，气体分子位于每个小立方体的中心，小立方体的边长为相邻气体分子间的平均距离。请按这种模型，估算气体在标准状态下分子间的平均距离。

## B 组

1. 地球到月球的平均距离为  $3.8 \times 10^5 \text{ km}$ 。已知铁的摩尔质量为  $5.6 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$ ，密度为  $7.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。若把铁分子一个紧挨一个地单列排起来，筑成从地球通往月球的“分子大道”。求：

(1) 这条“分子大道”共需多少个铁分子？

(2) 这条“分子大道”的质量为多少？

2. 甲、乙、丙三位同学分别在三个实验小组做“用油膜法估测油酸分子的大小”实验，但都发生了操作错误。

甲在配制油酸酒精溶液时，不小心把酒精倒多了一点，导致油酸酒精溶液的实际浓度比计算值小一些。

乙在计算注射器滴出的每一滴油酸酒精溶液体积后，不小心拿错了一个注射器把溶液滴在水面上，这个拿错的注射器的针管比原来的粗，每滴油酸酒精溶液的体积比原来的大。

丙在计算油膜面积时，把凡是半格左右的油膜都算成了一格，导致计算的面积比实际面积大一些。

请分析：这三位同学的操作错误会导致实验测得的油酸分子直径偏大还是偏小？说明道理。

3. 全班每人都把 4 枚硬币握在手中，在桌面上随意投掷 10 次，统计 10 次投掷中有 0, 1, 2, 3, 4 枚硬币正面朝上的次数，并将所得数据按下表的要求记录下来。你发现有什么规律？

| 统计对象              | 统计项目    |                 |   |   |   |   |
|-------------------|---------|-----------------|---|---|---|---|
|                   | 总共投掷的次数 | 4 枚硬币中正面朝上的硬币枚数 |   |   |   |   |
|                   |         | 0               | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 我的实验数据            |         |                 |   |   |   |   |
| 我所在小组（3~4 人一组）的数据 |         |                 |   |   |   |   |
| 我所在大组（按座位划分）的数据   |         |                 |   |   |   |   |
| 全班的数据             |         |                 |   |   |   |   |

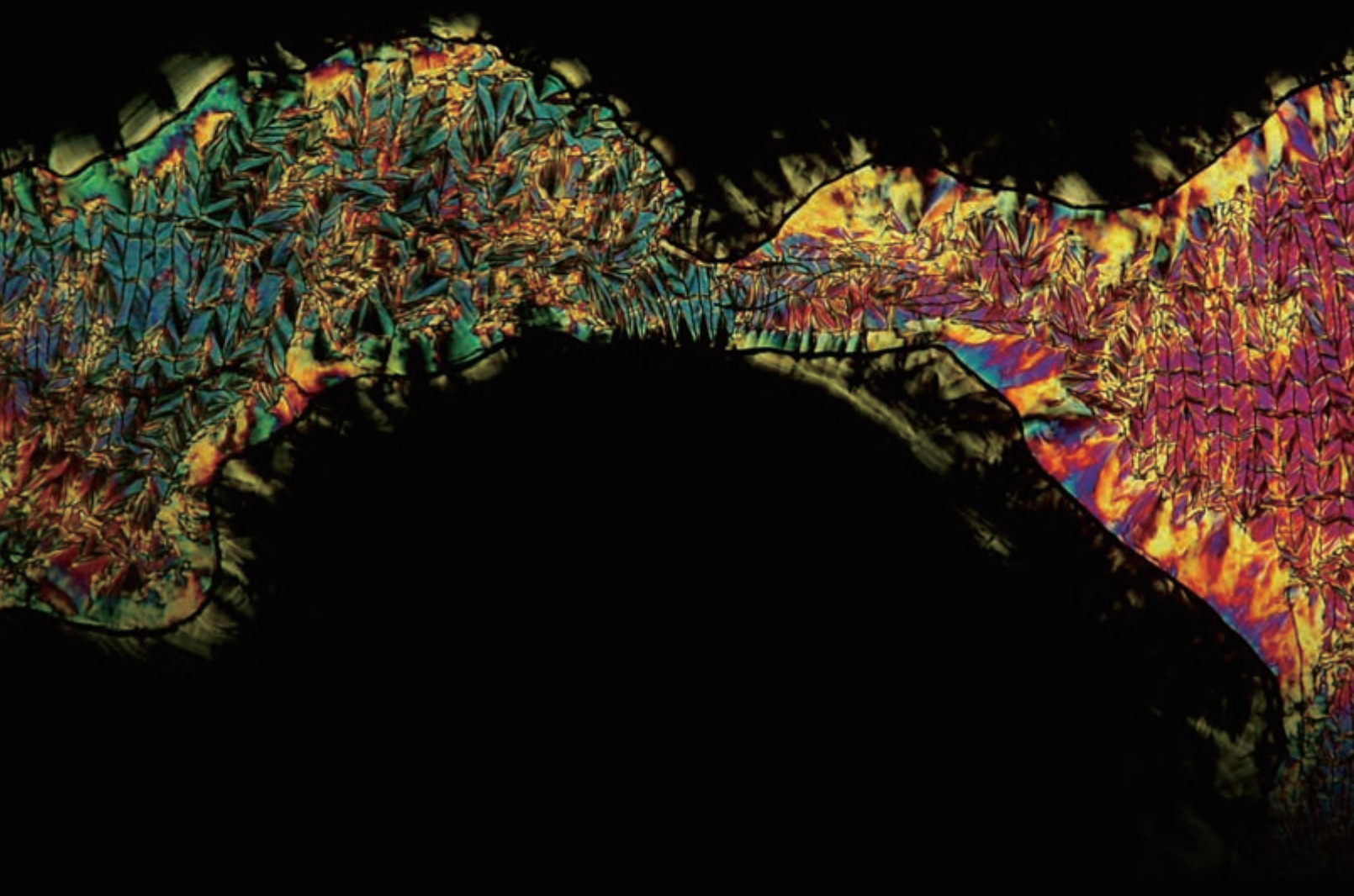
# 2

## 第二章

# 气体、固体和液体

物体是由大量分子组成的，分子在做永不停息的无规则运动，分子之间存在着相互作用力。这些因素决定了分子的三种不同的聚集状态：气体、固体和液体。物体处于不同状态时具有不同的物理性质。

人类对物质属性的认识是从宏观到微观不断深入的过程。相应地，人们对新材料或传统材料新功能的开发和研制也从来没有停止过。从远古的石器时代，到后来的青铜器时代、铁器时代……新材料在人类文明进程中扮演了重要的角色。



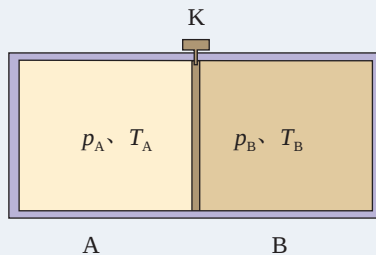
要推论宏观物质的表现，就必须采用统计方法，由对个体原子（分子）物理参量的适当统计平均，来得出支配宏观行为的规律。

——彭罗斯<sup>①</sup>

## 1 温度和温标

### 问题

假如一个容器用挡板K隔开，容器中的气体被分成A、B两部分，它们的压强分别为 $p_A$ 、 $p_B$ ，温度分别为 $T_A$ 、 $T_B$ 。打开挡板K后，如果容器与外界没有能量交换，经过一段时间后，容器内的气体会是什么状态？



### 状态参量与平衡态

研究某一容器中气体的热学性质，其研究对象是容器中的大量分子组成的系统，这在热学中叫作一个**热力学系统**（thermodynamic system），简称**系统**。系统之外与系统发生相互作用的其他物体统称外界。例如，用酒精灯加热容器中的气体，把气体作为研究对象，它就是一个热力学系统，而容器和酒精灯就是外界。

在力学中，为描述物体（质点）的运动状态，我们使用了物体的位置和速度这两个物理量。在热学中，为确定系统的状态，也需要用到一些物理量，这些物理量叫作系统的**状态参量**（state parameter）。例如，为了确定系统的空间范围，要用到体积 $V$ ，这是一个几何参量；为了确定外界与系统之间或系统内部各部分之间力的作用，要用到压

<sup>①</sup> 彭罗斯（Roger Penrose, 1931—），英国数学家、物理学家，牛津大学教授，著名科普著作《皇帝新脑》的作者。

强  $p$ ，这是一个力学参量；而要确定系统的冷热程度，就要用到一个热学参量——温度  $T$ 。

要定量地描述系统的状态往往很难，因为有时系统的参量会随时间变化。然而在没有外界影响的情况下，只要经过足够长的时间，系统内各部分的状态参量能够达到稳定状态。这种状态叫作**平衡态**（equilibrium state），否则就是非平衡态。

当系统处于平衡态时，系统所有状态参量都不随时间变化，我们就能比较准确地描述系统的状态。在中学阶段，我们主要处理平衡态的问题。

## 热平衡与温度

上面所说的平衡态，指的是一个系统的状态参量不再改变。下面我们要研究一个系统与另一个系统相互作用的问题。

如果两个系统相互接触而传热，这两个系统的状态参量将会互相影响而分别改变。经过一段时间，各自的状态参量就不再变化了，这说明两个系统达到了平衡。这种平衡叫作**热平衡**（thermal equilibrium）。

实验表明：如果两个系统分别与第三个系统达到热平衡，那么这两个系统彼此之间也必定处于热平衡，这个结论称为热平衡定律。

热平衡定律表明，当两个系统 A、B 处于热平衡时，它们必定具有某个共同的热学性质，我们就把表征这一“共同的热学性质”的物理量叫作**温度**（temperature）。换句话说，温度是决定一个系统是否达到热平衡的物理量，它的特点就是“达到热平衡的系统具有相同的温度”（图 2.1-1）。下表列出了部分人们已观测的温度。

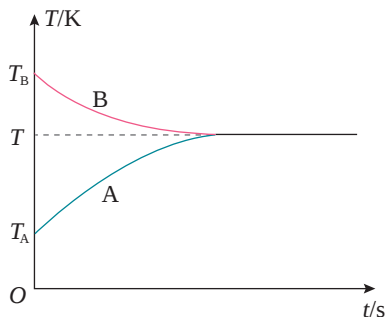


图 2.1-1 两个系统的热平衡过程

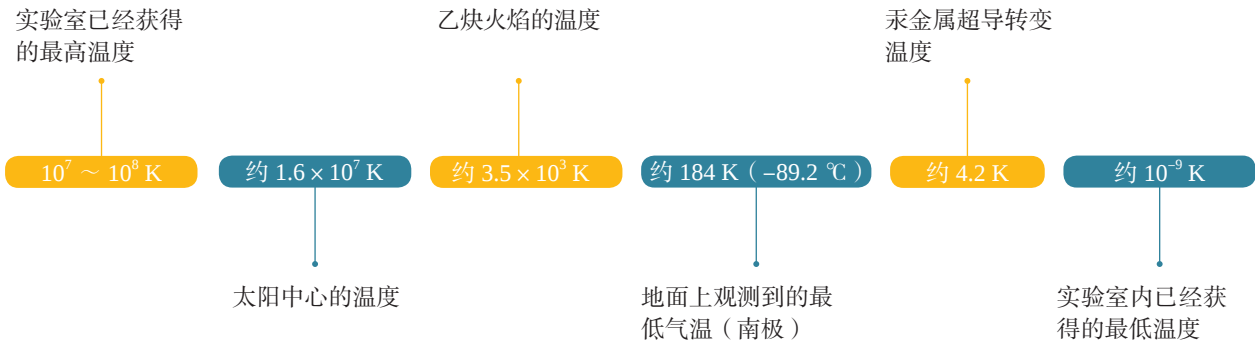


表 人们已观测的温度

## 温度计与温标

如果要定量地描述温度，就必须有一套方法，这套方法就是**温标**（thermometric scale）。

确定一个温标时首先要选择一种测温物质，根据这种物质的某个特性来制造温度计。例如，可以根据水银的热膨胀来制造水银温度计，这时我们规定细管中水银柱的高度与温度的关系是线性关系。还可以根据气体压强随温度的变化来制造气体温度计（图 2.1-2），等等。

确定了测温物质和它用以测温的某种性质之后，还要确定温度的零点和分度的方法。例如，摄氏温标曾经规定，标准大气压下冰的熔点为  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，水的沸点为  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；并据此把玻璃管上  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  刻度与  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  刻度之间均匀分成 100 等份，每份算做  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

现代科学中用得更多的是热力学温标。热力学温标表示的温度叫作**热力学温度**（thermodynamic temperature），它是国际单位制中七个基本物理量之一，用符号  $T$  表示，单位是**开尔文**（kelvin），简称**开**，符号为  $\text{K}$ 。

1960 年，国际计量大会确定了摄氏温标与热力学温标的关系：摄氏温标由热力学温标导出，摄氏温标所确定的温度用  $t$  表示，它与热力学温度  $T$  的关系是

$$T = t + 273.15\text{ K}$$



图 2.1-2 伽利略的温度计

► 根据国家标准，在表示温度差的时候可以用摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）代替开尔文（ $\text{K}$ ），即  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  与  $1\text{ K}$  相等。因此这个式子中  $T$  的单位用  $\text{K}$ ， $t$  的单位用  $^{\circ}\text{C}$ 。

## 科学漫步

### 形形色色的温度计

自从伽利略制造了第一个温度计以后，温度就不再是一个主观感觉，而成了一个客观的物理量。人们根据物质某种与温度有关的性质制作了多种温度计。例如，双金属温度计是把线膨胀程度不同的两种金属片压合在一起，温度变化时，双金属片的弯曲程度会发生变化，带动指针偏转来指示温度（图 2.1-3）。热电偶温度计是根据不同导体因温差而产生电动势的大小不同来制作的。如图 2.1-4，把一条金属丝的两端分别与另一条不同材料金属丝的两端熔焊，接成闭合电路，倘若两个焊点之间有温度差，电路中就有电动势产生，温度差越大，电动势也越大。热电偶温度计的测温探头，实际上就是两根金属丝相连的一个焊点。选择不同的金属丝可以做成不同的热电偶温度计，有的可以测量高达  $3\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$  的高温，有的可以测量接近绝对零度的低温。电阻温度计

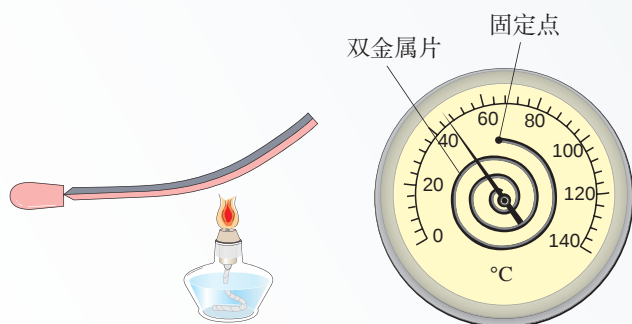


图 2.1-3 双金属温度计

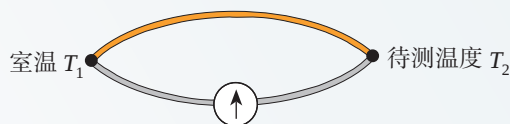


图 2.1-4 热电偶温度计的原理

是根据金属的电阻率随温度的升高而变化的原理制成的。常见的金属电阻温度计有铂电阻温度计和铜电阻温度计，铂电阻温度计是目前最精确的温度计。热敏电阻温度计是利用某些半导体材料制作的，其电阻随温度的变化比导体更明显，但热敏电阻的稳定性差，主要用于低精度的测量。

压力表式温度计是根据气体压强随温度变化的规律制作的。某些铁磁性物质的磁性强弱跟温度有关，磁性的强弱便可以成为温度的标志。声音的传播速度跟介质的温度有关，声速也可以成为温度的标志。有些晶体（如石英）的固有频率跟温度有关，频率也可以成为温度的标志。根据这个思路，磁温度计、声速温度计、频率温度计等都相继制成，而且发挥着各自的作用。

## 练习与应用

1. “在测定某金属块的比热容时，先把质量已知的金属块放在沸水中加热。经过一段时间后把它迅速放入质量已知、温度已知的水中，并用温度计测量水的温度。当水温不再上升时，这就是金属块与水的共同温度。根据实验数据就可以计算金属块的比热容。”在这样的叙述中，哪个地方涉及了“热平衡”的概念？

2. 天气预报某地某日的最高气温是  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，它是多少开尔文？进行低温物理的研究时，热力学温度是  $2.5\text{ K}$ ，它是多少摄氏度？

3. 已知某物理量  $X$  与热力学温度  $T$  成正比，请把这个关系式用等式表示出来。现在用摄氏温度  $t$  来表示温度，这个关系式又该怎么写？分别画出  $X-T$  图像和  $X-t$  图像的草图。

4. 图 2.1-5 甲表示某金属丝的电阻  $R$  随摄氏温度  $t$  变化的情况。把这段金属丝与电池、电流表串联起来（图 2.1-5 乙），用这段金属丝做测温探头，把电流表的电流刻度改为相应的温度刻度，就得到了一个简单的电阻温度计。请判断：如果电池的电动势和内阻都是不变的，电流表上代表  $t_1$ 、 $t_2$  的两点，哪个应该标在电流比较大的刻度上？

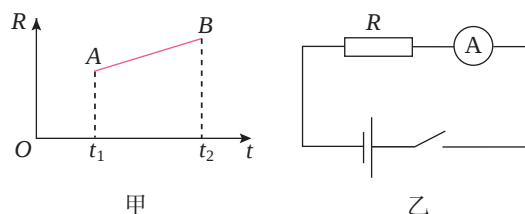


图 2.1-5

## 2 气体的等温变化

### 问题 ?

在庆典活动中放飞的气球，会飞到我们看不见的地方。随着气球的升空，大气压在减小，温度在降低，气球在膨胀……看来，一定质量的气体的压强、体积和温度三个状态参量之间是有联系的。那么，它们会有怎样的联系呢？



我们首先研究一种特殊的情况：一定质量的气体，在温度不变的条件下，其压强与体积变化时的关系。我们把这种变化叫作气体的**等温变化**。

### 实验

#### 探究气体等温变化的规律

##### 实验思路

针对气体的研究，我们可以先选定一个热力学系统，比如一定质量的空气，在温度不变的情况下，测量气体在不同体积时的压强，再分析气体压强与体积的关系。

利用注射器选取一段空气柱为研究对象，如图 2.2-1，注射器下端的开口有橡胶套，它和柱塞一起把一段空气柱封闭。在实验过程中，一方面让空气柱内气体的质量不变；另一方面，让空气柱的体积变化不要太快，保证温度不发生明显的变化。

##### 物理量的测量

需要测量空气柱的体积  $V$  和空气柱的压强  $p$ ，具体操作如下。

空气柱的长度  $l$  可以通过刻度尺读取，空气柱的长度  $l$  与横截面积  $S$  的乘积就是它的体积  $V$ 。空气柱的压强  $p$  可以

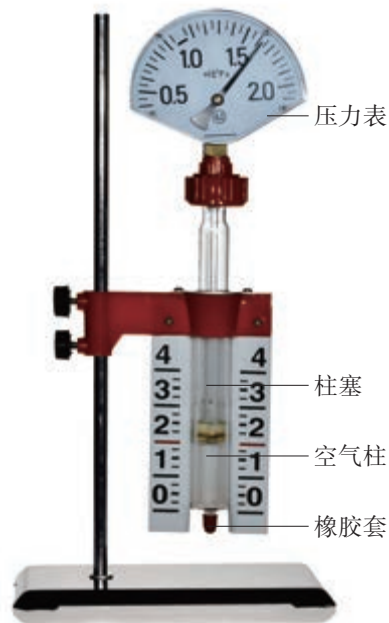


图 2.2-1 实验装置

从与注射器内空气柱相连的压力表读取。

把柱塞缓慢地向下压或向上拉，读取空气柱的长度与压强的几组数据。

### ■ 数据分析

一定质量气体等温变化的压强  $p$  与体积  $V$  的关系，可以用  $p$ - $V$  图像来呈现。用采集的各组数据在坐标纸上描点，绘制曲线，由于它描述的是温度不变时气体压强与体积的关系，因此称它为等温线。若你绘制的  $p$ - $V$  图像类似于双曲线（图 2.2-2），那么，空气柱的压强是否跟体积成反比呢？

我们可以进一步通过图像来检验这个猜想。再以压强  $p$  为纵坐标，以体积的倒数为横坐标，把采集的各组数据在坐标纸上描点。如果  $p$ - $\frac{1}{V}$  图像中的各点位于过原点的同一条直线上（图 2.2-3），就说明压强跟体积的倒数成正比，即压强与体积成反比。如果不在同一条直线上，我们再尝试其他关系。

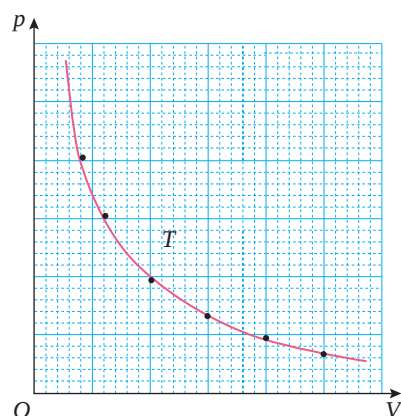


图 2.2-2 温度不变时压强与体积的关系

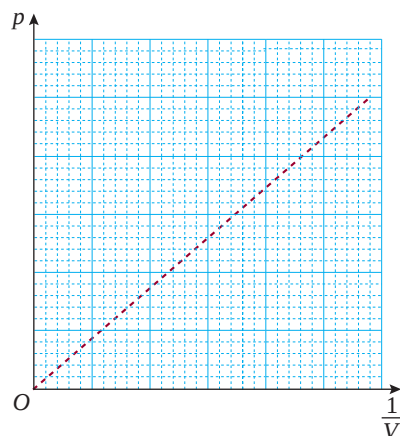


图 2.2-3 检验  $p$  与  $\frac{1}{V}$  的线性关系

英国科学家玻意耳和法国科学家马略特各自通过实验发现，**一定质量的某种气体，在温度不变的情况下，压强  $p$  与体积  $V$  成反比**，即

$$p \propto \frac{1}{V} \quad (1)$$

写成公式就是

$$pV = C \quad (2)$$

式中  $C$  是常量。或者

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

其中  $p_1$ 、 $V_1$  和  $p_2$ 、 $V_2$  分别表示气体在不同状态下的压强和体积。

（2）式反映了一定质量的某种气体的等温变化规律，我们把它叫作**玻意耳定律**（Boyle law）。

► “ $C$  是常量”，意思是当  $p$ 、 $V$  变化时  $C$  的值不变。但是对于温度不同、质量不同、种类不同的气体， $C$  的数值一般不同。

## 做一做

### 用传感器探究气体等温变化的规律

如图 2.2-4，研究对象是注射器中的空气柱。气体压强传感器通过塑料管与注射器相连。由注射器壁上的刻度可以读出气体的体积  $V$ ；由压强传感器测得的压强值  $p$  在计算机屏幕上可以实时显示。这样就可以获得不同体积时气体压强的数值。由计算机作出气体的  $p$ - $V$  图像，就可以判断  $p$  与  $V$  是否具有反比例函数的关系。

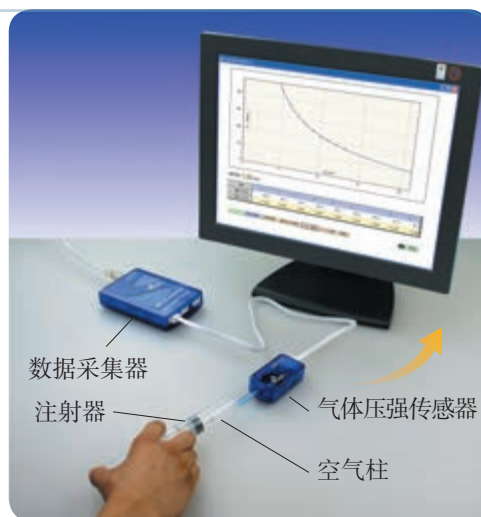


图 2.2-4 用传感器探究气体等温变化的规律

## 练习与应用

1. 在做“探究气体等温变化的规律”的实验中，实验小组记录了一系列数据。但是，仅就以下表中的两组数据来看，小王和小李却有完全不同的看法：小王认为，这两组数据很好地体现了  $p$  跟  $V$  成反比的规律，因为两组数据  $p$  和  $V$  的乘积几乎相等；小李却认为，如果把这两组数据在纵坐标轴为  $p$ 、横坐标轴为  $\frac{1}{V}$  的坐标系中描点，这两点连线的延长线将不经过坐标原点，因此这两组数据没有反映  $p$  跟  $V$  成反比的规律。对此你有什么看法？

| 序号  | 均匀玻璃管内空气柱的长度 $l/\text{cm}$ | 空气柱的压强 $p/10^5 \text{ Pa}$ |
|-----|----------------------------|----------------------------|
| 1   | 39.8                       | 1.024                      |
| 2   | 40.3                       | 0.998                      |
| ... | ...                        | ...                        |

2. 一定质量的气体，不同温度下的等温线是不同的。图 2.2-5 中的两条等温线，哪条等温线表示的是温度比较高时的情形？请你尝试给出判断，并说明理由。

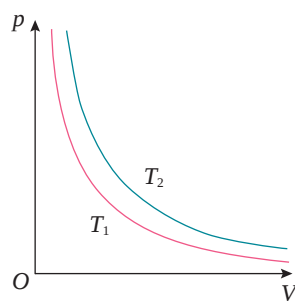


图 2.2-5

3. 一个足球的容积是 2.5 L。用打气筒给这个足球打气，每打一次都把体积为 125 mL、压强与大气压相同的气体打进足球内。如果在打气前足球就已经是球形并且里面的压强与大气压相同，打了 20 次后足球内部空气的压强是大气压的多少倍？你在得出结论时考虑到了什么前提？实际打气时的情况能够满足你的前提吗？

4. 水银气压计中混入了一个气泡，上升到水银柱的上方，使水银柱上方不再是真空。当实际大气压相当于 768 mm 高的水银柱产生的压强时，这个水银气压计的读数只有 750 mm，此时管中的水银面到管顶的距离为 80 mm。当这个气压计的读数为 740 mm 水银柱时，实际的大气压相当于多高水银柱产生的压强？设温度保持不变。

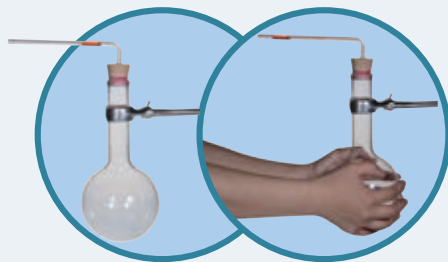
## 3

## 气体的等压变化和等容变化

## 问题



烧瓶上通过橡胶塞连接一根玻璃管，向玻璃管中注入一段水柱。用手捂住烧瓶，会观察到水柱缓慢向外移动，这说明了什么？



实验表明，在保持气体的压强不变的情况下，一定质量气体的体积随温度的升高而增大。

## 气体的等压变化

一定质量的某种气体，在压强不变时，体积随温度变化的过程叫作气体的**等压变化**。

我们可以用实验研究一定质量的某种气体在压强不变的情况下，其体积  $V$  与热力学温度  $T$  的关系。实验表明，在  $V$ - $T$  图像中，等压线是一条过原点的直线（图 2.3-1）。

法国科学家盖-吕萨克首先通过实验发现了这一线性关系，这个规律可以表述为：**一定质量的某种气体，在压强不变的情况下，其体积  $V$  与热力学温度  $T$  成正比**，即

$$V = CT \quad (1)$$

其中  $C$  是常量。或者

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

其中  $V_1$ 、 $T_1$  和  $V_2$ 、 $T_2$  分别表示气体在不同状态下的体积和热力学温度。(1) 式反映了一定质量的某种气体的等压变化规律，我们把它叫作**盖-吕萨克定律** (Gay-Lussac law)。

## 气体的等容变化

一定质量的某种气体，在体积不变时，压强随温度变化的过程叫作气体的**等容变化**。

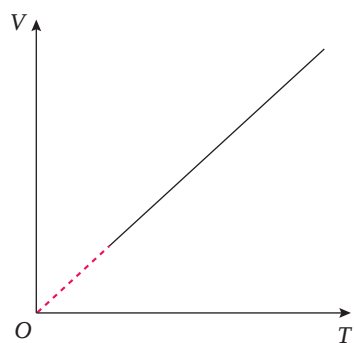


图 2.3-1 压强不变时体积与温度的关系

图2.3-2是气体等容变化时压强与温度的关系图像。从图2.3-2甲可以看出，在等容变化过程中，压强 $p$ 与摄氏温度 $t$ 是一次函数关系，不是简单的正比例关系。但是，如果把直线 $AB$ 延长至与横轴相交（图2.3-2乙），把交点作为坐标原点，建立新的坐标系（图2.3-2丙），那么，这时的压强与温度的关系就是正比例关系了。

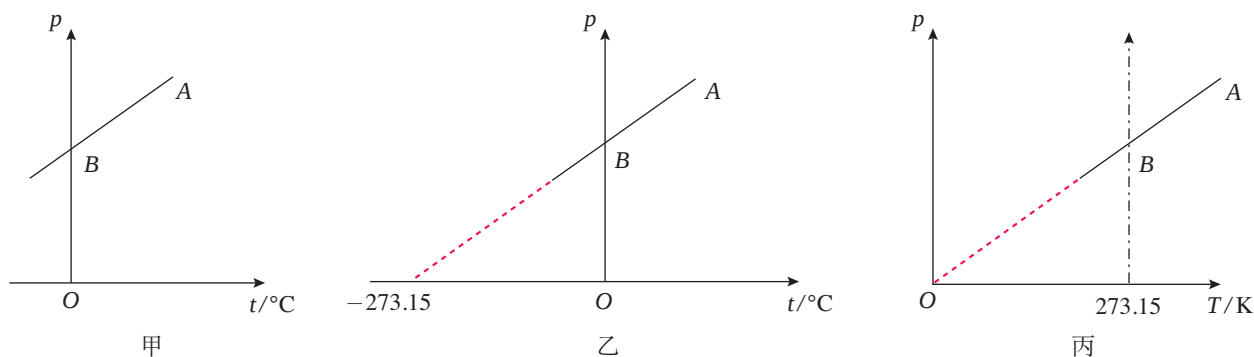


图 2.3-2 气体等容变化的  $p$ - $T$  图像

法国科学家查理在分析了实验事实后发现，当一定质量的气体体积一定时，各种气体的压强与温度之间都有线性关系。

可以证明，气体的压强不太大、温度不太低时，图2.3-2丙中坐标原点代表的温度就是热力学温度的0 K，也称绝对零度。所以说，在 $p$ - $T$ 图像中，一定质量的某种气体的等容线是一条通过坐标原点的直线。这时，这个规律可以表述为：**一定质量的某种气体，在体积不变的情况下，压强 $p$ 与热力学温度 $T$ 成正比**，即 $p \propto T$ 。写成等式的形式就是

$$p = CT \quad (2)$$

其中 $C$ 是常量。或者

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

其中 $p_1$ 、 $T_1$ 和 $p_2$ 、 $T_2$ 分别表示气体在不同状态下的压强和热力学温度。(2)式反映了一定质量的某种气体的等容变化规律，我们把它叫作**查理定律 (Charles law)**。

► 在我们的计算中，相当于大气压几倍的压强都可以算作“压强不太大”，零下几十摄氏度的温度也可以算作“温度不太低”。

### 【例题】

某种气体的压强为 $2 \times 10^5$  Pa，体积为 $1 \text{ m}^3$ ，温度为200 K。它经过等温过程后体积变为 $2 \text{ m}^3$ 。随后，又经过等容过程，温度变为300 K，求此时气体的压强。

**分析** 封闭容器中的气体，在状态变化中气体质量不变。气体开始时的压强、体积和温度分别为  $p_1$ 、 $V_1$ 、 $T_1$ ，经过等温过程变为  $p$ 、 $V$ 、 $T$ ，再经过等容过程变为  $p_2$ 、 $V_2$ 、 $T_2$ 。我们可以分别运用玻意耳定律和查理定律求解。

**解** 根据玻意耳定律，有

$$T_1 = T, p_1 V_1 = pV$$

根据查理定律，有

$$V = V_2, \frac{p}{T} = \frac{p_2}{T_2}$$

联立上述各式可得

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

$$p_2 = \frac{p_1 V_1 T_2}{V_2 T_1} = \frac{2 \times 10^5 \times 1 \times 300}{2 \times 200} \text{ Pa} = 1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$$

等温和等容变化后气体的压强为  $1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

## 理想气体

前面学习的等温、等压和等容三个气体实验定律都是在压强不太大（相对大气压）、温度不太低（相对室温）的条件下总结出来的。当压强很大、温度很低时，由上述规律计算的结果与实际测量结果有很大的差别。例如，有一定质量的氦气，压强与大气压相等，体积为  $1 \text{ m}^3$ ，温度为  $0^\circ\text{C}$ 。在温度不变的条件下，如果压强增大到大气压的 500 倍，按气体的等温变化规律计算，体积应该缩小至  $\frac{1}{500} \text{ m}^3$ ，但是实验结果是  $\frac{1.36}{500} \text{ m}^3$ 。但是，在通常的温度和压强下，很多实际气体，特别是那些不容易液化的气体，如氢气、氧气、氮气、氦气等，其性质与实验定律的结论符合得很好。

实际气体的分子之间有相互作用力，但是作用力很小；分子也有大小，但气体分子之间的间距比分子直径大得多；气体分子与器壁碰撞几乎是完全弹性的，动能损失也很小。为了研究方便，我们设想有一种气体：这种气体分子大小和相互作用力可以忽略不计，也可以不计气体分子与器壁

碰撞的动能损失。这样的气体在任何温度、任何压强下都遵从气体实验定律，我们把它叫作**理想气体**（ideal gas）。按照这种理想情况下得出的物理规律能很好地解释实际气体的热学性质。在温度不低于零下几十摄氏度、压强不超过大气压的几倍时，把实际气体当成理想气体来处理，误差很小。



## 拓展学习

### 理想气体的状态方程

描述一定质量的某种理想气体状态的参量有三个，即压强 $p$ 、体积 $V$ 和温度 $T$ 。等温、等压和等容三个实验定律都是研究当一个参量不变时另外两个参量的关系问题。进一步的研究结果表明，一定质量的某种理想气体，在从某一状态变化到另一状态时，尽管其压强 $p$ 、体积 $V$ 和温度 $T$ 都可能改变，但是压强 $p$ 跟体积 $V$ 的乘积与热力学温度 $T$ 的比值却保持不变。也就是说

$$\frac{pV}{T} = C$$

式中 $C$ 是与压强 $p$ 、体积 $V$ 、温度 $T$ 无关的常量，它与气体的质量、种类有关。上式叫作理想气体的状态方程。

## 气体实验定律的微观解释

用分子动理论可以定性解释气体的实验定律。

一定质量的某种理想气体，温度保持不变时，分子的平均动能是一定的。在这种情况下，体积减小时，分子的数密度增大，单位时间内、单位面积上碰撞器壁的分子数就多，气体的压强就增大（图2.3-3）。这就是玻意耳定律的微观解释。

一定质量的某种理想气体，温度升高时，分子的平均动能增大；只有气体的体积同时增大，使分子的数密度减小，才能保持压强不变。这就是盖-吕萨克定律的微观解释。

一定质量的某种理想气体，体积保持不变时，分子的数密度保持不变。在这种情况下，温度升高时，分子的平均动能增大，气体的压强就增大。这就是查理定律的微观解释。

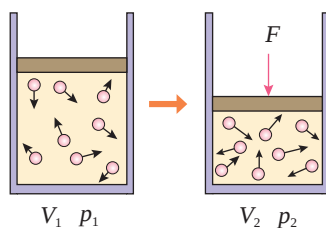


图 2.3-3 等温变化

## 理想模型

在科学研究中，理想模型是为了便于研究问题而对研究对象进行理想化抽象的过程。实际问题往往比较复杂，影响的因素很多，直接研究它们会比较困难或几乎不能研究。科学研究中总是抓住研究对象的主要特征，忽略次要因素，对研究对象进行理想化抽象。运用这种方法，人们就可以用模型来表示研究对象，使得研究变得简单、有效，从而便于人们去认识和把握问题的本质。应该说，理想模型在现实中并不存在，但是通过它可以对实际问题进行本质探讨，并得到有价值的结论。物理学中通过抽象方法构建的理想化模型有很多，例如，质点、点电荷、单摆、弹簧振子、理想变压器、理想气体等。

## 练习与应用

1. 盛有氧气的钢瓶，在  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$  的室内测得钢瓶内的压强是  $9.31 \times 10^6\text{ Pa}$ 。当钢瓶搬到  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$  的工地上时，瓶内的压强变为  $8.15 \times 10^6\text{ Pa}$ 。钢瓶是不是漏气？为什么？

2. “拔火罐”是我国传统医学的一种治疗手段。操作时，医生用点燃的酒精棉球加热一个小罐内的空气，随后迅速把小罐倒扣在需要治疗的部位，冷却后小罐便紧贴在皮肤上（图 2.3-4）。设加热后小罐内的空气温度为  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，当时的室温为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，大气压为标准大气压，小罐开口部位的直径请按照照片中的情境估计。当罐内空气变为室温时，小罐对皮肤的压力大概有多大？不考虑因皮肤被吸入罐内导致空气体积变化的影响。



图 2.3-4

3. 如图 2.3-5，向一个空的铝制饮料罐中插入一根透明吸管，接口用蜡密封，在吸管内引入一小段油柱（长度可以忽略）。如果不计大气压的变化，这就是一个简易的气温计。已知罐的容积是  $360\text{ cm}^3$ ，吸管内部粗细均匀，横截面积为  $0.2\text{ cm}^2$ ，吸管的有效长度为  $20\text{ cm}$ ，当温度为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  时，油柱离管口  $10\text{ cm}$ 。若给吸管上标刻温度值，刻度是否均匀？试估算这个气温计的测量范围。



图 2.3-5

4. 一个容器内部呈不规则形状，为测量它的容积，在容器上插入一根两端开口的玻璃管，接口用蜡密封。玻璃管内部横截面积为  $S$ ，管内一静止水银柱封闭着长度为  $l_1$  的空气柱，如图 2.3-6，此时外界的温度为  $T_1$ 。现把容器浸在温度为  $T_2$  的热水中，水银柱静止时下方的空气柱长度变为  $l_2$ 。实验过程中认为大气压没有变化，请根据以上数据推导容器容积的表达式。

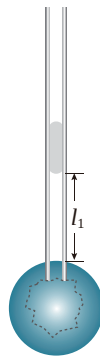


图 2.3-6

## 4 固体

### 问题 ?

观察食盐颗粒和松香的外形，它们的外形各有怎样的特征？

再用显微镜观察精盐和松香粉末的外形，两者有什么样的差别吗？



食盐颗粒总是呈现立方体形，松香颗粒没有规则的几何形状。

### 晶体和非晶体

固体可以分为晶体和非晶体两类。

石英、云母<sup>①</sup>、明矾、食盐、硫酸铜、味精等是晶体。雪花是水蒸气凝华时形成的晶体，它们都具有相似的几何形状，即图案中都有六个角（图2.4-1）。食盐晶体是正六面体形，明矾晶体总是八面体形，天然石英晶体（俗称水晶）的中间是一个六棱柱，两端是六棱锥（图2.4-2）。晶体有天然的、规则的几何形状（图2.4-3）。

玻璃、蜂蜡、松香、沥青、橡胶等是非晶体。非晶体没有规则的外形。



图 2.4-1 雪花的形状

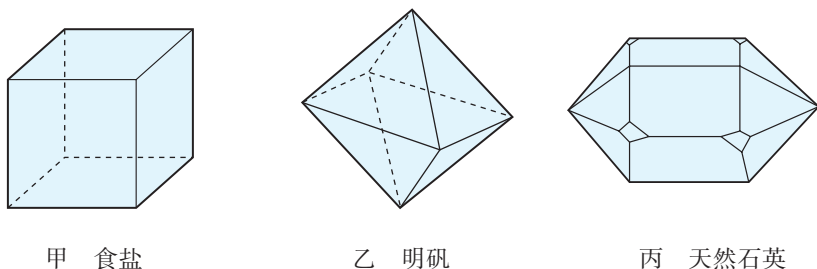


图 2.4-2 几种晶体的几何形状



图 2.4-3 晶体的外形

<sup>①</sup> 云母是一种矿物，化学成分为铝硅酸盐，可以剥成一片片的薄层。有些云母的绝缘性能很好，在过去没有塑料的年代，云母常在电器中当作绝缘物使用。

除了形状是否规则外，晶体和非晶体在物理性质上也有所不同。我们在初中已经学过，晶体具有确定的熔点，非晶体没有确定的熔化温度，这就是区别之一。此外，其他物理性质也有差异。

## 实验

### 观察玻璃和云母片上石蜡熔化区域的形状

把融化了的石蜡薄薄地涂在薄玻璃片和单层云母片上，再将烙铁通电烧热，然后用烙铁头分别接触玻璃片和云母片的背面（图 2.4-4）。观察玻璃片和云母片石蜡熔化区域的形状（图 2.4-5）。

石蜡熔化区域形状的不同说明了什么？



图 2.4-4 实验装置



甲 玻璃片



乙 云母片

图 2.4-5 熔化区域的形状



图 2.4-6 方解石的双折射现象

从实验结果可以看出，玻璃片上石蜡熔化区域的形状近似于圆形，表明玻璃沿各个方向的导热性能相同；云母片上石蜡熔化区域的形状呈椭圆形，表明云母沿不同方向的导热性能不同。还有些晶体沿不同方向的导电性能不同；而有些晶体沿不同方向的光学性质不同，这类现象叫作**各向异性**（anisotropy）。如图 2.4-6，方解石晶体是各向异性的晶体，它能把光分解为两束光而沿不同方向折射，形成双折射现象。非晶体沿各个方向的物理性质都是一样的，这叫作**各向同性**（isotropy）。

## 思考与讨论

常见的金属没有规则的形状，但具有确定的熔点。它们是晶体还是非晶体？

从金属的显微图样中可以看到，它是由许多细小的晶粒组成的（图2.4-7）。每个晶粒都是一个小的**单晶体**（**monocrystal**），有规则的形状且各向异性。

但是，由于这些小的单晶体的取向杂乱无章，所以金属没有确定的几何形状，也不显示各向异性，仅保留了在一定压强下具有确定熔点的特征，我们把它称为**多晶体**（**polycrystal**）。蔗糖受潮后粘在一起形成的糖块，看起来没有确定的几何形状。但是用放大镜观看，仍可以发现组成糖块的一个个晶体粒。粘在一起的糖块也是多晶体，单个的蔗糖晶体颗粒是单晶体。

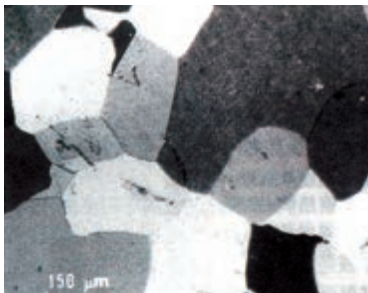


图 2.4-7 显微镜下铝—锂—锰合金的断裂面

## 晶体的微观结构

为什么晶体的形状和物理性质会与非晶体不同？

人们认为很可能是它们的微观结构不一样。从17世纪到19世纪，陆续出现了一些假说，某一种假说认为各种晶体内部的微粒是按各自的规则排列着的，但是，由于当时检测技术的限制，缺少实验证据，所以，这些想法只能是假说。

到了20世纪初，通过X射线在晶体上衍射的实验，这种假说才得到证实。在20世纪70年代，人们又用电子显微镜观察到了铀、钍原子的像。1982年，人们用扫描隧道显微镜观察到物质表面原子的排列。

在各种晶体中，原子（或分子、离子）都是按照一定的规则排列的，具有空间上的周期性。图2.4-8是食盐晶体中氯离子和钠离子分布的示意图。

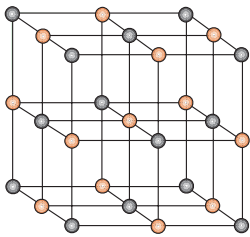


图 2.4-8 食盐晶体的微观结构

有的物质在不同条件下能够生成不同的晶体。那是因为组成它们的微粒能够按照不同规则在空间分布。例如，碳原子如果按图2.4-9那样排列，就成为石墨，而按图2.4-10那样排列，就成为金刚石。石墨是层状结构，层与层之间距离较大，原子间的作用力比较弱，所以，石墨质地松软，可以用来制作粉状润滑剂；金刚石中碳原子间的作用力很强，所以，金刚石有很大的硬度，可以用来切割玻璃。

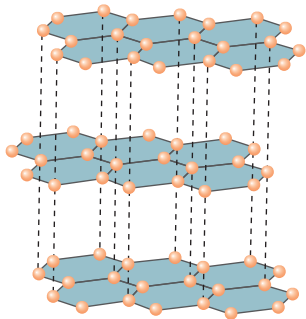


图 2.4-9 石墨的微观结构

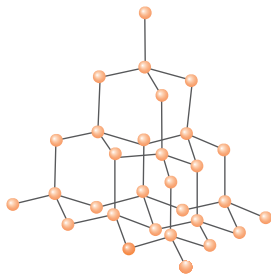


图 2.4-10 金刚石的微观结构

原子（或者分子、离子）并不是静止不动的。它们在不停地振动，图中所画的那些点，是它们振动的平衡位置。



图 2.4-11 石英玻璃

同种物质也可能以晶体和非晶体两种不同的形态出现，也就是说，物质是晶体还是非晶体，并不是绝对的。例如，天然石英是晶体，而熔化以后再凝固的水晶（即石英玻璃）就是非晶体（图 2.4-11）。有些非晶体在一定条件下也可以转化为晶体。



### 石墨烯实验研究背后的故事

我们知道，物体是由原子、分子等微粒组成的，它们按一定规律组成一个个“小单元”，这些“小单元”结合在一起形成了肉眼可见的物体。用机械的方法把物体粉碎、研磨，可以得到很细的粉末，但实际上一粒这样的粉末仍比这里说的“小单元”大得多。当构成材料的“小单元”的某个维度达到纳米尺度时，它的性质就会发生很大的变化。石墨烯就是一个典型的例子。

石墨烯具有六边形的晶格结构（图 2.4-12），单层厚度仅为 0.335 nm。2010 年的诺贝尔物理学奖授予了安德烈·盖姆与康斯坦丁·诺沃肖洛夫两人，以表彰他们对石墨烯的开创性实验研究。

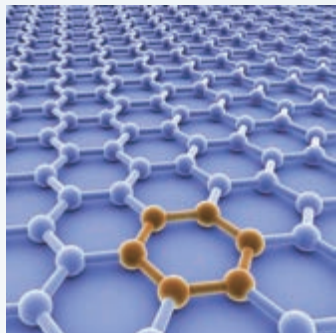


图 2.4-12 石墨烯六边形的晶格结构

安德烈对待研究工作一直颇具想象力和好奇心。例如，他在利用超导强磁铁发现水分子具有抗磁性后（水滴悬浮在磁场中），便开始思考：生物体内绝大多数物质是水，而且生物体内的蛋白质也具有抗磁性，如果将生物体放入磁场内，会像水滴一样悬浮吗？于是，他把一只活体青蛙放入磁场，在精确的计算下，这只青蛙真的悬浮在了磁场中。安德烈将这个实验结果发表在了物理期刊上，并为他赢得了 2000 年的“搞笑诺贝尔物理学奖”。然而，他的想象力并未止步，也从未停止……

在 2004 年之前，人类对材料的研究已经进入纳米、甚至原子尺度，人们也对石墨烯的结构有了更清晰的认识，预言了单层石墨可能会有非常好的物理性质。但如何把石墨不断磨薄，薄到只有一个原子的厚度，然而，这个世界性难题还是让很多科学家们望而却步了，甚至有人质疑单层石墨是否能够独立存在。安德烈的想象力再一次“拯救”了这项研究，在助手们试图将石墨块磨成石墨烯而陷入“绝境”的时候，安德烈在偶然的机会上，观察到助手们用透明胶带去除石墨块表面的污渍。这时他天才的直觉引导他将粘过的胶带放到仪器下观察，发现远比助手们打磨好的样品薄了许多，有的甚至只有几十个原子那么厚。随即，他便利用透明胶带反复地粘黏，直到获得了单层的石墨——石墨烯。石墨烯独特的结构使得它在力学、电学等方面具有很多奇特的物理性质。

在力学特性方面，石墨烯是目前人类已知的强度最高的物质之一。强度比世界上最好的钢铁还要高百倍之多。同时还具有很好的韧性，且可以弯曲。在电学、热学特性方面，电子在石墨烯

中“奔跑”的速率（即迁移率）比在硅材料中高出数十倍甚至上百倍，这有利于进一步提高计算机处理器的运算速率。

无论是搞笑的，还是货真价实的诺贝尔物理学奖，安德烈的研究总是让人颇感意外。解决具有挑战性的科学问题，除了扎实的理论 and 精密的仪器外，好奇心、想象力、对日常生活的细致观察和灵活运用也同样重要。

 练习与应用

1. 某人为了检验一块薄片物质是否为晶体，做了一个实验。他以薄片的正中央O为坐标原点，建立Oxy平面直角坐标系，在两个坐标轴上分别取两点 $x_1$ 和 $y_1$ ，使 $x_1$ 和 $y_1$ 到O点的距离相等。在 $x_1$ 和 $y_1$ 上分别固定一个测温元件，再把一个针状热源放在O点，发现 $x_1$ 点和 $y_1$ 点的温度在缓慢升高，但两点温度的高低没有差异。于是得出结论：这块薄片是非晶体。

请说明：以上结论科学吗？为什么？

2. 食盐晶体的结构可以用钠离子和氯离子空间分布的示意图表示（图2.4-8），图中相邻离子的中心用线连起来了，组成了一个一个个大小相等的立方体。现在要估算相邻两个钠离子中心的距离，除了知道食盐的密度 $\rho$ 为 $2.17 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 外，还要知道哪些数据？请用字母表示这些已知数据，推导出相邻两个钠离子中心距离的表达式。

提示：图中最小立方体的个数与离子数目相等。

3. 内陆盐矿中开采的氯化钠称为岩盐，岩盐的颗粒很大，我们能清楚地看出它的立方体形状。把大颗粒的岩盐敲碎后，小颗粒的岩盐仍然呈立方体形状。

图2.4-13表示了岩盐晶体的平面结构：粉红点为氯离子，灰点为钠离子，如果把它们用直线连起来，将构成一系列大小相同的正方形，

作分界线 $AA_1$ ，使它平行于正方形的对角线，作分界线 $BB_1$ ，使它平行于正方形的一边。在两线的左侧各取一个钠离子M和N，为了比较这两个钠离子所受分界线另一侧的离子对它作用力的大小，分别以M、N为圆心，作两个相同的扇形，不考虑扇形以外远处离子的作用。

（1）如果F表示两个相邻离子之间引力的大小，问：M、N所受扇形范围内的正负离子对它作用力的合力是F的多少倍？为使问题简化，设所有离子都是质点，而且它们之间的相互作用遵从“平方反比”规律。

（2）根据计算结果解释：为什么敲碎的岩盐总是呈立方形状，而不会沿图中 $AA_1$ 分界线断开？

提示：实际晶体中的作用力要复杂得多，但这里的分析对理解自然现象还是有用的。

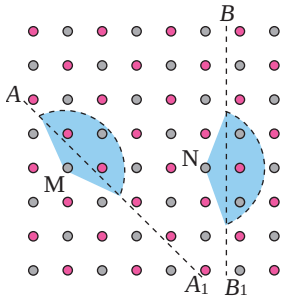


图 2.4-13 岩盐晶体的平面结构

## 5 液体

### 问题 ?

在杯子中盛满清水。将曲别针一枚一枚依次放入杯中，比一比看谁放入的曲别针数量最多，而杯中的水不会溢出。你能解释这一现象吗？



2.5-1 水黾可以停在水面

### 液体的表面张力

我们发现：一些昆虫可以停在水面上（图 2.5-1）；叶面上的露珠呈球形……这些现象表明，液体表面可能具有与内部不同的性质。

### 实验

#### 观察肥皂膜和棉线的变化

1. 把一条细棉线的两端分别系在铁丝环的两侧，要使棉线处于略有松弛的状态。然后将铁丝环浸入肥皂液里，再拿出来时环上就留下了一层肥皂液的薄膜。这时薄膜上的棉线仍是松弛的（图 2.5-2 甲）。用烧热的针刺破棉线一侧的薄膜（图 2.5-2 乙），观察薄膜和棉线发生的变化。

2. 把一个棉线圈系在铁丝环上，使环上布满肥皂液的薄膜，这时膜上的棉线圈仍是松弛的（图 2.5-2 丙）。用烧热的针刺破棉线圈里的薄膜，观察棉线圈外的薄膜和棉线圈发生的变化（图 2.5-2 丁）。



图 2.5-2 观察肥皂膜和棉线的变化

观察结果表明，用烧热的针刺破棉线某一侧的薄膜后，另一半肥皂膜就会立即收缩把松弛的棉线绷紧，并且始终向着肥皂膜一侧收缩，液体的表面具有收缩趋势。

为什么液体表面具有收缩趋势呢？原来，液体表面有一层跟气体接触的薄层，叫作表面层。表面层与液体内部的微观结构不同（图2.5-3甲）。在第一章我们已经了解了分子间的作用力跟分子间距离的关系问题。在液体内部，分子间平均距离 $r$ 略小于 $r_0$ ，分子间的作用力表现为斥力；在表面层，分子比较稀疏，分子间距离 $r$ 略大于 $r_0$ ，分子间的作用力表现为引力。设想在液体表面画一条直线 $MN$ ，把液体表面分为1、2两部分， $MN$ 两侧的液体之间存在着一对与 $MN$ 垂直、大小相等、方向相反的作用力（图2.5-3乙）。<sup>①</sup>由于是任意画的，所以这种力在液体表面层内的各个方向上都存在，力的方向总是跟液面相切，且与分界面垂直。这种力使液体表面绷紧，叫作液体的**表面张力**（**surface tension**）。

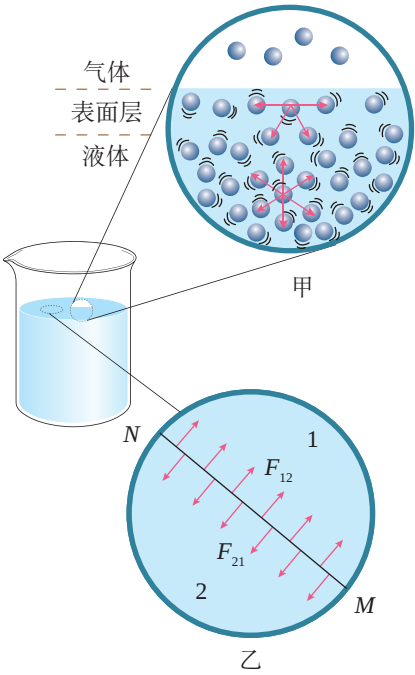


图 2.5-3 液体的表面张力

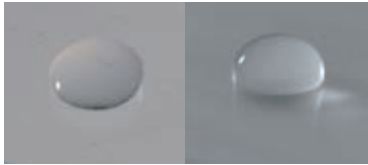
**思考与讨论**

还记得《普通高中教科书物理必修第一册》中展示的“太空授课”画面吗？在空间站里，水滴的形状是一个完美的球形。生活中我们还经常看到荷叶上的露珠呈扁平球形等现象。你能解释这是为什么吗？

到现在为止，我们已经从实验和理论两个方面了解了液体的表面张力，知道它具有使液体表面收缩的趋势。为什么那么多曲别针沉入杯中水却还没溢出？为什么水黾可以停在水面上？相信你可以给出解释了。

**浸润和不浸润**

在一块洁净的玻璃板上滴一滴水，我们看到，这滴水会逐渐散开并附着在玻璃板上（图2.5-4甲）；在一块涂了蜡的玻璃板上滴一滴水，这滴水却可以滚来滚去，而不能附着在蜡面上（图2.5-4乙）。这个结果表明，水可以润湿



甲 玻璃面      乙 蜡面

图 2.5-4 浸润和不浸润

<sup>①</sup> 如果液面是曲面，这种作用力与液体表面相切。

玻璃，但水不能润湿蜡。

一种液体会润湿某种固体并附着在固体的表面上，这种现象叫作**浸润**；一种液体不会润湿某种固体，也就不会附着在这种固体的表面，这种现象叫作**不浸润**。当液体和与之接触的固体的相互作用比液体分子之间的相互作用强时，液体能够浸润固体。反之，液体则不浸润固体。

一种液体是否浸润某种固体，与这两种物质的性质都有关系。例如，水银不浸润玻璃，但浸润铅。如果把水银滴到干净的铅板上，水银就会附着在铅板上，很难擦去。

液体放在玻璃管中，液面与管壁接触的位置是弯曲的，但有的向上弯，有的向下弯（图 2.5-5）。这也是浸润与不浸润两种现象的区别。



图 2.5-5 玻璃管中的水和水银

## 实验

### 观察毛细现象

将内径不同、两端开口的洁净细玻璃管竖直插入水中（图 2.5-6 甲），观察细玻璃管中液面的高度；再将另一组内径不同、两端开口的塑料笔芯竖直插入水中（图 2.5-6 乙），观察笔芯中液面的高度。



甲 玻璃管

乙 塑料笔芯

图 2.5-6 细玻璃管和塑料笔芯的毛细现象

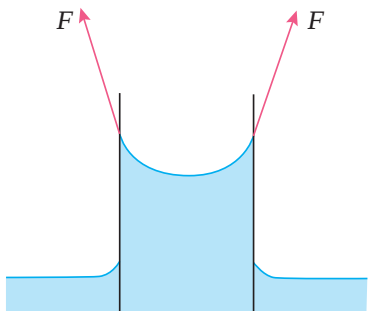


图 2.5-7 表面张力对管中液体形成向上的拉力的示意图

实验结果表明，洁净细玻璃管内的液面比水面高；塑料笔芯内的液面比水面低。管的内径越小，上述现象就越明显。像这样浸润液体在细管中上升的现象，以及不浸润液体在细管中下降的现象，称为**毛细现象（capillarity）**。

由于液体浸润管壁，液面呈图 2.5-7 所示的形状，液面弯曲。液体表面张力形成向上的拉力，这个力使管中液体向上运动。当管中液体上升到一定高度时，液体所受重力与这个使它向上的力平衡，液面稳定在一定的高度。

有些物体内部有许多细小的孔道，孔道起到了毛细管的作用。例如，土壤里有很多毛细管，地下的水分可以沿着它们上升到地面。如果要保存地下的水分，就要把地面的土壤锄松（图 2.5-8），破坏这些土壤里的毛细管。相反，如果想把地下的水分引上来，就不仅要保持土壤里的毛细管，而且还要使它们变得更细，这时就要用碾子压紧土壤。



图 2.5-8 保墒

## 液晶

液晶在现代生活中扮演着重要角色，广泛应用于手机屏幕、平板电视等显示设备中。为什么“液体”和“晶体”联系在一起了？液晶到底是什么物质？

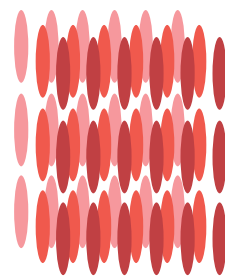
构成液晶的分子为有机分子，大多为棒状，其棒长多为棒直径的5倍以上，由于这种长棒状的分子结构，使得分子集合体在没有外界干扰的情况下趋向分子相互平行排列（图2.5-9甲）。

液晶具有液体的流动性，但在低温时液晶会凝固成结晶态，不仅分子的取向是有序的，而且分子重心的位置也是有序的（图2.5-9甲）。如果把结晶态分子的有序排列程度定为1的话，则当温度升高时，晶体中分子的热运动增强，使分子重心位置的有序性消失，转为液晶态（图2.5-9乙），分子取向有序程度也下降为0.6。当温度进一步升高时，分子取向有序性也消失，完全进入无序的状态，变成液态（图2.5-9丙）。

可见，液晶是介于固态和液态之间的一种物质状态。液晶态既具有液体的流动性，又在一定程度上具有晶体分子的规则排列的性质。有些物质在特定的温度范围之内具有液晶态；另一些物质，在适当的溶剂中溶解时，在一定的浓度范围具有液晶态。

分子取向排列的液晶具有光学各向异性，具体地说，沿分子长轴方向上的折射率不同于沿短轴的。入射光的偏振方向与液晶分子长轴的方向成不同夹角时，液晶对光的折射率不同。因此，一束非偏振光射入液晶层后再射出时，由于液晶折射率的各向异性会产生两束光程不同的光。这样两束光在出射点处矢量叠加（等效于干涉），我们在显微镜下就可以观察到某种色光。

液晶的研究在生命科学中也有应用。例如，某些物质在水溶液中能够形成薄片状液晶，而这正是生物膜的主要构成部分。目前在实验室中已经可以利用这样的人造生物膜研究离子的渗透性，从而了解机体对药物的吸收等生理过程。另外，在脑、肌肉和视网膜等多种人体组织中都发现了液晶结构，有关液晶的研究已经成为物理科学与生命科学的一个重要结合点。



甲 结晶态



乙 液晶态



丙 液态

图 2.5-9 液晶材料的分子排列特性

## 液晶显示

如图 2.5-10，某种液晶分子取向可沿轴旋转，形成连续扭曲状态，TN 模式显示器里用的就是这种液晶。扭曲排列的液晶分子具有旋光性，即光的偏振方向沿液晶的排列方向旋转。上下基板外侧附着两片透光轴互相垂直的偏振片，上侧的偏振片透光轴与上侧基板处的液晶取向平行，下侧的偏振片透光轴与下侧基板处的液晶取向平行。上下基板内侧带有透明电极。中间部分的液晶分子则连续扭曲  $90^\circ$  排列（图 2.5-10 甲）。

不加电场时，自然光通过第一块偏振片变为平行于上基板处液晶取向的偏振光，偏振光被液晶层旋光，转过  $90^\circ$  后偏振方向正好与下基板处偏振片的透光轴相平行，光透过时呈现亮态。

加电场后，原来扭曲排列的液晶分子变为垂直平行排列，液晶分子沿电场方向竖起，透过第一块偏振片的偏振光通过液晶层时不再发生旋光，到达出射端的偏振片时，透光轴与出射光的偏振方向垂直，光被截止，呈现暗态（图 2.5-10 乙）。

如果电场不够强，液晶分子处于半竖立状态，旋光作用也处于半完全状态，则会有部分光透过，呈现中间灰度。

当液晶用于显示时，要将上下基板的电极刻蚀成条形，两基板上的条形电极垂直对置，每两个极板对应的位置就是一个像素，它有自己的  $x$ 、 $y$  坐标，如此形成了像素的“矩阵”用于“电寻址”（图 2.5-11）。选通的像素为开态，未选通的像素为关态。为了具有彩色显示，每一个像素又分为三个子像素对应红、蓝、绿三基色彩色滤光膜。对三个子像素的光强分别进行调制，通过三基色混色获得彩色显示。这就是液晶显示器的基本工作原理。

液晶显示器轻便、节能且只需低压（小于  $5\text{ V}$ ）驱动，目前已经广泛应用在便携式设备上。

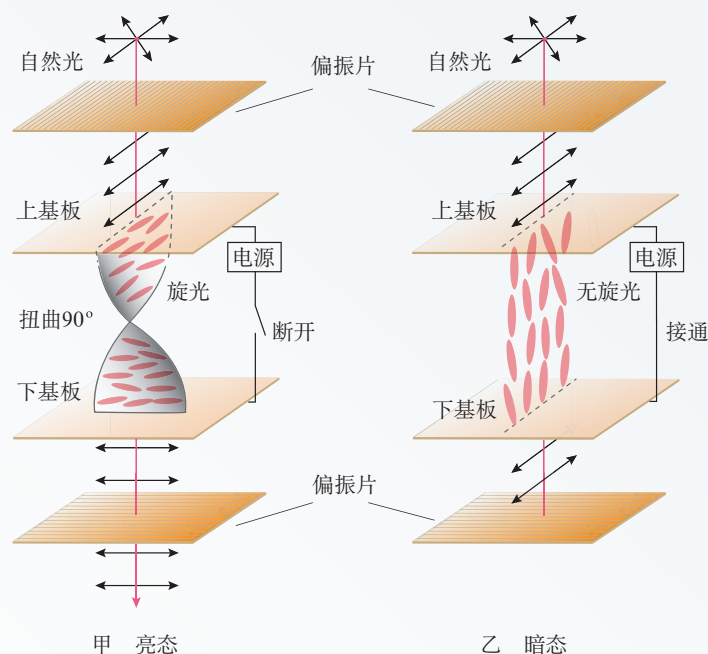


图 2.5-10 TN 模式液晶显示器的基本工作原理示意图

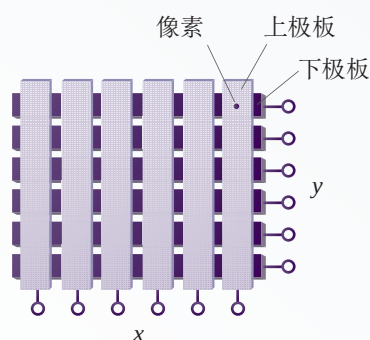


图 2.5-11 像素矩阵显示中的条形电极

1. 把玻璃管的裂口放在火焰上烧熔，它的尖端就会变钝（图 2.5-12）。这是什么缘故？



图 2.5-12

2. 在玻璃的蒸发皿中，较小的水银滴接近球形，较大的水银滴呈扁平形（图 2.5-13）。那么，在处于失重状态的宇宙飞船中，一大滴水银会呈什么形状？

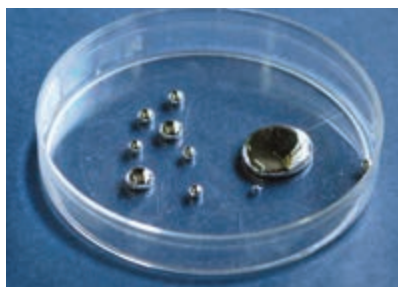


图 2.5-13

3. 把一枚缝衣针在手上蹭一蹭，然后放到一张餐巾纸上。用手把餐巾纸轻放在水面上。餐巾纸浸湿下沉，而缝衣针会停在水面。把针按入水下，针就不再浮起。做这个实验，并解释上述现象。

4. 要想把凝固在衣料上的蜡迹去掉，可以把两层棉纸分别放在蜡迹处衣服的上面和下面，然后用热熨斗在棉纸上来回烫熨。为什么这样做可以去掉衣料上的蜡迹？

5. 若你和家人要外出度假一段时间，家里的盆栽又需要时常浇少量的水。你能否利用毛细现象设计一种自动浇水装置呢？请绘制一个设计图。

6. 在一次小发明讨论会上，某同学有一个创意。他发现厨房碗柜里酱油瓶的下面总是有黑乎乎的酱油痕迹，这是由于每次倒酱油的时候总会有一些酱油沿着瓶口流淌下来并渗透所造成的。他想，只要选择恰当的材料做酱油瓶的瓶口，就能保持瓶子清洁。于是，他把酱油分别滴在不同的材料上进行实验。请观察图 2.5-14，为实现上述目的，你认为应该选择哪一种材料？请解释这项创意的道理。



图 2.5-14

### A 组

1. 在完全失重的情况下气体对器壁是否还有压强？为什么？请设计实验验证你的猜想。

2. 如图 2-1，某自动洗衣机洗衣缸的下部与一控水装置的竖直均匀细管相通，细管的上部封闭，并和一压力传感器相接。洗衣缸进水时，细管中的空气被水封闭，随着洗衣缸中水面的升高，细管中的空气被压缩，当细管中空气压强达到一定数值时，压力传感器使进水阀门关闭，达到自动控水的目的。假设刚进水时细管被封闭的空气柱长度为 50 cm，当空气柱被压缩到 48 cm 时压力传感器使洗衣机停止进水，此时洗衣缸内水位有多高？大气压取  $10^5 \text{ Pa}$ ， $g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ 。

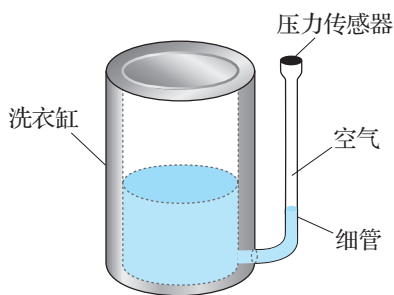


图 2-1

3. 今有一质量为  $m$  的汽缸，用活塞封着一一定质量的理想气体，当汽缸水平横放时，汽缸内空气柱长为  $l_0$ （如图 2-2 甲所示），现把活塞按如图乙那样悬挂，汽缸悬在空中保持静止。

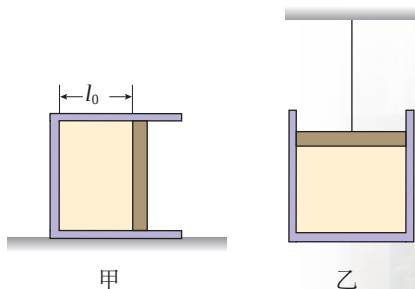


图 2-2

求此时汽缸内空气柱长度为多少？已知大气压强为  $p_0$ ，活塞的横截面积为  $S$ ，它与汽缸之间无摩擦且不漏气，气体温度保持不变。

4. 一定质量的理想气体由状态 A 经状态 B 变为状态 C，其中  $A \rightarrow B$  过程为等压变化， $B \rightarrow C$  过程为等容变化。已知状态 A 的体积  $V_A$  为  $0.3 \text{ m}^3$ ，状态 A 的温度  $T_A$  与状态 C 的温度  $T_C$  相同，都为 300 K，状态 B 的温度  $T_B$  为 400 K。

(1) 求气体在状态 B 时的体积。

(2) 说明  $B \rightarrow C$  过程压强变化的微观原因。

5. 有一教室，上午 8 时温度为  $17^\circ\text{C}$ ，下午 2 时的温度为  $27^\circ\text{C}$ ，假定大气压强无变化，则下午 2 时与上午 8 时教室内的空气质量的比值为多大？

6. 在一次科学晚会上，胡老师表演了一个“马德堡半球实验”。他先取出两个在碗底各焊接了铁钩的不锈钢碗，在一个碗里烧了一些纸，然后迅速把另一个碗扣上，再在碗的外面浇水，使其冷却到环境温度。用两段绳子分别钩着铁钩朝相反的方向拉，试图把两个碗拉开（图 2-3）。当两边的人各增加到 5 人时，才把碗拉开。已知碗口的直径为 20 cm，环境温度为  $15^\circ\text{C}$ ，实验过程中碗不变形，也不漏气，设每人平均用力为 200 N。请你估算一下，两个不锈钢碗刚被扣上时，里面空气的温度是多少？

图 2-3



7. 如图 2-4 所示, 一定质量的理想气体从状态 A 开始, 经历两个状态变化过程, 先后到达状态 B 和 C。已知状态 A 的温度  $T_A$  为 300 K, 求状态 C 的温度。

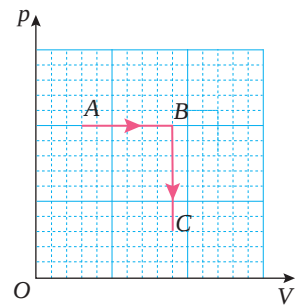


图 2-4

8. 菜农在一种蔬菜完全收割之后往往会将地翻松, 在适合的时节再种植新的蔬菜。据菜农说, 翻松的土层可以防止土壤中的水分散失, 这是什么道理?

### B 组

1. 有人设计了一种测温装置, 其结构如图 2-5 所示。玻璃泡 A 内封有一定量气体, 与 A 相连的 B 管插在水银槽中, 管内水银面的高度  $x$  即可反映泡内气体的温度, 即环境温度, 并可由 B 管上的刻度直接读出。设 B 管的体积与 A 泡的体积相比可略去不计。

(1) 在标准大气压下对 B 管进行温度刻度 (标准大气压相当于 76 cm 高的水银柱所产生的压强)。当温度  $t_1$  为  $27^\circ\text{C}$  时, 管内水银面高度为 16 cm, 此高度即为  $27^\circ\text{C}$  的刻度线。问  $t$  为  $-3^\circ\text{C}$  的刻度线在  $x$  为多少厘米处?

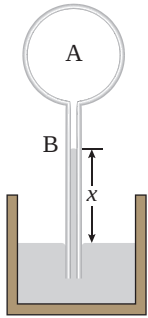


图 2-5

(2) 如果对以上 B 管标注  $27^\circ\text{C}$  刻度线时, 环境真实压强比标准大气压小 (例如在高山上的实验), 但实验者当成了标准大气压来设计。若此温度计显示为  $-3^\circ\text{C}$ , 则显示温度比实际温度高还是低? 为什么? 认为环境大气压没有随温度变化。

2. 超市中有一种“强力吸盘挂钩”如图 2-6 所示。图 2-7 是它的工作原理示意图。使用时, 按住锁扣把吸盘紧压在墙上 (图 2-7 甲), 吸盘中的空气被挤出一部分。然后要把锁扣扳下 (图 2-7 乙), 让锁扣以盘盖为依托把吸盘向外

拉出。在拉起吸盘的同时, 锁扣对盘盖施加压力, 致使盘盖以很大的压力压住吸盘。为什么锁扣扳下后, 盘盖对吸盘会产生很大的压力?



图 2-6

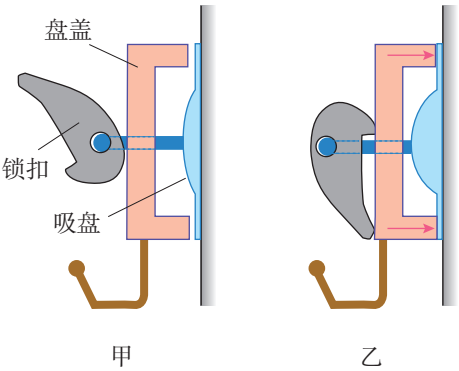


图 2-7

3. 为了测量一些形状不规则而又不便浸入液体的固体体积, 可用图 2-8 所示的装置测量。操作步骤和实验数据如下。

a. 打开阀门 K, 使管 A、容器 C、容器 B

和大气相通。上下移动D，使左侧水银面到达刻度  $n$  的位置；

b. 关闭K，向上举D，使左侧水银面达到刻度  $m$  的位置。这时测得两管水银面高度差为  $19.0\text{ cm}$ ；

c. 打开K，把被测固体放入C中，上下移动D，使左侧水银面重新到达位置  $n$ ，然后关闭K；

d. 向上举D，使左侧水银面重新到达刻度  $m$  处，这时测得两管水银面高度差为  $20.6\text{ cm}$ 。

已知容器C和管A的总体积为  $1\,000\text{ cm}^3$ ，求被测固体的体积。

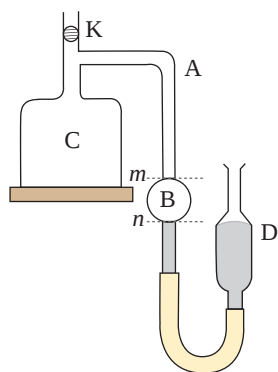


图 2-8

4. 汽车行驶时轮胎的胎压太高或太低容易造成安全隐患。已知某型号轮胎能在  $-40\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度下正常工作，为使轮胎在此温度范围内工作时的最高胎压不超过  $3.535\times 10^5\text{ Pa}$ ，最低胎压不低于  $1.616\times 10^5\text{ Pa}$ 。设轮胎容积不变，若在温度  $t$  为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时给该轮胎充气，充气后的胎压在什么范围内比较合适？

5. 图 2-9 是一定质量的理想气体由状态 A 经过状态 B 变为状态 C 的  $V-T$  图像。已知气体在状态 A 时的压强是  $1.5\times 10^5\text{ Pa}$ 。请你建立一

个坐标系，并在该坐标系中，作出气体由状态 A 经过 B 变为 C 的  $p-T$  图像，并标出 A、B、C 的坐标值。

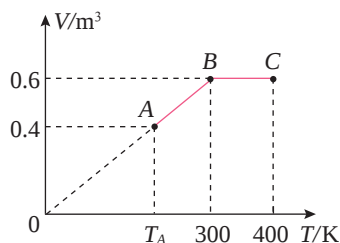


图 2-9

6. 细长玻璃管用长  $l_0$  为  $6.8\text{ cm}$  的水银柱封闭一定质量的空气。当玻璃管开口向下竖直放置时，空气柱长度  $l_1$  为  $33\text{ cm}$ ；当玻璃管水平放置时，空气柱长度  $l_2$  为  $30\text{ cm}$ 。求玻璃管开口向上竖直放置时空气柱的长度。

7. 把上端 A 封闭、下端 B 开口的玻璃管插入水中。放掉适当的空气后放手，让玻璃管竖直地浮在水中，A 端露出水面，如图 2-10 所示。现将玻璃管往下压一点，放手后玻璃管会返回原来的平衡位置，请解释发生这种现象的原因。

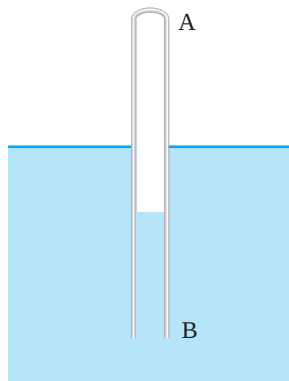


图 2-10

# 03

## 第三章 热力学定律

冷热变化是最早引起人们关注的自然现象之一。春夏秋冬，温暑凉寒，何时何处不与冷热相关？人类不但掌握了精确的测温控温方法，还可以人工产生高热和深冷，在高热和深冷的“世界”里不断发现新的科学奇迹。可以说，现代科技的每一项成功——不论是试管婴儿的诞生，还是探索原子世界的奥秘；不论是杂交水稻的培育，还是驾驶“神舟”遨游太空，都离不开“冷热”的学问。



从对一切其他的已知物理和化学过程的这类研究中可以得出这样的结论，自然界作为整体来说它蕴藏着一定数量的能量，它既不会减少，也不会增加……

——亥姆霍兹<sup>①</sup>

## 1 功、热和内能的改变

### 问题



在空气压缩引火仪底部放置少量的硝化棉，迅速压下筒中的活塞，可以观察到硝化棉燃烧的火苗。为什么筒底的硝化棉会被点燃呢？你能解释这个现象吗？



焦耳 (James Prescott Joule, 1818—1889)

19世纪30年代，人们逐渐认识到，为了使系统的热力学状态发生变化，既可以向它传热，也可以对它做功。从1840年开始，英国物理学家焦耳进行了多种多样的实验，以求精确测定外界对系统做功和传热对于系统状态的影响，以及功与热的相互关系。这项研究作为热力学第一定律和能量守恒定律的建立奠定了坚实的实验基础。

### 焦耳的实验

在焦耳研究功与热等效性的许多实验中，有两个最具代表性。一个是让重物下落带动叶片搅拌容器中的水，引起水温上升；另一个是通过电流的热效应给水加热。

**实验1** 如图3.1-1，用绝热性能良好的材料制作容器，容器中安装着叶片组成的搅拌器。重物下落时带动叶片转动，搅拌容器中的水，水由于摩擦而温度上升。

<sup>①</sup> 亥姆霍兹 (Hermann von Helmholtz, 1821—1894)，德国物理学家、生理学家。对生理学、光学、电磁学、数学等方面多有贡献，是能量守恒和转化学说的创建者之一。

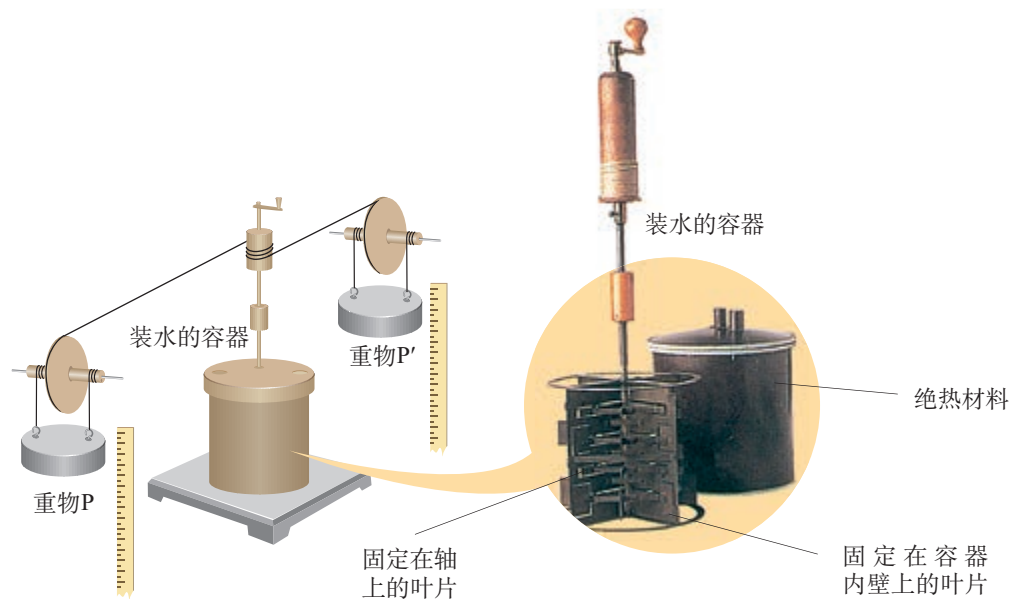


图 3.1-1 焦耳的实验装置

在这个过程中，系统不从外界吸热，也不向外界放热，这样的过程叫作**绝热过程**（adiabatic process）。

焦耳的多次实验测量表明，尽管各次悬挂重物的质量不同，下落的高度也不一样，但只要重力所做的功相同，容器内水温上升的数值都是相同的，即系统状态的变化是相同的。

**实验2** 如图3.1-2，让正在下降的重物带动发电机发电，电流通过浸在液体中的电阻丝，由电流的热效应给液体加热，使液体温度上升。

多次实验结果表明，对于同一个系统，如果过程是绝热的，那么不管通过电阻丝的电流或大或小、通电时间或长或短，只要所做的电功相等，则系统温度上升的数值是相同的，即系统的状态就发生了同样的变化。

焦耳的这些实验表明，在各种不同的绝热过程中，如果使系统从状态1变为状态2，所需外界做功的数量是相同的。也就是说，要使系统状态通过绝热过程发生变化，做功的数量只由过程始末两个状态1、2决定，而与做功的方式无关。那么，必定存在一个描述系统状态的物理量，这个物理量的变化与做功相关。例如，在力学中，重力做的功仅由物体的起点和终点两个位置决定，而与物体的运动路径无关。根据这一事实人们认识到，物体具有重力势能。物体在两个位置间的重力势能之差等于物体在这

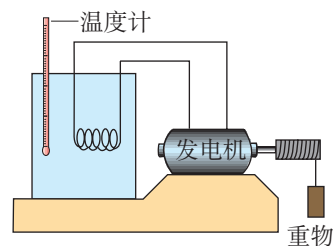


图 3.1-2 与焦耳实验原理相同的实验装置示意图

► 在第一章中，曾把系统中所有分子热运动的动能和分子间的相互作用势能的总和叫作系统的内能。这和此处的内能是一致的。这为内能提供了微观解释。

两个位置间移动时重力所做的功。

与此类似，在热力学系统的绝热过程中，外界对系统做的功仅由过程的始末两个状态决定，不依赖于做功的具体过程和方式。这就使我们认识到，任何一个热力学系统必定存在一个只依赖于系统自身状态的物理量，这个物理量在两个状态间的差别与外界在绝热过程中对系统做的功相联系。鉴于功是能量变化的量度，所以这个物理量必定是系统的一种能量，我们把它称为系统的内能。

## 功与内能的改变

在热力学系统的绝热过程中，当系统从状态1 经过绝热过程达到状态2 时（图3.1-3），内能的变化量

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

它就等于外界对系统所做的功  $W$ ，即

$$\Delta U = W$$

可见，在绝热过程中，外界对系统做功，系统的内能增加；系统对外做功，系统的内能减少。

一般来说，如果一个热学过程的状态变化发生得极快、经历时间很短，系统与外界交换的热量就很少，即系统与外界来不及交换热量，这样的过程若不计传递的热，可以看成绝热过程。本节“问题”栏目中的实验就是这样的过程：迅速压下活塞，引火仪筒内气体被压缩，体积变小，外界对气体做了功，内能增加，温度升高。当温度达到易燃物的燃点时，易燃物发生自燃。

下面让我们再通过一个实验，认识功与内能的变化之间的关系。

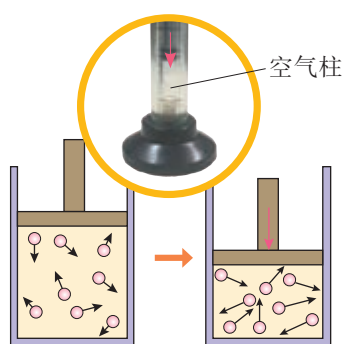


图 3.1-3 绝热压缩

### 做一做

取一个透明塑料瓶，向瓶内注入少量的水。将橡胶塞打孔，安装上气门嘴，再用橡胶塞把瓶口塞紧，并向瓶内打气，观察橡胶塞跳出时瓶内的变化（图 3.1-4）。



图 3.1-4 观察橡胶塞跳出时瓶内的变化

当橡胶塞跳出时，瓶内出现白雾。以瓶内气体为研究对象，橡胶塞跳出后，瓶内的气体迅速膨胀，系统对外做功，因此，气体的内能迅速减少，瓶内气体温度迅速下降，瓶内水蒸气液化，就会出现大量的雾状小水滴。

## 热与内能的改变

两个温度不同的物体A、B相互接触时，温度高的物体A要降温，温度低的物体B要升温，我们说，热从高温物体A传到了低温物体B。

外界对系统做功可以改变系统的热力学状态，而单纯地对系统传热也能改变系统的热力学状态。所以，热量是在单纯的传热过程中系统内能变化的量度。当系统从状态1经过单纯的传热达到状态2时，内能的变化量

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

它就等于外界向系统传递的热量Q，即

$$\Delta U = Q$$

虽然做功和传热都能引起系统内能的改变，但是它们还是有区别的。做功时，内能与其他形式的能（如内能与机械能、内能与电能等）发生转化，而传热只是不同物体（或一个物体的不同部分）之间内能的转移。

► 像做功一样，热量的概念只有在涉及能量的转移时才有意义。我们不能说物体具有多少热量，只能说某一过程中物体吸收或放出了多少热量。



### 练习与应用

1. 在图3.1-1和图3.1-2所示焦耳的两个实验中，各是什么形式的能转化为系统的内能？

2. 下列事件中，物体的内能怎样改变？（固体和液体的热膨胀很小，可不予考虑）

（1）壶里的水被加热而温度升高。

（2）一条烧红的铁棒逐渐冷却下来。

3. 气体在绝热膨胀时它的温度会怎样变化？气体在绝热压缩时它的温度会怎样变化？

为什么会发生这样的变化？

请分别举一个绝热膨胀和绝热压缩时温度变化的实例。

4. 铅弹以200 m/s的速度射入木块后停在木块中，木块没有移动。若增加的内能的80%使铅弹的温度升高，铅弹的温度升高了多少？铅的比热容c为 $1.3 \times 10^2 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$ 。

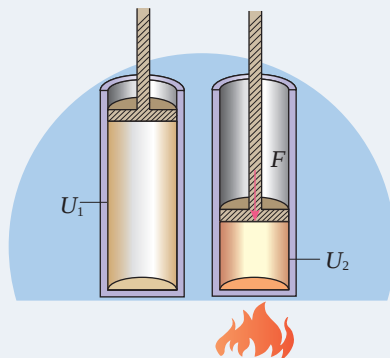
## 2

## 热力学第一定律

问题



汽缸内有一定质量的气体，压缩气体的同时给汽缸加热。那么，气体内能的变化会比单一方式（做功或传热）更明显。这是为什么呢？



## 热力学第一定律

► 在焦耳之前，人们还没有认识到做功与热传递在改变系统内能方面是等价的。焦耳做实验的本意是要探究两者的关系。

焦耳的实验一方面表明，以不同的方式对系统做功时，只要系统始末两个状态是确定的，做功的数量就是确定的；另一方面也向我们表明，为了改变系统的状态，做功和传热这两种方法是等价的。也就是说，一定数量的功与确定数量的热相对应。

我们在上节课已经知道，单纯地对系统做功（热力学系统的绝热过程），内能的变化量与功的关系是

$$\Delta U = W$$

单纯地对系统传热，则内能的变化量与传递热量的关系是

$$\Delta U = Q$$

既然做功与传递热量对改变系统的内能是等价的，那么，当外界既对系统做功又对系统传热时，内能的变化量就应该是

$$\Delta U = Q + W$$

也就是说，**一个热力学系统的内能增量等于外界向它传递的热量与外界对它所做的功的和**。这个关系叫作**热力学第一定律**（first law of thermodynamics）。

可见，“问题”栏目中的汽缸内气体内能的变化量等于活塞对气体所做的功与通过加热向汽缸内气体传递的热量之和。

## 思考与讨论

一定质量的气体，膨胀过程中是外界对气体做功还是气体对外界做功？如果膨胀时气体对外做的功是 135 J，同时向外放热 85 J，气体内能的变化量是多少？内能是增加了还是减少了？请你通过这个例子总结功和热量取正、负值的物理意义。

## 热力学第一定律的应用

在运用热力学第一定律解决问题时，需要首先确定研究对象。对于公式  $\Delta U = Q + W$ ，我们可以这样理解：外界对系统做功有助于系统内能的增加，因此，外界对系统做功时， $W$  取正值；而系统对外界做功时， $W$  取负值。同理，外界对系统传递热量有助于系统内能的增加，因此，外界对系统传递的热量  $Q$  取正值；而系统向外界传递的热量  $Q$  就取负值。

### 【例题】

如图 3.2-1，一台四冲程内燃机，活塞在压缩冲程某段时间内移动的距离为 0.1 m，这段过程活塞对气体的压力逐渐增大，其做的功相当于  $2 \times 10^3$  N 的恒力使活塞移动相同距离所做的功（图 3.2-2 甲）。内燃机工作时汽缸温度高于环境温度，该过程中压缩气体传递给汽缸的热量为 25 J。

(1) 求上述压缩过程中气体内能的变化量。

(2) 燃烧后的高压气体对活塞做功，气体推动活塞移动 0.1 m，其做的功相当于  $9 \times 10^3$  N 的恒力使活塞移动相同距离所做的功（图 3.2-2 乙），该做功过程气体传递

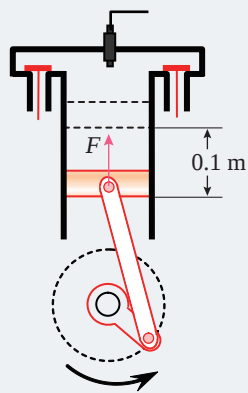


图 3.2-1

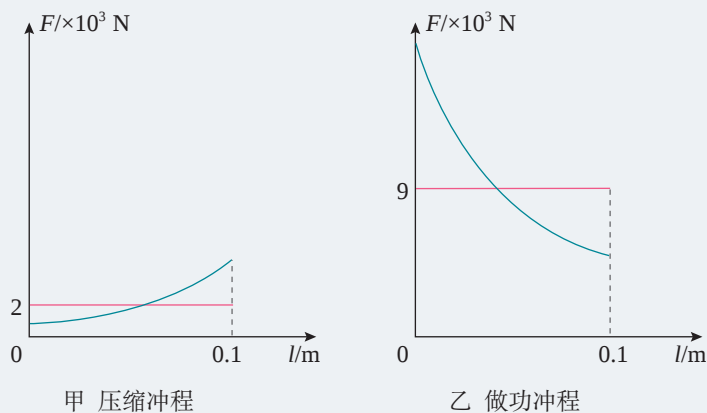


图 3.2-2

给汽缸的热量为 30 J，求此做功过程气体内能的变化量。

**分析** 根据热力学第一定律，在第（1）问中，活塞压缩气体的过程是外界对系统做功，活塞对气体所做的功  $W_1$  为正值；在第（2）问中，气体膨胀推动活塞的过程是系统对外界做功，气体对外界所做的功  $W_2$  为负值。在两种情况下，气体都把热量传递给了汽缸，都属于放热，因此  $Q_1$ 、 $Q_2$  均为负值。

**解** （1）压缩过程活塞对气体做的功

$$W_1 = F_1 l_1 = 2 \times 10^3 \times 0.1 \text{ J} = 200 \text{ J}$$

气体内能的变化量

$$\Delta U_1 = W_1 + Q_1 = 200 \text{ J} - 25 \text{ J} = 175 \text{ J}$$

（2）气体膨胀过程中气体对外界所做的功

$$W_2 = F_2 l_2 = -9 \times 10^3 \times 0.1 \text{ J} = -900 \text{ J}$$

气体内能的变化量

$$\Delta U_2 = W_2 + Q_2 = -900 \text{ J} - 30 \text{ J} = -930 \text{ J}$$

汽缸内气体在压缩过程中内能增加了 175 J，在膨胀做功过程中气体内能减少了 930 J。



## 探索热的本质

**热质说和热动说** 对于“热是什么”，历史上有两种不同的观点。一种是热的物质说（热质说），另一种是热的运动说（热动说）。

培根、玻意耳、笛卡儿、胡克、牛顿、伯努利、罗蒙诺索夫等人根据摩擦生热等现象，认为热是粒子运动的表现，物体由于粒子的剧烈运动而发热。但在他们的时代，这种观点缺乏足够的实验证据。

与此对立的另一种看法是热质说。热质说认为，热是一种流质，名为热质，可以渗入一切物体，不生不灭，没有质量。一个物体是冷还是热，取决于其中所含热质的多少。热质说可以解释当时观察到的大部分热学现象：物体温度的变化是因为吸收、放出了热质，传热是热质的流动与传播，热膨胀是由于热质粒子之间的排斥，等等。

但是，热质说无法解释伦福德的炮筒镗孔实验。

**伦福德的实验** 英国科学家本杰明·汤普森（又名伦福德）在德国慕尼黑的兵工厂为炮筒镗孔（图 3.2-3）时，发现钻头与钢铁的摩擦能产生大量的热。按照热质说，钻头越锋利，铁屑切得越小，它们能保存住的热质就越少，释放的热质就越多，用来冷却的水沸腾得也就越快。然

而，伦福德注意到，在钻头已经变钝时照旧要产生大量的热。不但如此，他发现在钻孔加工中热量似乎是取之不尽的。

伦福德进行了反复的观察和实验，终于在1798年公布了他的研究成果。他明确指出：在这些实验中被激发出来的热，除了把它看作“运动”之外，似乎很难看作其他任何东西。

然而，事情并不简单。伦福德的实验无法进行定量测量，因此他的实验的说服力大打折扣。到了19世纪40年代，英国物理学家焦耳以定量的实验为热动说的胜利画上了句号。

与伦福德同时代的英国化学家戴维，也通过实验否定了热质说。

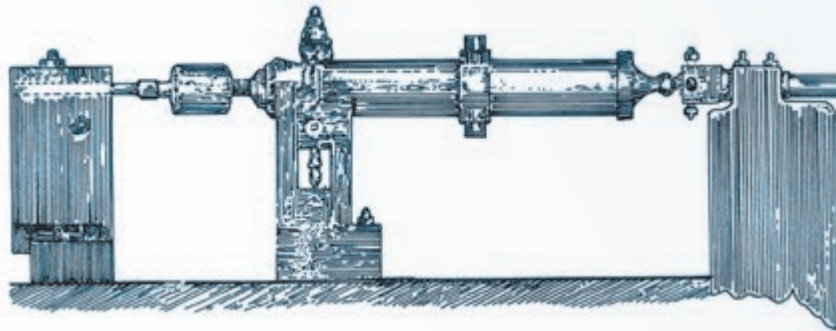


图 3.2-3 伦福德的炮筒镗孔实验

 练习与应用

1. 用活塞压缩汽缸里的空气，对空气做了900 J的功，同时汽缸向外散热210 J，汽缸里空气的内能改变了多少？

2. 如图3.2-4，在汽缸内活塞左边封闭着一定量的空气，压强与大气压相同。把汽缸和活塞固定，使汽缸内空气升高一定的温度，空气吸收的热量为 $Q_1$ 。如果让活塞可以自由滑动（活塞与汽缸间无摩擦、不漏气），也使汽缸内空气温度升高相同温度，其吸收的热量为 $Q_2$ 。

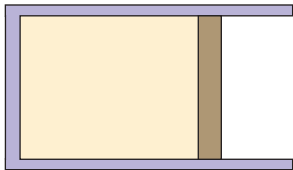


图 3.2-4

(1)  $Q_1$  和  $Q_2$  哪个大些？

(2) 气体在定容下的比热容与在定压下的比热容为什么会有不同？

3. 某风景区有一处约20层楼高的瀑布，甚为壮观。请估计：瀑布上、下水潭的水温因瀑布的机械能转化成内能而相差多少？水的比热容 $c$ 为 $4.2 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$ 。

4. 奶牛的心脏停止跳动后，大约在1 h内体温由 $37.0^\circ\text{C}$ 降低到 $33.5^\circ\text{C}$ 。请你由此估算，在这种环境下饲养奶牛，要维持一个体重400 kg奶牛的内能不变，每天喂养奶牛的食物至少要能为它提供多少热量？计算时，可以认为奶牛体内绝大部分是水。水的比热容 $c$ 为 $4.2 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$ 。

### 3 能量守恒定律

#### 问题 ?

让“饮水小鸭”“喝”完一口水后，直立起来。直立一会儿，又会慢慢俯下身去，再“喝”一口，然后又会直立起来。如此循环往复……

这种“饮水小鸭”玩具是一架永动机吗？



#### 探索能量守恒的足迹

**人类对能量的认识** 能量的概念是人类在对物质运动规律进行长期探索中建立起来的。所有自然现象都涉及能量，人类的任何活动都离不开能量。能量具有不同的形式，有描述热运动的内能、描述机械运动的机械能、描述光辐射的光能，等等。不同形式的运动都可以用能量来描述。也就是说，我们可以用能量的观念把热、电、光、磁等都统一起来描述。但是，在科学史上人们真正以“能量”的观念来探索各种运动形式本质的过程却是非常曲折的。

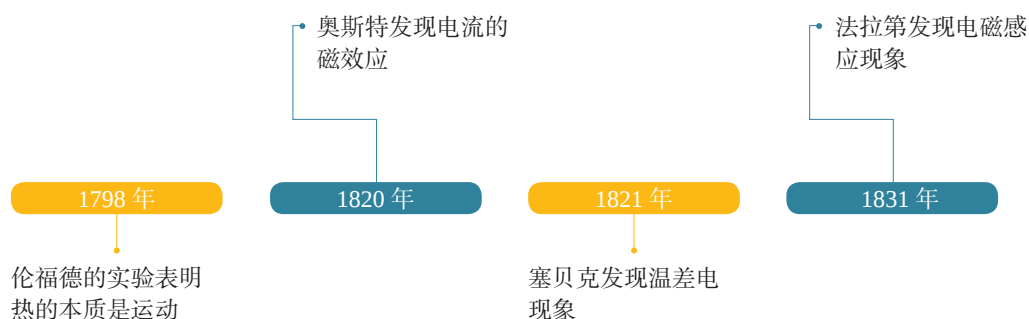


表 科学家们一直关注自然现象之间的普遍联系

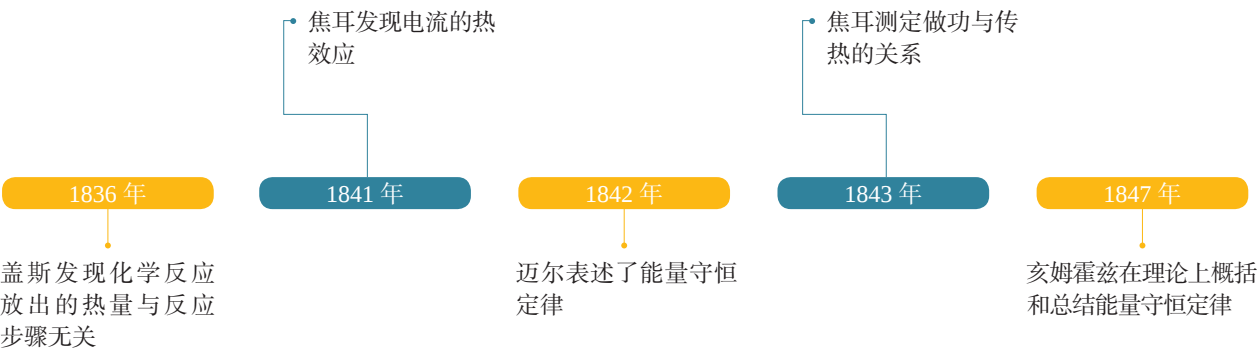
在认识自然的进程中，科学家慢慢知道了要用联系的观点去观察自然。例如，机械能的各种形式之间可以相互转化，电和磁可以相互转化，热和电也可以相互转化……下表列出了自18世纪末至19世纪中叶来自不同国家和地区、不同领域的十几位科学家，以不同的方式，完成了关于能量转化的研究成果。

**能量守恒观念的形成** 由于能量既抽象又以各种不同的形式广泛存在，所以能量守恒思想的萌芽及产生并不是一蹴而就的。从各种实验的验证，再到实验结果的被质疑，科学家们付出了大量的努力。应该说，人类对能量的认识过程，体现了科学前辈们对“守恒”这一科学思想的追寻。从18世纪末到19世纪中叶，不同领域的科学家从不同角度都提出过能量守恒的思想。人类对能量守恒的认识经历了一个由浅入深、由含糊到清晰的过程。

俄国化学家盖斯的研究发现，任何一个化学反应，不论是一步完成，还是分几步完成，放出的总热量相同。这表明一个系统（即参加化学反应的几种物质）存在着一个与热量相关的物理量，在一个确定的化学反应中这个量是不变的。

焦耳的实验精确地测量了做功与传热之间的等价关系，从而为能量守恒定律奠定了牢固的实验基础，也为能量守恒的定量描述迈出了重要的一步。

德国医生迈尔通过比对不同地区人血颜色的差异，认识到食物中化学能与内能的等效性，即生物体内能量的输入和输出是平衡的。另外，他还通过海水在暴风雨中较热的现象，猜想热与机械运动的等效性。他在1841年和1842



年连续写出“论‘自然力’（指能量）守恒”的论文，并推算了多少热与多少功相当。因此，迈尔是公认的第一个提出能量守恒思想的人。

德国科学家亥姆霍兹在不了解迈尔和焦耳研究的情况下，从永动机不可能制成这一事实出发，考察了自然界不同的“力”（指能量）之间的相互关系，提出了“张力”（即势能）与“活力”（即动能）的转化。他还分析了在电磁现象和生物机体中能量的守恒问题。

半个多世纪人类对能量以及能量守恒研究的历史，预示着人们把各分立的领域连成一体的时刻已经到来，也就是到了建立能量转化与守恒定律的时候了。

## 能量守恒定律

在力学中，当系统只有重力和弹力做功时，系统的动能与势能会发生相互转化，而动能与势能的总量保持不变，这就是机械能守恒定律。

在热力学领域内，做功和热传递可以改变系统的内能，即系统内能与系统外的能量会发生转化或转移，但能的总量不会改变。热力学第一定律，实际上就是内能与其他能量发生转化时的能量守恒定律。

**能量守恒定律**可以表述为：**能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，它只能从一种形式转化为其他形式，或者从一个物体转移到别的物体，在转化或转移的过程中，能量的总量保持不变。**

能量守恒是自然界的普遍规律。根据能量守恒定律，物理学发现和解释了很多科学现象。

但是在能量守恒定律发现之后，曾有人怀疑某种过程“能量不守恒”。但是，进一步研究又发现，原来是漏掉了人类尚不认识的一种能量。如果把这种能量计算在内，总能量依然守恒。在20世纪30年代初，奥地利物理学家泡利根据能量守恒定律预言了中微子。<sup>①</sup>这个预言后来得到了证实。能量守恒定律经受住了新的检验。

能量守恒定律的发现是科学史上的重大事件。恩格斯把它与细胞学说、生物进化论一起列为19世纪的三大发

► 能量守恒的观点也在不断地发展，相对论建立以后，基本粒子的研究使我们认识到，能量其实是与质量相关联的一个物理量。

<sup>①</sup> 中微子是静止质量几乎为0的中性粒子。

现。它是自然科学长期发展和进步的结果，是普遍、和谐、可靠的自然规律之一。

### 永动机不可能制成

“问题”栏目中的饮水小鸭不是永动机。小鸭的头和身由两个玻璃球构成，并通过细玻璃管相连。下球盛有一些乙醚，上球连同尖嘴被吸水毛毡包起来。那么，它是靠什么来维持工作的呢？原来小鸭头部的毛毡“饮水”后，水蒸发吸热，导致头部温度降低。上段玻璃管中的乙醚蒸气被液化，压强减小，液柱上升（图 3.3-1 甲），小鸭重心上移，直到小鸭倾倒。处于倾倒位置的小鸭，头部再次被浸湿，上下玻璃球内的气体相通，压强相等，乙醚流回下玻璃球内（图 3.3-1 乙），重心下移，小鸭站立。如此循环往复。可见，正是因为小鸭头部“饮水”后水不断蒸发，吸收了察觉不到的空气的热量，才使小鸭能够持续工作下去。

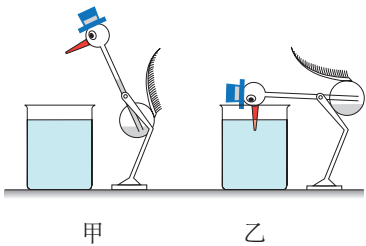


图 3.3-1 小鸭饮水示意图

### 思考与讨论

17～18 世纪，许多人致力于制造一种机器，它不需要任何动力或燃料，却能不断地对外做功，史称“第一类永动机”。图 3.3-2 展示了其中的一种设计。然而，为此目的的任何尝试都失败了。这是为什么呢？

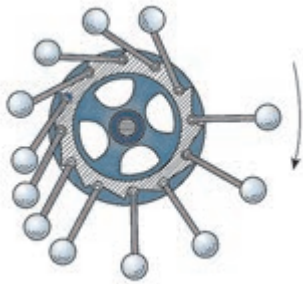


图 3.3-2 历史上一种永动机的设计

任何动力机械的作用都是把其他形式的能转化为机械能。内燃机把燃料的化学能转化为燃气的内能然后再转化为机械能，电动机把电能转化为机械能……如果没有燃料、电流或其他动力的输入，能量从哪里来呢！永动机的思想违背了能量守恒定律，所以是不可能制成的。

应该指出的是，制造永动机的千万次失败使人们的头脑冷静下来，开始在更深层次寻找失败的原因。1775 年法国科学院宣布“不再审查有关永动机的一切设计”。这使得人们走出迷梦，去研究各种能量形式相互转化的规律，促成了能量守恒定律的建立。曾任中国物理学会理事长的冯

端教授指出：除了要为焦耳、亥姆霍兹和迈尔这些作出杰出贡献的科学家树碑立传外，还应建立一个无名英雄纪念碑，其上最合适的铭文将是“纪念为实现永动机奋斗而失败的人们”。这是因为人类在探索自然规律的过程中必然有各种假设，虽然后来发现某些假设是错误的，但正是前人的失败才使后人的思考走上了正确的道路。



## 练习与应用

1. 下面的设想符合能量守恒定律吗？请简述理由。

(1) 利用永久磁铁间的作用力，造一台永远转动的机械。

(2) 造一条没有动力系统的船在水面上行驶。

(3) 通过太阳照射飞机，使飞机不带燃料也能飞行。

2. 有一瓶盛 500 mL 的饮料罐，其标签上注有“180 kJ/100 mL”的能量参考值。请你估算

这瓶饮料的能量相当于一个成年人爬多少层楼所做的功。

3. 为测算太阳射到地面的辐射能，某校科技实验小组的同学把一个横截面积是  $300 \text{ cm}^2$  的矮圆筒的内壁涂黑，外壁用保温材料包裹，内装水 0.6 kg。让阳光垂直圆筒口照射 2 min 后，水的温度升高了  $1^\circ\text{C}$ 。请由此估算在阳光直射时地面上每平方米每分钟接收的太阳能量。水的比热容  $c$  为  $4.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

## 4 热力学第二定律

### 问题 ?

一滴红色颜料滴进一杯清水中扩散，整杯水将均匀地变红。从系统的角度来看，扩散之前是一种状态，扩散后是另一种状态。那么，水中扩散后的颜料能否自发地重新聚集在一起，而其余部分又变成清水？



### 热力学第二定律

能量守恒定律告诉我们，在自然界发生的一切过程中能量都是守恒的，一个导致能量创生或能量消失的过程是不可能出现的。然而，并不是所有符合能量守恒定律的宏观过程都能自发地进行。

无数事实告诉我们，凡是实际的过程，只要涉及热现象，如物体间的热传递、气体的膨胀、扩散、有摩擦的机械运动……都有特定的方向性。这些过程可以自发地朝某个方向进行，例如，热由高温物体传向低温物体，而相反的过程，即使不违背能量守恒定律，我们也从未见到它们会自发地进行。这就是说，一切与热现象有关的宏观自然过程都是不可逆的。

在物理学中，反映宏观自然过程的方向性的定律就是**热力学第二定律**（second law of thermodynamics）。

**热力学第二定律的克劳修斯表述** 德国物理学家克劳修斯在1850年提出：**热量不能自发地从低温物体传到高温物体**。这是热力学第二定律的克劳修斯表述。

这里阐述的是热传递的方向性。在这个表述中，“自发”二字指的是：当两个物体接触时，不需要任何第三者的介入、不会对任何第三者产生任何影响，热量就能从一个物体传向另一个物体。当两个温度不同的物体接触时，这个“自发”的方向是从高温物体指向低温物体的。

► 热力学第二定律是用否定语句表述的（绝大多数物理定律都是用肯定语句表述的），它告诉我们什么样的过程不可能发生。

## 思考与讨论

电冰箱通电后箱内温度低于箱外温度，并且还会继续降温，直至达到设定的温度。显然这是热量从低温物体传递到了高温物体。这一现象是否违背热力学第二定律呢？

在电冰箱的实例中，热量的确从低温物体——冰箱内的食品，传到了高温物体——冰箱外的空气。但是这不是自发的过程，这个过程必须有第三者的介入：必须开动冰箱的压缩机。如果不供电，冰箱的压缩机会停止工作，自发的过程则是热量从冰箱外的高温空气传向冰箱内的低温食品（图 3.4-1）。

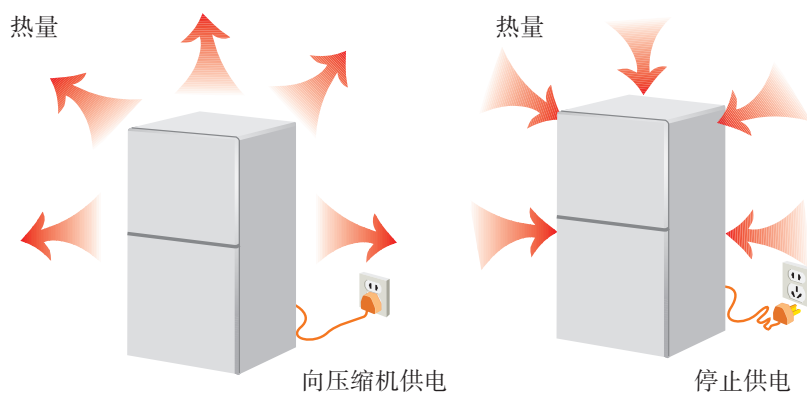


图 3.4-1 电冰箱实例

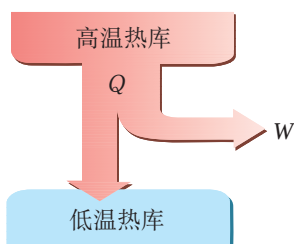


图 3.4-2 热机工作时的能流分配

**热力学第二定律的开尔文表述** 从能量的角度看，热机的工作分为两个阶段：第一个阶段是燃烧燃料，把燃料中的化学能变成工作物质的内能；第二个阶段是工作物质对外做功，把自己的内能变成机械能。

热机工作时从高温热库吸收的热量  $Q$ ，只有一部分用来做功  $W$ ，转变为机械能，另一部分热量要排放给低温热库（冷凝器或大气）（图 3.4-2）。也就是说，热机在工作过程中必然排出部分热量，热机用于做功的热量一定小于它从高温热库吸收的热量，即

$$W < Q$$

热机工作时通常会产生漏气热损、散热热损和摩擦热损等热量损失（图 3.4-3）。如果没有漏气和摩擦，也没有机体热量的损失，燃料产生的热量也不可能完全转化成机械能，工质吸收的热量不会全部变成功，例如，汽车排出气体的温度一定会比空气的温度高，它会向空气散热。

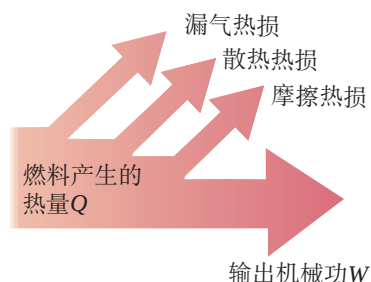


图 3.4-3 热机能流图

开尔文<sup>①</sup>在分析了热机及其他涉及做功的热学过程后，于 1851 年提出了热力学第二定律的另一种表述：**不可能从单一热库吸收热量，使之完全变成功，而不产生其他影响。**

这里所说“不可能从单一热库吸收热量”，意思是：不仅要从一个热库吸热，而且一定会向另一个热库放热。

热力学第二定律的开尔文表述阐述了机械能与内能转化的方向性：机械能可以全部转化为内能，而内能无法全部用来做功以转换成机械能。例如，两个相互接触并做相对运动的物体，由于摩擦而静止下来，它们在这个过程中消耗的机械能可以全部转化为内能；但相反的过程不可能自发进行而不产生其他影响。



### 思考与讨论

在水平地面上滚动的足球，摩擦力做负功，其动能转化为内能，最终停了下来，同时产生的热量散失在周围的环境中。会不会有这样的现象：静止在水平地面上的足球和地面、周围的空气自发地降低温度释放内能，并将释放出的内能全部转化为足球的动能，让足球又滚动起来？

上述现象是不可能发生的。问题的实质仍然是：机械能可以全部转化成内能，但这个过程是不可逆的。

可以证明，热力学第二定律的克劳修斯表述和开尔文表述是等价的。

## 能源是有限的

自然界的一切变化，人类社会的所有活动，都伴随着能量的转移和转化，能量是一切物质运动的源泉，是一切生命活动的基础。

能量在数量上虽然守恒，但其转移和转化却具有方向性。在取暖照明、耕田犁地、车钻磨锻、开车驾船……各种各样的活动中，机械能、电能、光能、声能、化学能、核能、生物能……最终都转化成内能，流散到周围的环境中。

<sup>①</sup> 威廉·汤姆孙即开尔文。因为他在科学上的成就和对大西洋电缆工程的贡献，英女王授予他开尔文勋爵衔，后世常称他为开尔文。

每天我们使用的能源最后都转化成了内能，能源消耗使得周围环境升温。根据热力学第二定律，分散在环境中的内能不管数量多么巨大，它也只不过能使地球、大气稍稍变暖一点，却再也不能自动聚集起来驱动机器做功了。这样的转化过程叫作“能量耗散”。

周围环境中的内能很难再利用，而机械能、光能、化学能、电能相对于周围环境中的内能来说，可利用的品质要高。所谓能源，其实是指具有高品质的容易利用的储能物质，例如石油、天然气、煤等。能源的使用过程中虽然能的总量保持守恒，但能量的品质下降了。虽然能量总量不会减少，但能源会逐步减少，因此能源是有限的资源。



### 拓展学习

#### 熵与熵增加原理

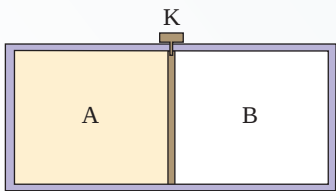


图 3.4-4 抽取隔板后气体会怎么样

自然界的很多过程是不可逆的。

例如，一个容器被隔板均分为A、B两部分，一定量的气体处于容器A中，而B为真空（图3.4-4）。抽取隔板K，A中的气体会扩散到B中，最后整个容器的A、B两部分都均匀地分布了这种气体。这个过程显然是不可逆的。

这种不可逆的现象可以从微观角度来解释。设想开始时有4个气体分子分布在A中。如果没有隔板，对于这4个分子中的每一个都有两种可能性，即它处在A中，或处在B中。4个分子共有 $2^4 = 16$ 种可能的分布，如图3.4-5所示。

这16种分布中的每一种是一种微观态。在自由膨胀前，只有一个微观态，即4个分子都在A中。自由膨胀后，16个微观态都可能实现。自由膨胀前的宏观态只包含第一个微观态，自由膨胀后的宏观态包含16个微观态。假定实现每一微观态的概率是相等的，则自由膨胀后回复到自由膨

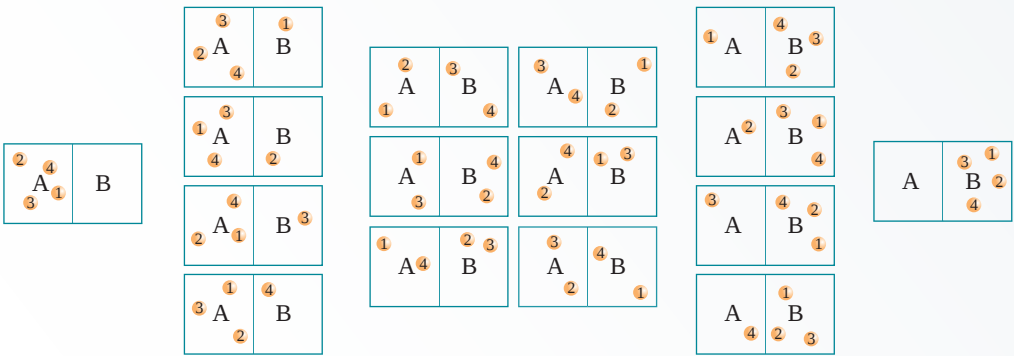


图 3.4-5 4个气体分子在A、B容器中的可能分布

胀前状态的概率为  $\frac{1}{16}$ 。

一般地说，如果A中气体数量为N个，则自由膨胀后的气体要回复到自由膨胀前的概率为  $\frac{1}{2^N}$ 。实际上，气体内的分子数很大，因此自由膨胀的气体要自发地回复到膨胀前的状态实际上是不可能的。

生活中我们常说到有序和无序这两个词。一副扑克牌，按黑桃、红桃、梅花、方块的顺序，而且从小到大排列，我们说它是有序的，洗牌之后有序变成了无序。当然也可以规定奇数牌在先，偶数牌在后，等等。只要确定了某种规则，符合这个规则的就是有序的。由许多张纸牌组成的系统，如果对个体的分布没有确定的要求，“怎样分布都可以”，我们就说这样的分布是无序的。有序与无序是相对的。

相对于膨胀后的状态，物理学中把气体膨胀前的状态叫作有序状态，而气体自由膨胀后的状态变得更混乱与无序，是无序状态。其实，把事情搞得乱糟糟的方式要比把事情做得整整齐齐的方式多得多。比如，要让操场上的一群学生按班级、身高，或按任何一种规则来站队都是比较麻烦的：组织者需要按规则来确定每个学生的位置，每个学生都要寻找自己的位置。但是，要让已经排好队的学生解散，那就非常简单，每个学生随便朝一个方向跑去，队形就乱了。从统计学的角度来解释，按一定规则排列的队形只有少数几种，而学生解散后的混乱状态有无数种。这样，混乱状态出现的概率要远大于整齐排列状态出现的概率。因此，一个系统总是自发地从有序状态向无序的混乱状态发展。

1850年，克劳修斯首次提出熵的概念，熵可用来表达一个系统的无序程度，系统从有序向无序的发展过程中熵在增加。在物理学中，不与外界进行物质和能量交换的系统叫作孤立系统。在自发过程中，系统总是自发地向无序方向发展，即一个孤立系统的熵值总是不减少的，这就是熵增加原理。

从微观的角度看，热力学第二定律是一个统计规律：一个孤立系统总是从熵小的状态向熵大的状态发展，而熵值较大代表着较为无序，所以自发的宏观过程总是向无序度更大的方向发展。

熵的概念现在已经应用于信息学、天体物理学、生命科学、社会学等领域，在不同的学科中也有引申出的更为具体的定义。

## 练习与应用

1. 汽车行驶时，要消耗汽油。尽量详尽地说明：汽油燃烧时释放的化学能通过哪些途径最终转化成了周围环境的内能。

2. 以下哪些现象能够发生、哪些不能发生？能够发生的现象是否违背热力学第二定律？

- (1) 一杯热茶自然放置，茶会自动变得更热。
- (2) 蒸汽机把蒸汽的内能全部转化成机械能。
- (3) 桶中混浊的泥水在静置一段时间后，

泥沙下沉，上面的水变清，泥、水自动分离。

(4) 电冰箱通电后把箱内低温物体的热量传到箱外高温物体。

3. 一间密闭的房间里放置了一台电冰箱，为了使房间降温，有人出了一个主意，建议把冰箱接通电源，打开冰箱门，让冰箱的“冷气”进入房间中，房间就变冷了。这种方法可行吗？请说明道理。

### A 组

1. 远古时代，取火是一件困难的事，火一般产生于雷击或磷的自燃。随着人类文明的进步，出现了“钻木取火”的方法。其中的物理原理是什么？

2. 冬天手冷的时候你有什么办法让手暖和起来？举出至少两种方法，并解释其中的物理原理。

3. 如图 3-1，一绝热容器被隔板 K 隔开成 A、B 两部分。已知 A 内有一定量的稀薄气体，B 内为真空。抽开隔板 K 后，A 内气体进入 B，最终达到平衡状态。分析此过程中气体内能的变化情况。

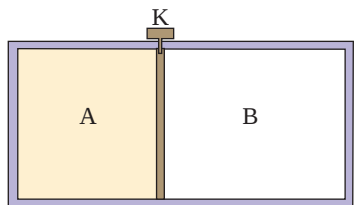


图 3-1

4. 一个气泡从恒温水槽的底部缓慢向上浮起，若不计气泡内空气分子个数和分子势能的变化，在上浮过程中气泡的内能如何变化，吸热还是放热？

5. 如图 3-2，固定汽缸内由活塞封闭一定质量的气体，开始时活塞处于静止状态，用电热丝对气体加热后活塞向左移动，移动过程中活塞与汽缸的摩擦忽略不计，且气体与外界环境没有热交换。试分析气体内能会如何变化。

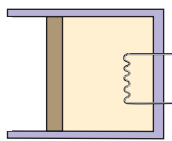


图 3-2

7. 小李想估测燃气灶烧水时的效率。他在开水壶里装了 2.5 L 的水，测得烧水前的水温是 15 °C，水烧开后便停止加热。烧水前后燃气表的示数如图 3-3 所示。为了得出燃气灶烧水的效率，他还要知道什么数据？请用字母表示相关数据，指出所用的单位，列出计算效率的表达式。



图 3-3

### B 组

1. 根据热力学定律，判断下列说法是否正确，若不正确请说明理由。

(1) 空调在制冷过程中，从室内吸收的热量少于向室外放出的热量。

(2) 海水降低温度可以放出大量的热量，科技的不断进步使得人类有可能通过降低海水的温度来发电，从而解决能源短缺的问题。

(3) 即使没有漏气、摩擦、不必要的散热等损失，热机也不可能把燃料产生的内能全部转化为机械能。

(4) 对能源的过度消耗使自然界的能量不断减少，形成“能源危机”。

2. 装着压缩气体的钢瓶，打开阀门后会听到“哧——”的一声，气体喷到外面。会不会

有这样的现象：外面的气体自发地进入钢瓶，使瓶内的压强变大？说出理由。

3. 如图 3-4，在竖直放置的圆柱形容器内用质量为  $m$  的活塞密封一部分气体，活塞能无摩擦地滑动，容器的横截面积为  $S$ ，将整个装置放在大气压恒为  $p_0$  的空气中，开始时气体的温度为  $T_0$ ，活塞与容器底的距离为  $h_0$ ，当气体从外界吸收热量  $Q$  后，活塞缓慢上升  $d$  后再次平衡。

(1) 外界空气的温度是多少？

(2) 在此过程中的密闭气体的内能增加了多少？

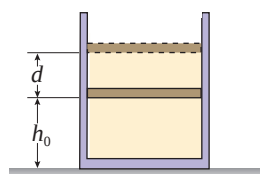


图 3-4

4. 如图 3-5，一定质量的理想气体从状态  $A$  变化到状态  $B$ ，已知在此过程中，气体吸收了  $300\text{ J}$  的热量，则该过程中气体内能变化了多少？

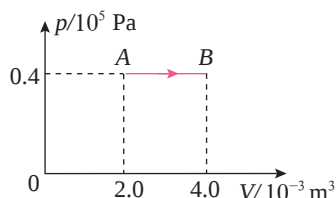


图 3-5

5. 如图 3-6，内壁光滑的汽缸竖直放置在水平桌面上，汽缸内封闭一定质量的气体。气体从状态  $A$ （活塞在  $A$  处）变为状态  $B$ （活塞在  $B$  处）时，气体吸收热量  $280\text{ J}$ ，并对外做功  $120\text{ J}$ 。

(1) 气体的内能改变了多少？是增加还是减少？

(2) 某人在上一问的基础上又接着提了后一个问题，说：“有人使气体从上一问的  $B$  状态再回到  $A$  状态，即回到原来  $A$  时的体积和温度，气体放出的热量是  $150\text{ J}$ ，那么返回过程中气体对外做的功又是多少？”请你对后一个问题进行评价。

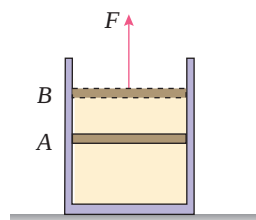


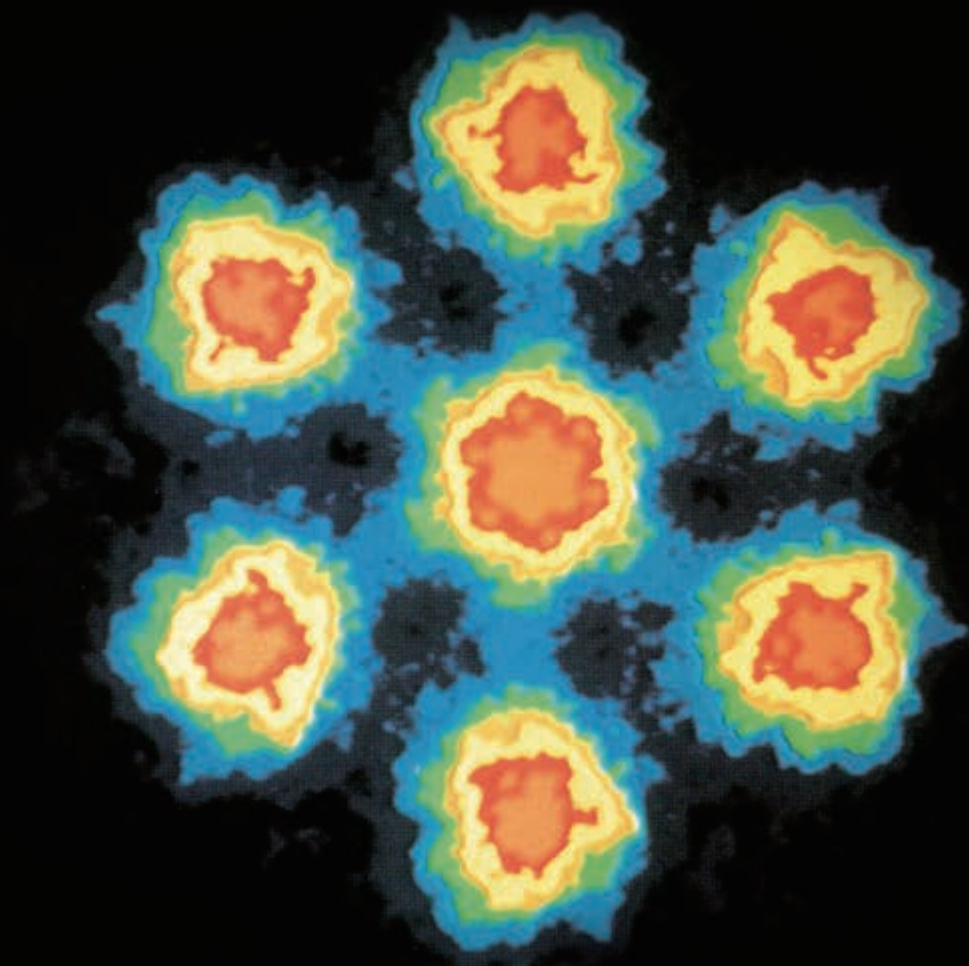
图 3-6

# 4

## 第四章

# 原子结构和波粒二象性

量子论的建立是 20 世纪物理学的最大成就之一。量子论解释了原子、分子等微观粒子遵循的规律，这些规律和牛顿力学等宏观、低速情况下的物理规律有很大不同。量子论不但深化和丰富了人类对自然界的认识，而且催生了一大批新技术，深刻地改变了人们的生活方式和社会形态。图为人们利用量子理论研制的电子显微镜拍摄到的铀酰微晶照片，放大倍数约为 1 亿倍，这是光学显微镜所做不到的。



科学的历史不仅是一连串事实、规则和随之而来的数学描述，它也是一部概念的历史。当我们进入一个新的领域时，常常需要新的概念。

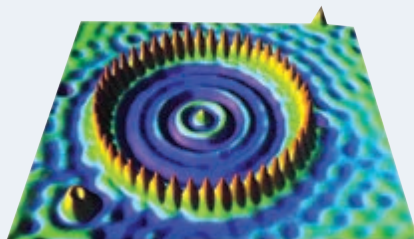
——普朗克

## 1 普朗克黑体辐射理论

### 问题



量子论使人们认识了微观世界的运动规律，并发展了一系列对原子、分子等微观粒子进行有效操控和测量的技术。图为利用扫描隧道显微镜将48个铁原子排成的“原子围栏”。那么，人们认识量子规律的第一步是怎样迈出的？



### 黑体与黑体辐射

通过物理必修课的学习我们知道，如果某种物体能够完全吸收入射的各种波长的电磁波而不发生反射，这种物体就是绝对黑体，简称**黑体**（**blackbody**）。如图4.1-1，在空腔壁上开一个很小的孔，射入小孔的电磁波在空腔内表面会发生多次反射和吸收，最终不能从空腔射出。这个带小孔的空腔就可以近似为一个绝对黑体。

黑体虽然不反射电磁波，却可以向外辐射电磁波，这样的辐射叫作**黑体辐射**（**blackbody radiation**）。

19世纪，由于冶金、星体测温等需求，人们对热辐射进行了大量的研究。当时物理学家已有能力对热辐射的强度随波长的分布进行比较准确的测量。研究表明，对于一般材料的物体，辐射电磁波的情况除了与温度有关，还与材料的种类及表面状况有关，而黑体辐射电磁波的强度按波长的分布只与黑体的温度有关。它可能反映了某种具有普遍意义的客观规律，人们因此对黑体辐射进行了深入的实验及理论研究。

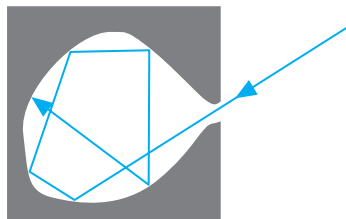


图 4.1-1 带小孔的空腔

## 黑体辐射的实验规律

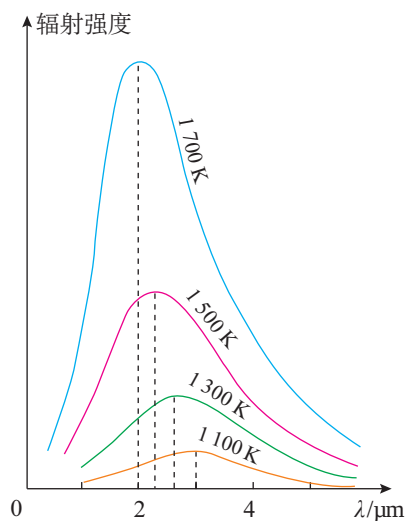


图 4.1-2 黑体辐射的实验规律

利用分光技术和热电偶等设备，可以测出黑体辐射电磁波的强度按波长分布的情况。图 4.1-2 画出了四种温度下黑体辐射的强度与波长的关系。从中可以看出，随着温度的升高，一方面，各种波长的辐射强度都有增加，另一方面，辐射强度的极大值向波长较短的方向移动。这些规律与日常经验是一致的。

物理学家总是力图用已有的知识去解释新发现的现象和规律。那么，怎样解释黑体辐射的实验规律呢？

我们知道，物体中存在着不停运动的带电微粒，按照当时物理学的认识，每个带电微粒的振动都产生变化的电磁场，从而产生电磁辐射。于是，人们很自然地要依据热学和电磁学的知识寻求黑体辐射的理论解释。

德国物理学家维恩在 1896 年、英国物理学家瑞利在 1900 年，分别提出了辐射强度按波长分布的理论公式。<sup>①</sup>他们提出的公式都只能解释一部分实验现象。维恩公式在短波区与实验非常接近，在长波区则与实验偏离较大；瑞利公式在长波区与实验基本一致，但在短波区与实验严重不符。

为了得出同全部实验相符的黑体辐射公式，德国物理学家普朗克做了多种尝试。1900 年 10 月，普朗克找到了一个数学公式，它与实验吻合得非常完美（图 4.1-3）。于是，普朗克尝试从电磁学、力学、统计物理学等物理学的基本理论出发，把这个公式推导出来。

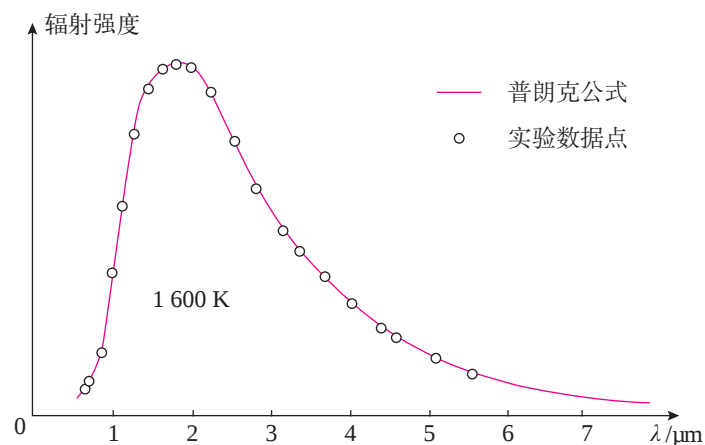


图 4.1-3 普朗克公式与实验结果的比较

<sup>①</sup> 瑞利公式曾被英国天体物理学家金斯修正过，所以这个公式又称瑞利—金斯公式。

## 能量子

普朗克最终在 1900 年底发现，如果想推导出这个公式，就必须假定：组成黑体的振动着的带电微粒的能量只能是某一最小能量值  $\varepsilon$  的整数倍。例如，可能是  $\varepsilon$  或  $2\varepsilon$ 、 $3\varepsilon$ ……他把这个不可再分的最小能量值  $\varepsilon$  叫作**能量子**，它的表达式为

$$\varepsilon = h\nu$$

这里的  $\nu$  是带电微粒的振动频率，也即带电微粒吸收或辐射电磁波的频率。 $h$  是一个常量，后人称之为普朗克常量，其值为

$$h = 6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

普朗克对微观带电微粒能量取值的假设和宏观世界中我们对能量的认识有很大不同。例如，一个弹簧振子，把小球推离平衡位置后开始振动，能量为  $E$ ，下一次我们可以把它推得稍远一些，使它振动的能量稍多一些，例如， $1.2E$  或  $1.3E$ ，也可以把它推得更远，能量更大。弹簧振子的能量不一定是某个最小值的整数倍。只要在弹性限度以内，我们可以把小球推到任何位置，它的能量可以是任何值。

由此可见，宏观弹簧振子的能量值是连续的。而普朗克的假设则认为微观粒子的能量是量子化的，或者说微观粒子的能量是分立的。这是微观与宏观世界物理规律最重要的差别之一。因此，普朗克 1900 年的假设第一次为人们揭开了微观世界物理规律面纱的一角。从此，物理学进入了一个新的纪元。普朗克本人因此获得了 1918 年的诺贝尔物理学奖。

► 微观世界中的物理系统，如原子、分子和离子等，其能量正如普朗克所假设的那样，只可能取某些特定的值。

## 科学漫步

### 普朗克

普朗克 1858 年生于德国基尔。他在慕尼黑大学学习时选择物理作为学习的专业。当时一位物理学教授对他说，物理学中重要的事情都已经被别人发现完了，因此这门学科没有广阔的前景。普朗克没有因此而打退堂鼓。他觉得，自己学习物理，主要是为了了解自然界的基本规律，并不奢望作出重要的新发现。后来，他曾讲道：“外部世界是某种独立于人的东西，是某种绝对的东西，

探索适用于这一绝对本体的定律，在我看来是一生最崇高的追求。”

普朗克先后师从亥姆霍兹、基尔霍夫等热学和辐射问题的名家。1879年，普朗克获得博士学位，博士论文题目是关于热力学第二定律的。之后，他先后在慕尼黑、基尔和柏林担任物理学副教授和教授等职务，并在基尔霍夫去世后继任他的职位。这个阶段，普朗克的主要研究方向也是热力学。在提出能量量子化理论之前，他大概发表了40篇论文。

普朗克在物理学方面最重要的成就，毫无疑问就是他在1900年创立的黑体辐射理论。在此之前，他已经在黑体辐射问题方面进行了6年左右的研究，并历经曲折。普朗克1900年的划时代突破，正是建立在他从大学时代开始多年的严格专业训练和辛勤研究的基础之上的。

普朗克曾努力把自己提出的能量子假说纳入已有的经典物理学的框架，但后来物理学的发展表明，能量量子化和经典物理并不相容，它是原子、分子等微观系统所遵循的独有的物理规律——量子规律的体现。普朗克的发现，正是人们在认识这一全新规律的道路上迈出的第一步。

由于普朗克巨大的成就，他从1920年左右开始成为德国科学界的领军人物之一。他在1930年当选威廉皇家学会主席，成了德国科学界的最高权威。后来，为抗议希特勒，他辞去了这个职务。二战后，为了纪念普朗克，威廉皇家学会改名为马克斯·普朗克学会。

回顾普朗克的一生，不难看出，正是他中学毕业时遵从自己的好奇心和兴趣而作出的专业选择，成就了他后来事业上的辉煌。1918年，在普朗克60岁生日的庆祝会上，爱因斯坦发表了题为《探索的动机》的著名演讲。他认为，科学工作者大体可以分为三类：第一类人从事科研是为了挑战自己的智力；第二类是出于纯粹的功利目的；而第三类则是为了探寻自然界的客观规律。第三类科学工作者“把世界体系及其构成作为感情生活的支点，以便由此找到他在个人经验的狭小范围内所不能找到的宁静和安定”。在爱因斯坦看来，虽然前两类人中包含很多成果卓著的科学家，但第三类才是科学家队伍中的中坚和灵魂，离开了他们，科学的殿堂就无法存在。爱因斯坦说，普朗克就属于这一类科学家，“这也就是我们之所以爱戴他的原因”。

## 练习与应用

1. 可见光波长的大致范围是400~760 nm。400 nm、760 nm电磁辐射的能量子 $\varepsilon$ 的值是多少？
2. 在一杯开水中放入一支温度计，可以看

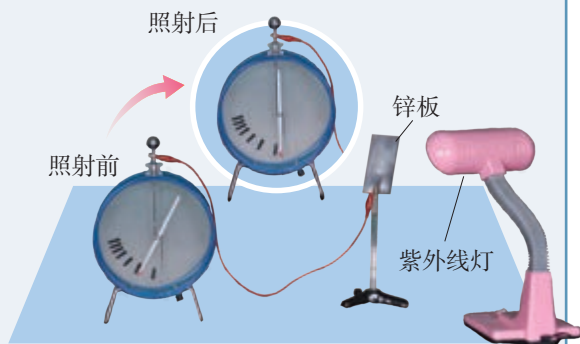
到开水的温度是逐渐降低的。根据能量量子化理论，开水的能量是一份一份向外辐射的，为什么它的温度不是一段一段地降低呢？

## 2 光电效应

### 问题 ?

把一块锌板连接在验电器上，并使锌板带负电，验电器指针张开。用紫外线灯照射锌板，观察验电器指针的变化。

这个现象说明了什么问题？



实验发现，若使锌板带负电，用紫外线灯照射后，验电器张开的指针夹角会变小，说明锌板带的负电荷变少了。这意味着，紫外线会让电子从锌板表面逸出。

照射到金属表面的光，能使金属中的电子从表面逸出。这个现象称为**光电效应**（**photoelectric effect**），这种电子常称为光电子。

### 光电效应的实验规律

1887年，赫兹在研究电磁波的实验中偶尔发现，接收电路的间隙如果受到光照，就更容易产生电火花。这就是最早发现的光电效应，也是赫兹细致观察的意外收获。

后来这一现象引起许多物理学家的关注。德国物理学家勒纳德、英国物理学家J. J. 汤姆孙等相继进行了实验研究，证实了这个现象。

下面我们用图4.2-1所示的电路研究光电效应中电子发射的情况与照射光的强弱、光的颜色（频率）等物理量之间的关系。

如图4.2-1，阴极K和阳极A是密封在真空玻璃管中的两个电极，阴极K在受到光照时能够发射光电子。阴极K与阳极A之间电压 $U$ 的大小可以调整，电源的正负极也可以对调。电源按图示极性连接时，闭合开关后，阳极A吸收阴极K发出的光电子，在电路中形成光电流。这导致电

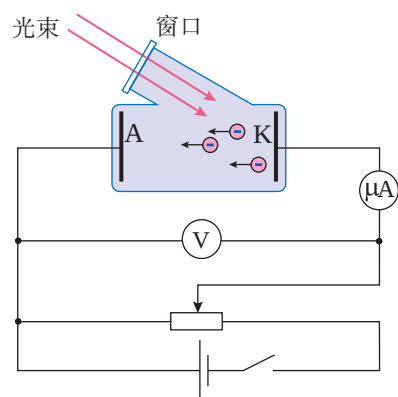


图 4.2-1 研究光电效应的电路图

压  $U$  为 0 时电流  $I$  并不为 0。

科学家通过实验发现了以下规律。

**存在截止频率** 当入射光的频率减小到某一数值  $\nu_c$  时，光电流消失，这表明已经没有光电子了。 $\nu_c$  称为**截止频率** (cutoff frequency) 或极限频率。这就是说，当入射光的频率低于截止频率时不发生光电效应。

实验表明，不同金属的截止频率不同。换句话说，截止频率与金属自身的性质有关。

**存在饱和电流** 在光照条件不变的情况下，随着所加电压的增大，光电流趋于一个饱和值。也就是说，在电流较小时电流随着电压的增大而增大；但当电流增大到一定值之后，即使电压再增大，电流也不会再进一步增大了 (图 4.2-2)。

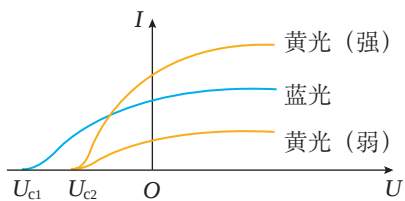


图 4.2-2 光电流与电压的关系

这说明，在一定的光照条件下，单位时间内阴极 K 发射的光电子的数目是一定的，电压增加到一定值时，所有光电子都被阳极 A 吸收，这时即使再增大电压，电流也不会增大。

实验表明，在光的频率不变的情况下，入射光越强，饱和电流越大。这说明，对于一定频率 (颜色) 的光，入射光越强，单位时间内发射的光电子数越多。

**存在截止电压** 如果施加反向电压，也就是阴极接电源正极、阳极接电源负极，在光电管两极间形成使电子减速的电场，电流有可能为 0。使光电流减小到 0 的反向电压  $U_c$  称为截止电压。

截止电压的存在意味着光电子具有一定的初速度，初速度的上限  $v_c$  应该满足以下关系

$$\frac{1}{2} m_e v_c^2 = eU_c$$

进一步的实验表明，同一种金属对于一定频率的光，无论光的强弱如何，截止电压都是一样的。光的频率  $\nu$  改变时，截止电压  $U_c$  也会改变 (图 4.2-2)。这意味着，对于同一种金属，光电子的能量只与入射光的频率有关，而与入射光的强弱无关。

**光电效应具有瞬时性** 当频率超过截止频率  $\nu_c$  时，无论入射光怎样微弱，照到金属时会立即产生光电流。精确测量表明产生电流的时间很快，即光电效应几乎是瞬时发生的。

思考与讨论

人们知道，金属中原子外层的电子会脱离原子而做无规则的热运动。但在温度不很高时，电子并不能大量逸出金属表面，这是为什么呢？

这表明金属表面层内存在一种力，阻碍电子的逃逸。电子要从金属中挣脱出来，必须获得一些能量，以克服这种阻碍。

要使电子脱离某种金属，需要外界对它做功，做功的最小值叫作这种金属的**逸出功**（work function），用 $W_0$ 表示。换句话说，电子要想从金属中脱离，至少要吸收 $W_0$ 的能量。如下表所示，不同种类的金属，其逸出功的大小也不相同。

表 几种金属的截止频率和逸出功

| 金属                           | 钨     | 钙    | 钠    | 钾    | 铷    |
|------------------------------|-------|------|------|------|------|
| $\nu_c / 10^{14} \text{ Hz}$ | 10.95 | 7.73 | 5.53 | 5.44 | 5.15 |
| $W_0 / \text{eV}$            | 4.54  | 3.20 | 2.29 | 2.25 | 2.13 |

当光照射金属表面时，电子会吸收光的能量。若电子吸收的能量超过逸出功，电子就能从金属表面逸出，这就是光电子。光越强，逸出的电子数越多，光电流也就越大。这些结论与实验相符。

但是，按照光的电磁理论，还应得出如下结论：

- 不管光的频率如何，只要光足够强，电子都可以获得足够能量从而逸出表面，不应存在截止频率；
- 光越强，光电子的初动能应该越大，所以截止电压 $U_c$ 应该与光的强弱有关；
- 如果光很弱，按经典电磁理论估算，电子需要几分钟到十几分钟的时间才能获得逸出表面所需的能量，这个时间远远大于实验中产生光电流的时间。

这些结论都与实验结果相矛盾。光电效应中的一些重要现象无法用经典电磁理论解释，这引发了物理学家们的认真思考。

## 爱因斯坦的光电效应理论

对于光电效应的解释，爱因斯坦是在普朗克量子假说的基础上作出的。在这个假说的启发下，爱因斯坦在1905年发表了题为《关于光的产生和转化的一个试探性观点》的文章。他表示，普朗克关于黑体辐射问题的崭新观点还不够彻底，仅仅认为振动着的带电微粒的能量不连续是不够的。为了解释光电效应，必须假定电磁波本身的能量也是不连续的，即认为光本身就是由一个个不可分割的能量子组成的，频率为 $\nu$ 的光的能量子为 $h\nu$ ，其中， $h$ 为普朗克常量。这些能量子后来称为**光子**。



图 4.2-3 纪念爱因斯坦光电效应理论的邮票

按照爱因斯坦的理论（图 4.2-3），当光子照到金属上时，它的能量可以被金属中的某个电子全部吸收，金属中的电子吸收一个光子获得的能量是  $h\nu$ ，在这些能量中，一部分大小为  $W_0$  的能量被电子用来脱离金属，剩下的是逸出后电子的初动能，即

$$h\nu = E_k + W_0$$

或

$$E_k = h\nu - W_0 \quad (1)$$

式中  $E_k$  为光电子的最大初动能

$$E_k = \frac{1}{2} m_e v_c^2$$

(1) 式称为**爱因斯坦光电效应方程**。

从下面的讨论可以看出，爱因斯坦光电效应方程可以很好地解释光电效应实验中的各种现象。

- 这个方程表明，只有当  $h\nu > W_0$  时，光电子才可以从金属中逸出， $\nu_c = \frac{W_0}{h}$  就是光电效应的截止频率（图 4.2-4）。

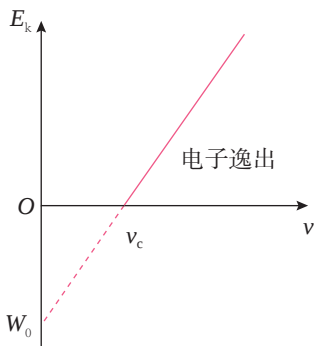


图 4.2-4 光电效应的  $E_k$ - $\nu$  图像

- 这个方程还表明，光电子的最大初动能  $E_k$  与入射光的频率  $\nu$  有关，而与光的强弱无关。这就解释了截止电压和光强无关。

- 电子一次性吸收光子的全部能量，不需要积累能量的时间，光电流自然几乎是瞬时产生的。

- 对于同种频率的光，光较强时，单位时间内照射到金属表面的光子数较多，照射金属时产生的光电子较多，因而饱和电流较大。

## 思考与讨论

爱因斯坦光电效应方程给出了光电子的最大初动能  $E_k$  与入射光的频率  $\nu$  的关系。但是，很难直接测量光电子的动能，容易测量的是截止电压  $U_c$ 。

那么，怎样得到截止电压  $U_c$  与光的频率  $\nu$  和逸出功  $W_0$  的关系呢？

利用光电子的初动能  $E_k = eU_c$  和爱因斯坦光电效应方程  $E_k = h\nu - W_0$ ，可以消去  $E_k$ ，从而得到  $U_c$  与  $\nu$ 、 $W_0$  的关系，即

$$U_c = \frac{h}{e} \nu - \frac{W_0}{e}$$

对于确定的金属，其逸出功  $W_0$  是确定的，电子电荷  $e$  和普朗克常量  $h$  都是常量。上式中的截止电压  $U_c$  与光的频率  $\nu$  之间是线性关系， $U_c$ - $\nu$  图像是一条斜率为  $\frac{h}{e}$  的直线（图 4.2-5）。

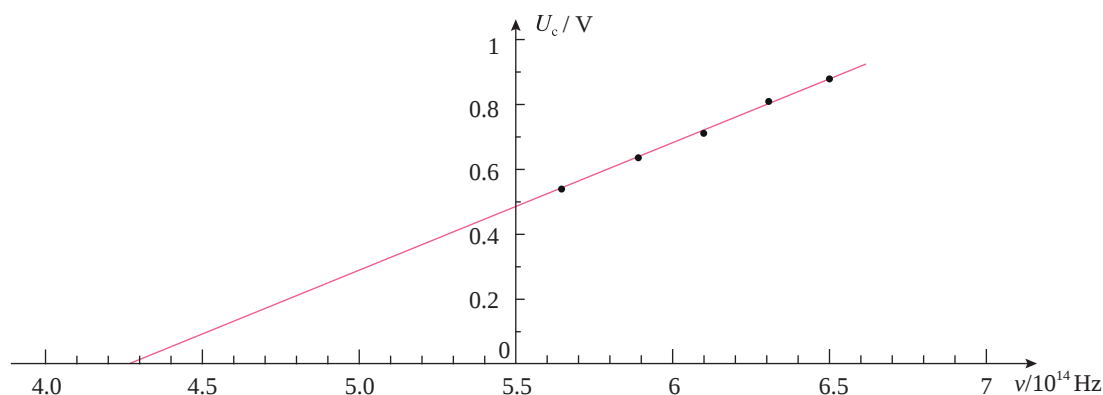


图 4.2-5 某金属的  $U_c$ - $\nu$  图像

从 1907 年起，美国物理学家密立根开始以精湛的技术测量光电效应中几个重要的物理量。他的目的是：测量金属的截止电压  $U_c$  与入射光的频率  $\nu$ ，由此算出普朗克常量  $h$ ，并与普朗克根据黑体辐射得出的  $h$  相比较，以检验爱因斯坦光电效应方程的正确性。

实验的结果是，两种方法得出的普朗克常量  $h$  在 0.5% 的误差范围内是一致的。这为爱因斯坦的光电效应理论提供了直接的实验证据。

爱因斯坦由于提出了光电效应理论而获得 1921 年的诺贝尔物理学奖。

## 康普顿效应和光子的动量

光可以与介质中的物质微粒发生散射，改变传播方向。1918～1922年，美国物理学家康普顿在研究石墨对X射线的散射时，发现在散射的X射线中，除了与入射波长 $\lambda_0$ 相同的成分外，还有波长大于 $\lambda_0$ 的成分，这个现象称为**康普顿效应**（Compton's effect）。康普顿的学生，中国留学生吴有训测试了多种物质对X射线的散射，证实了该效应的普遍性。

按照经典物理学的理论，入射的电磁波引起物质内部带电微粒的受迫振动，振动着的带电微粒进而再次产生电磁波，并向四周辐射，这就是散射波。散射的X射线频率应该等于带电粒子受迫振动的频率，也就是入射X射线的频率。相应地，X射线的波长也不会在散射中发生变化。因此，康普顿效应无法用经典物理学解释。

康普顿用光子的模型成功地解释了这种效应。他的基本思想是：光子不仅具有能量，而且具有动量，光子的动量 $p$ 与光的波长 $\lambda$ 和普朗克常量 $h$ 有关。这三个量之间的关系式为

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (2)$$

► 早在爱因斯坦1916年的一篇关于辐射问题的论文中就提出了光子具有动量。

在康普顿效应中，当入射的光子与晶体中的电子碰撞时，要把一部分动量转移给电子，因而，光子动量可能会变小（图4.2-6）。从（2）式看，动量 $p$ 减小，意味着波长 $\lambda$ 变大，因此，这些光子散射后波长变大。

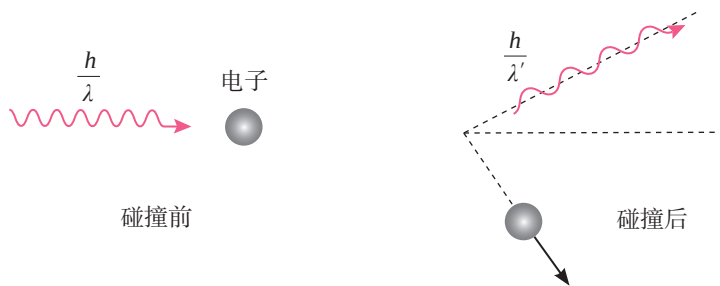


图 4.2-6 光子既有能量也有动量

基于这个假定的理论结果与实验符合得很好。康普顿效应让人们对于光子有了更深入的认识。康普顿因此获得了1927年的诺贝尔物理学奖。

## 光的波粒二象性

众所周知，在麦克斯韦的电磁理论建立之后，人们认识到光是一种电磁波，从而光的波动说被普遍接受，人们不再认为光是由粒子组成的。而爱因斯坦的光电效应理论和康普顿效应理论表明，光在某些方面确实会表现得像是由一些粒子（即一个个有确定能量和动量的“光子”）组成的。也就是说，光电效应和康普顿效应重新揭示了光的粒子性。当然，此时人们对光的粒子性的认识，是以最新的实验和量子理论为基础的，已经和牛顿时代的光的粒子说根本不同，其深度远远超出后者。人们意识到，光既具有波动性，又具有粒子性。换句话说，光具有**波粒二象性**（**wave-particle dualism**）。此后，又经过一系列探索，人们最终建立了比较完善的，能统一描述光的波动性和粒子性的理论——量子电动力学。

从牛顿时代光的微粒说、惠更斯和托马斯·杨的光的波动说，到麦克斯韦的光的电磁理论，再到爱因斯坦的光子理论乃至量子电动力学，人类对光的认识构成了一部科学史诗。

### 练习与应用

1. 在光电效应实验中，如果入射光的波长确定而强度增加，将产生什么结果？如果入射光的频率增加，将产生什么结果？

2. 金属A在一束绿光照射下恰能发生光电效应，现用紫光或红光照射时，能否发生光电效应？紫光照射A、B两种金属都能发生光电效应时，为什么逸出金属表面的光电子的最大速度大小不同？

3. 铝的逸出功是4.2 eV，现在将波长为200 nm的光照射铝的表面。

(1) 求光电子的最大初动能。

(2) 求截止电压。

(3) 求铝的截止频率。

4. 根据图4.2-1所示的电路，利用能够产生光电效应的两种（或多种）频率已知的光来进行实验，怎样测出普朗克常量？根据实验现象说明实验步骤和应该测量的物理量，写出根据本实验计算普朗克常量的关系式。

5. 在日常生活中，我们不会注意到光是由光子构成的，这是因为普朗克常量很小，每个光子的能量很小，而我们观察到的光学现象中涉及大量的光子。如果白炽灯消耗的电功率有15%产生可见光，试估算60 W的白炽灯泡1 s内发出可见光光子数的数量级。

### 3 原子的核式结构模型

#### 问题 ?

科学家在研究稀薄气体放电时发现，当玻璃管内的气体足够稀薄时，阴极就发出一种射线。它能使对着阴极的玻璃管壁发出荧光，这种射线的本质是什么呢？



这种射线称为**阴极射线**（cathode ray）。对这种射线本质的认识有两种观点：一种观点认为，它是一种电磁辐射；另一种观点认为，它是带电微粒。如何用实验判断哪一种观点正确呢？

#### 电子的发现

当时，两种观点的支持者争执不下，谁也说服不了谁。为了找到有利于自己的证据，双方都做了许多实验。英国物理学家J. J. 汤姆孙认为阴极射线是带电粒子流。为了证实这一点，从1890年起他和他的助手进行了一系列实验研究。图4.3-1是他当时使用的气体放电管的示意图。由阴极K发出的带电粒子通过缝隙A、B形成一束细细的



J. J. 汤姆孙（J. J. Thomson, 1856—1940）

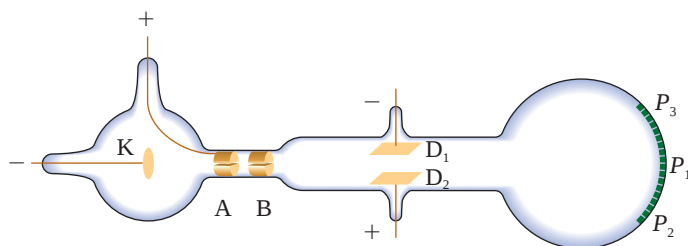


图 4.3-1 J. J. 汤姆孙的气体放电管的示意图

射线。它穿过两片平行的金属板  $D_1$ 、 $D_2$  之间的空间，到达右端带有标尺的荧光屏上。根据射线产生的荧光的位置（如  $P_1, P_2, P_3, \dots$ ），可以研究射线的径迹。

图 4.3-1 中产生阴极射线的机理是：管中残存气体分子中的正负电荷在强电场的作用下被“拉开”（即气体分子被电离），正电荷（即正离子）在电场加速下撞击阴极，于是阴极释放更多粒子流，形成了阴极射线。

1897 年，J. J. 汤姆孙根据阴极射线在电场和磁场中的偏转情况断定，它的本质是带负电的粒子流，并求出了这种粒子的比荷。他进一步发现，用不同材料的阴极做实验，所得比荷的数值都是相同的。这说明不同物质都能发射这种带电粒子，它是构成各种物质的共有成分。

由实验测得的阴极射线粒子的比荷是氢离子<sup>①</sup>（也就是质子）比荷的近两千倍。J. J. 汤姆孙认为，这可能表示阴极射线粒子电荷量的大小与一个氢离子一样，而质量比氢离子小得多。后来，他直接测到了阴极射线粒子的电荷量，尽管测量不很准确，但足以证明这种粒子电荷量的大小与氢离子大致相同，这就表明他当初的猜测是正确的。后来，组成阴极射线的粒子被称为**电子**。

电子电荷的精确测定是在 1909 ~ 1913 年间由密立根通过著名的“油滴实验”做出的。目前公认的电子电荷  $e$  的值为

$$e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$$

密立根实验更重要的发现是：电荷是量子化的，即任何带电体的电荷只能是  $e$  的整数倍。从实验测到的比荷及  $e$  的数值，可以确定电子的质量。现在人们普遍认为电子的质量为

$$m_e = 9.109\,383\,56 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

质子质量与电子质量的比值为

$$\frac{m_p}{m_e} = 1\,836$$

发现电子以后，J. J. 汤姆孙又进一步研究了许多新现象，如光电效应、热离子发射效应和  $\beta$  射线等。他发现，不论阴极射线、光电流、热离子流还是  $\beta$  射线，它们都包含电子。也就是说，不论是由于正离子的轰击、紫外光的照射、金属受热还是放射性物质的自发辐射，都能发射同样的带

► 带电粒子的电荷量与其质量之比，即比荷，是一个重要的物理量。

► 电子的发现是物理学史上的重要事件。人们由此认识到原子不是组成物质的最小微粒，原子本身也有结构。

► 热离子发射指金属在高温时发射粒子的现象。 $\beta$  射线是某些物质自发地放射出的一种射线，在第五章中将有讨论。

<sup>①</sup> 当时的人们不知道原子的结构，因此只是把氢离子当作“带电的氢原子”。

电粒子——电子。J. J. 汤姆孙对证实电子的存在有很大贡献，因此公认他是电子的发现者。他因气体导电的研究获得 1906 年的诺贝尔物理学奖。

## 思考与讨论

通常情况下，物质是不带电的，因此，原子应该是电中性的。既然电子是带负电的，质量又很小，那么，原子中一定还有带正电的部分，它具有大部分的原子质量。

请你设想一下，原子中带正电的部分以及带负电的电子可能是如何分布的？

## 原子的核式结构模型

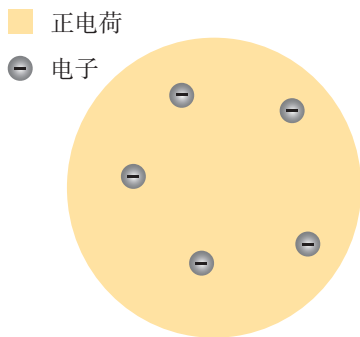


图 4.3-2 J. J. 汤姆孙的原子模型

在 J. J. 汤姆孙发现电子之后，对于原子中正负电荷如何分布的问题，科学家们提出了许多模型。J. J. 汤姆孙本人于 1898 年提出了一种模型。他认为，原子是一个球体，正电荷弥漫性地均匀分布在整個球体内，电子镶嵌其中（图 4.3-2）。有人形象地把他的这个模型称为“西瓜模型”或“枣糕模型”。

这个模型能够解释一些实验现象。但德国物理学家勒纳德 1903 年做了一个实验，使电子束射到金属膜上，发现较高速度的电子很容易穿透原子。这说明原子不是一个实心球体，这个模型可能不正确。之后不久， $\alpha$  粒子散射实验则完全否定了这个模型。

**$\alpha$  粒子散射实验**  $\alpha$  粒子是从放射性物质（如铀和镭）中发射出来的快速运动的粒子，质量为氢原子质量的 4 倍、电子质量的 7 300 倍。



卢瑟福（Ernest Rutherford, 1871 — 1937）

1909 年，英国物理学家卢瑟福指导他的助手盖革和马斯顿进行  $\alpha$  粒子散射实验的研究时，所用仪器的示意图如图 4.3-3 所示。 $\alpha$  粒子源 R 是被铅块包围的，它发射的  $\alpha$  粒子经过一条细通道，形成一束射线，打在金箔 F 上。显微镜 M 带有荧光屏 S，可以在水平面内转到不同的方向对散射的  $\alpha$  粒子进行观察。被散射的  $\alpha$  粒子打在荧光屏上会有微弱的闪光产生。通过显微镜观察闪光就可以记录在某一时间内向某一方向散射的  $\alpha$  粒子数。从  $\alpha$  粒子放射源到荧光屏这段路程处于真空中。

当  $\alpha$  粒子打到金箔时，由于金原子中的带电粒子对

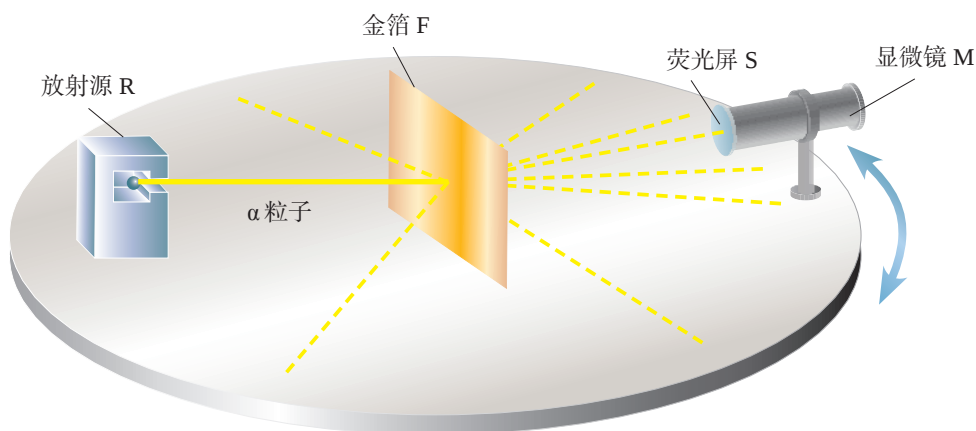


图 4.3-3  $\alpha$  粒子散射的实验装置示意图

$\alpha$  粒子有库仑力的作用，一些  $\alpha$  粒子的运动方向改变，也就是发生了  $\alpha$  粒子的散射。统计散射到各个方向的  $\alpha$  粒子所占的比例，可以推知原子中电荷的分布情况。除了金箔，当时的实验还用了其他重金属箔，例如铂箔。

### 思考与讨论

1.  $\alpha$  粒子射入金箔时难免与电子碰撞。试估计这种碰撞对  $\alpha$  粒子速度影响的大小。
2. 按照 J. J. 汤姆孙的原子模型，正电荷均匀分布在原子球体内。

请分析： $\alpha$  粒子穿过金箔，受到电荷的作用力后，沿哪些方向前进的可能性较大，最不可能沿哪些方向前进。

实验发现，绝大多数  $\alpha$  粒子穿过金箔后，基本上仍沿原来的方向前进，但有少数  $\alpha$  粒子（约占  $\frac{1}{8\,000}$ ）发生了大角度偏转，极少数偏转的角度甚至大于  $90^\circ$ ，也就是说，它们几乎被“撞了回来”。

**对  $\alpha$  粒子散射实验的解释** 这样的事实令人惊奇。大角度的偏转不可能是电子造成的，因为它的质量只有  $\alpha$  粒子的  $\frac{1}{7\,300}$ ，它对  $\alpha$  粒子速度的大小和方向的影响就像灰尘对枪弹的影响，完全可以忽略。因此， $\alpha$  粒子偏转主要是具有原子的大部分质量的带正电部分造成的。而按照 J. J. 汤姆孙的模型，正电荷是均匀地分布在原子内的， $\alpha$  粒子穿过原子时受到的各方向正电荷的斥力基本上会相互平衡，因此对  $\alpha$  粒子运动的影响不会很大。所以，J. J. 汤姆

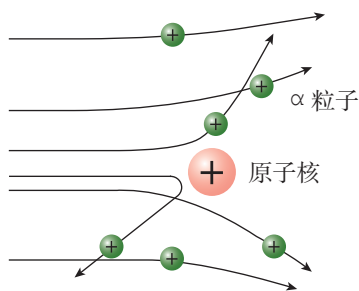


图 4.3-4  $\alpha$  粒子散射图景

孙的模型无法解释大角度散射的实验结果。

卢瑟福分析了实验数据后认为，事实应该是：占原子质量绝大部分的带正电的物质集中在很小的空间范围。这样才会使 $\alpha$ 粒子在经过时受到很强的斥力，使其发生大角度的偏转。

1911 年，卢瑟福提出了自己的原子结构模型。他设想：原子中带正电部分的体积很小，但几乎占有全部质量，电子在正电体的外面运动。这样，当 $\alpha$ 粒子接近原子时，电子对它的影响仍如前述可以忽略，但是，正电体对它的作用就不同了。因为正电体很小，当 $\alpha$ 粒子进入原子区域后，大部分离正电体很远，受到的库仑斥力很小，运动方向几乎不改变。只有极少数 $\alpha$ 粒子在穿过时距离正电体很近，因此受到很强的库仑斥力，发生大角度散射。这个情况如图 4.3-4 所示。

按照卢瑟福的理论，正电体的尺度是很小的，称为原子核。卢瑟福的原子模型因而称为**核式结构模型**。卢瑟福以这个模型为依据，利用经典力学计算了向各个方向散射的 $\alpha$ 粒子的比例，结果与实验数据符合得很好。

## 原子核的电荷与尺度

由不同元素对 $\alpha$ 粒子散射的实验数据可以确定不同元素原子核的电荷量 $Q$ 。又由于原子是电中性的，可以推算出原子内含有的电子数。科学家们注意到，各种元素的原子核的电荷数，即原子内的电子数，非常接近它们的原子序数，这说明元素周期表中的各种元素是按原子中的电子数来排列的。

现在，我们知道，原子确实是由带电荷 $+Ze$ 的核与核外 $Z$ 个电子组成的。原子序数 $Z$ 等于核电荷与电子电荷大小的比值。它表示原子核的电荷是一个电子电荷量的多少倍。后来又发现原子核是由质子和中子组成的，原子核的电荷数就是核中的质子数。

通常用核半径描述核的大小。原子核的半径是很难测量的，一般通过其他粒子与核的相互作用来确定。 $\alpha$ 粒子散射可以用来估算核半径。对于一般的原子核，实验确定的核半径的数量级为 $10^{-15} \text{ m}$ ，而整个原子半径的数量级是 $10^{-10} \text{ m}$ ，两者相差十万倍之多。可见原子内部是十分“空旷”的。

►  $Ze$  是原子核的电荷，单位是库仑； $Z$  是原子序数，也是原子核的电荷数，它表示原子核的电荷是一个电子电荷（绝对值）的多少倍。 $Z$  是没有单位的，或者说  $Z$  的单位是 1。

1. 加在阴极射线管内两个电极之间的电压为  $4 \times 10^3 \text{ V}$ ，如果电子离开阴极表面时的速度为 0，试求电子到达阳极时的速度。

2. 一个半径为  $1.6 \times 10^{-4} \text{ cm}$  的带负电的油滴，在电场强度为  $1.92 \text{ V/m}$ 、方向竖直向下的匀强电场中，如果油滴受到的库仑力恰好与重力平衡，问：这个油滴带有几个电子的电荷？已知油的密度为  $0.851 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

3. 一种测定电子比荷的实验装置如图 4.3-5 所示。真空玻璃管内阴极 K 发出的电子经阳极 A 与阴极 K 之间的高压加速后，形成一细束电子流，以平行于平板电容器极板的速度进入两极板 C、D 间的区域，若两极板 C、D 间无电压，电子将打在荧光屏上的 O 点，若在两极板间施加电压  $U$ ，则离开极板区域的电子将打在荧光屏上的 P 点；若再在极板间施加一个方向垂直于纸面向外、磁感应强度为  $B$  的匀强磁场，则电子在荧光屏上产生的光点又回到 O 点。已知极板的长度为  $5.00 \text{ cm}$ ，C、D 间的距离为

$1.50 \text{ cm}$ ，极板区的中点 M 到荧光屏中点 O 的距离为  $12.50 \text{ cm}$ ，电压  $U$  为  $200 \text{ V}$ ，磁感应强度  $B$  为  $6.3 \times 10^{-4} \text{ T}$ ，P 点到 O 点的距离  $y$  为  $3.00 \text{ cm}$ 。试求电子的比荷。

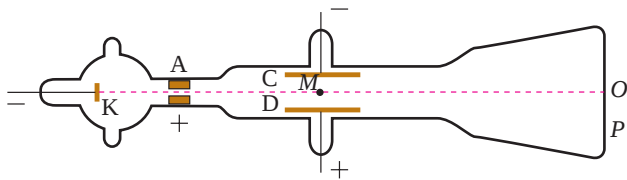


图 4.3-5

4. 卢瑟福提出的原子结构的模型是怎样的？他提出这种模型的依据是什么？

5. 按照原子的核式结构模型的比例，假如原子核有绿豆那么大，那么整个原子有多大？

6.  $\alpha$  粒子散射实验用的是金箔等重金属箔，而没有用轻金属箔，例如铝箔。除了金的延展性好，可以把金箔做得非常薄这个原因以外，你认为还有什么原因？

## 4

## 氢原子光谱和玻尔的原子模型

## 问题



把食盐放在火中灼烧，会发出黄色的光。食盐为什么发黄光而不发其他颜色的光呢？



$\alpha$  粒子散射实验让我们知道原子具有核式结构，但电子在原子核的周围怎样运动？这些需要根据其他事实才能认识。

## 光谱

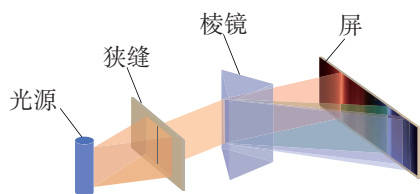


图 4.4-1 光谱的形成

用棱镜或光栅可以把物质发出的光按波长(频率)展开，获得波长(频率)和强度分布的记录(图 4.4-1)，即光谱。有些光谱是一条条的亮线，叫作谱线，这样的光谱叫作线状谱。有的光谱看起来不是一条条分立的谱线，而是连在一起的光带，叫作连续谱。图 4.4-2 中最上一条是连续谱，其他几条则既有线状分立谱又有连续谱。

气体中中性原子的发光光谱都是线状谱，说明原子只发出几种特定频率的光。不同原子的亮线位置不同，说明不同原子的发光频率是不一样的，因此，这些亮线称为原子的特征谱线。

钨丝白炽灯的光谱

铁电极弧光的光谱

分子状态的氢光谱

钡光谱

图 4.4-2 几种光谱

既然每种原子都有自己的特征谱线，我们就可以利用它来鉴别物质和确定物质的组成成分。这种方法称为光谱分析。它的优点是灵敏度高，样本中一种元素的含量达到 $10^{-13}$  kg 时就可以被检测到。

## 氢原子光谱的实验规律

氢原子的光谱如图 4.4-3 所示。光谱的结果显示氢原子只能发出一系列特定波长的光。



图 4.4-3 氢原子的光谱

1885 年，瑞士科学家巴耳末对当时已知的氢原子在可见光区的四条谱线，即图 4.4-3 中  $H_\alpha$ 、 $H_\beta$ 、 $H_\gamma$ 、 $H_\delta$  谱线作了分析，发现这些谱线的波长  $\lambda$  满足一个简单的公式，即

$$\frac{1}{\lambda} = R_\infty \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

式中  $R_\infty$  叫作里德伯常量，实验测得的值为  $R_\infty = 1.10 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 。这个公式称为巴耳末公式，式中的  $n$  只能取整数，它确定的这一组谱线称为巴耳末系。巴耳末公式以简洁的形式反映了氢原子的线状光谱的特征。

除了巴耳末系，后来发现的氢光谱在红外和紫外光区的其他谱线也都满足与巴耳末公式类似的关系式。

► 原子内部电子的运动是原子发光的原因。因此，光谱是探索原子结构的一条重要途径。

## 经典理论的困难

卢瑟福的核式结构模型正确地指出了原子核的存在，很好地解释了  $\alpha$  粒子散射实验，但跟经典的电磁理论发生了矛盾。

核外电子受到原子核的库仑引力的作用，却没有被吸引到原子核上，而是在以一定的速度绕核运动。按照经典电磁理论，这样运动的电荷应该辐射出电磁波，电子绕核转动的能量将不断地被电磁波带走。随着能量的减少，电子绕核运动的轨道半径也应减小，最后电子会坠落到原子核上（图 4.4-4）。由此判断，电子绕核转动这个系统应是不稳定的。但事实并非如此，原子是个很稳定的系统。

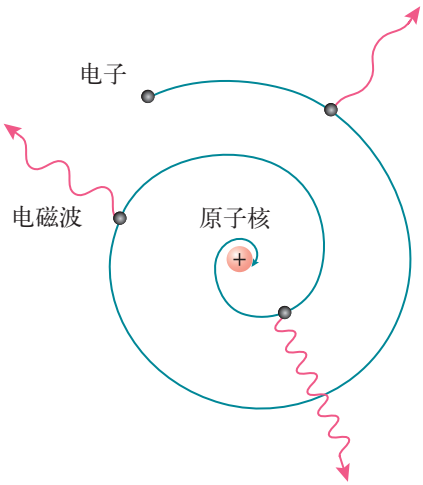


图 4.4-4 电子绕核转动的经典图景

另一方面，根据经典电磁理论，电子辐射电磁波的频率，就是它绕核转动的频率。随着绕核运动轨道半径的不断变化，电子运动的频率也要不断变化，因此原子辐射电磁波的频率也要不断变化。这样，大量原子发光的光谱就应该是包含一切频率的连续光谱。然而，事实上原子光谱是由一些不连续的亮线组成的分立的线状谱。

这些矛盾说明，尽管经典物理学可以很好地应用于宏观物体，但它不能解释原子世界的现象。

### 玻尔原子理论的基本假设

丹麦物理学家玻尔意识到了经典理论在解释原子结构方面的困难。在普朗克关于黑体辐射的量子论和爱因斯坦关于光子的概念的启发下，他在1913年把微观世界中物理量取分立值的观念应用到原子系统，提出了自己的原子结构假说。

玻尔的原子结构假说包括以下两方面的内容。

**轨道量子化与定态** 玻尔认为，原子中的电子在库仑引力的作用下，绕原子核做圆周运动，服从经典力学的规律。但不同的是，电子运行轨道的半径不是任意的，只有当半径的大小符合一定条件，这样的轨道才是可能的。也就是说，电子的轨道是量子化的。电子在这些轨道上绕核的运动是稳定的，不产生电磁辐射。

在玻尔理论中，电子的轨道半径只可能是某些分立的数值。例如，在氢原子中，电子轨道的最小半径是0.053 nm；电子还可能在半径是0.212 nm、0.477 nm……的轨道上运行（图4.4-5），但是轨道半径不可能是介于这些数值中间的某个值！

当电子在不同的轨道上运动时，原子处于

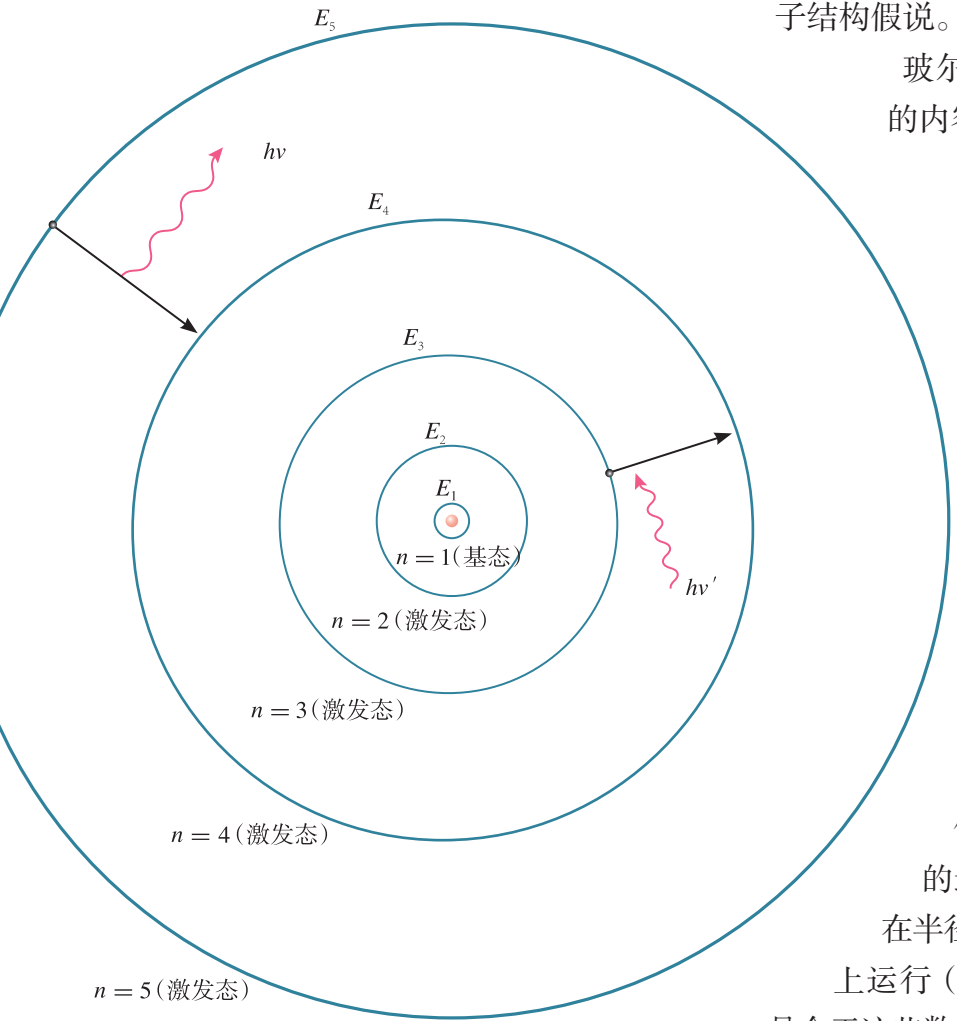


图 4.4-5 氢原子的电子轨道示意图

不同的状态，具有不同的能量。根据玻尔理论，电子只能在特定轨道上运动，因此，原子的能量也只能取一系列特定的值。这些量子化的能量值叫作**能级**。原子中这些具有确定能量的稳定状态，称为**定态**（stationary state）。能量最低的状态叫作**基态**（ground state），其他的状态叫作**激发态**（excited state）。通常用一个或几个量子数来标志各个不同的状态，例如，可以用 $n = 1$ 标记氢原子的基态，相应的基态能量记为 $E_1$ ；用 $n = 2, 3, 4, \dots$ 标记氢原子的激发态，相应的能量记为 $E_2, E_3, E_4, \dots$ 。

**频率条件** 按照玻尔的观点，电子在一系列定态轨道上运动，不会发生电磁辐射。那么，如何解释观察到的原子光谱呢？对此，玻尔假定：当电子从能量较高的定态轨道（其能量记为 $E_n$ ）跃迁到能量较低的定态轨道（能量记为 $E_m, m < n$ ）时，会放出能量为 $h\nu$ 的光子（ $h$ 是普朗克常量），这个光子的能量由前后两个能级的能量差决定，即

$$h\nu = E_n - E_m$$

这个式子称为频率条件，又称辐射条件。反之，当电子吸收光子时会从能量较低的定态轨道跃迁到能量较高的定态轨道，吸收的光子的能量同样由频率条件决定。

► 原子由一个能量态变为另一个能量态的过程称为跃迁。这里用的“跃”字，包含着“不连续”的意思。

## 玻尔理论对氢光谱的解释

从玻尔的基本假设出发，运用经典电磁学和经典力学的理论，可以计算氢原子中电子的可能轨道半径及相应的能量。图4.4-6是氢原子的能级图。

玻尔的频率条件告诉我们，原子从较高的能级跃迁到较低的能级时，例如，从 $E_3$ 跃迁到 $E_2$ 时，辐射的光子的能量为

$$h\nu = E_3 - E_2$$

按照玻尔理论，巴耳末公式中的正整数 $n$ 和2，正好代表电子跃迁之前和跃迁之后所处的定态轨道的量子数 $n$ 和2。因此，巴耳末公式代表的应该是电子从量子数分别为 $n = 3, 4, 5, \dots$ 的能级向量子数为2的能级跃迁时发出的光谱线。按照这个思路，可以根据玻尔理论推导出巴耳末公式，并从理论上算出里德伯常量 $R_\infty$ 的值。这样得到的结果与实验值符合得很好。同样，玻尔理论也能很好地解

► 在巴耳末公式中如果把分母中的2换为其他自然数，就得到了其他谱线系的波长。它们对应于氢原子从较高能级向其他能级跃迁时辐射的光。

释甚至预言氢原子的其他谱线系，即氢原子从高能级向  $m = 1, 3, 4, 5$  能级跃迁，也会产生相应的光谱。它们也都被实验观测到了，分别称为赖曼系、帕邢系、布喇开系等。

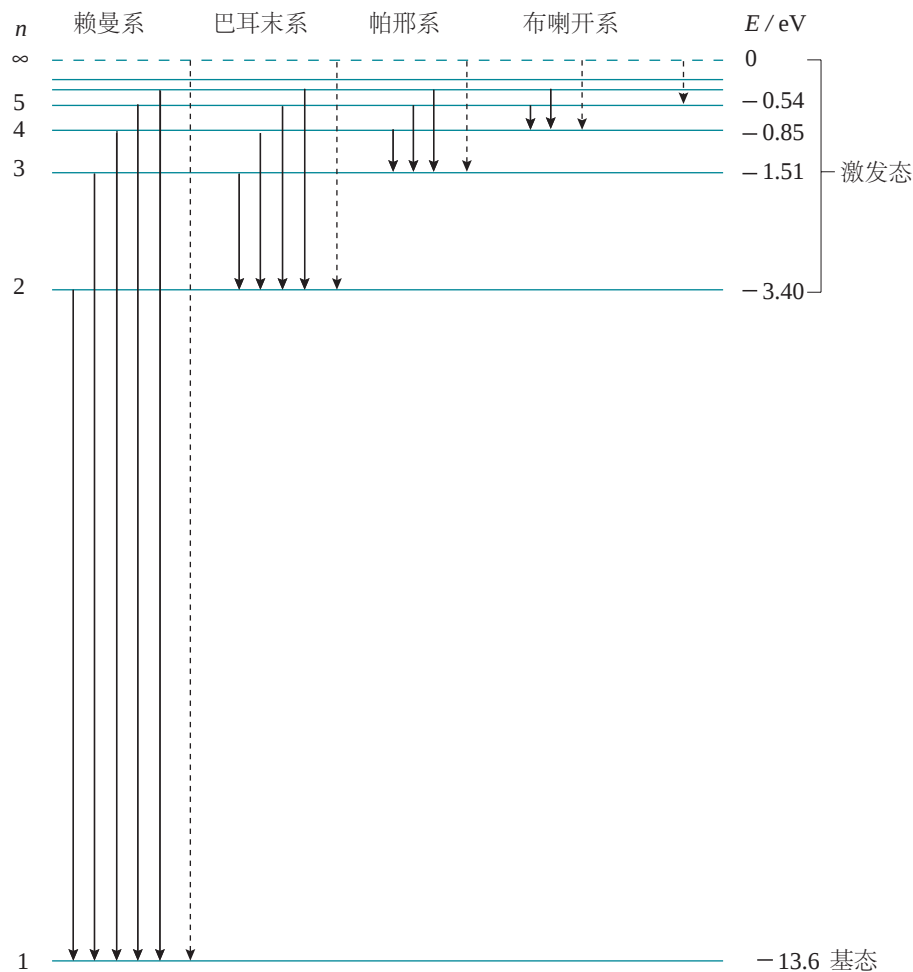


图 4.4-6 氢原子能级图

通常情况下，原子处于基态，非常稳定。气体放电管中的原子受到高速运动的电子的撞击，有可能向上跃迁到激发态。处于激发态的原子是不稳定的，会自发地向能量较低的能级跃迁，放出光子，最终回到基态。这就是气体导电时发光的机理。

原子从较高的能级向低能级跃迁时放出的光子的能量等于前后两个能级之差。由于原子的能级是分立的，所以放出的光子的能量也是分立的。因此原子的发射光谱只有一些分立的亮线。

由于不同的原子具有不同的结构，能级各不相同，因此辐射（或吸收）的光子频率也不相同。这就是不同元素

的原子具有不同的特征谱线的原因。

各种气体原子的能级不同，跃迁时发射光子的能量各异。街道上的霓虹灯（图 4.4-7）、试电笔中的氖管，都是由灯管内的气体原子从高能级向低能级跃迁而发光的。食盐被灼烧时发的光，也主要是由食盐蒸气中钠原子的能级跃迁而造成的。



图 4.4-7 不同气体制成的霓虹灯

## 玻尔理论的局限性

玻尔的原子理论第一次将量子观念引入原子领域，提出了定态和跃迁的概念。现在已经知道，它们都是微观世界物理规律中的核心概念。玻尔理论成功地解释了氢原子光谱的实验规律。但对于稍微复杂一点的原子如氦原子，玻尔理论就无法解释它的光谱现象。这说明，玻尔理论还没有完全揭示微观粒子的运动规律。后来，人们经过进一步探索，建立了完整描述微观规律的量子力学。<sup>①</sup>

玻尔理论的不足之处在于保留了经典粒子的观念，仍然把电子的运动看作经典力学描述下的轨道运动。实际上，根据量子力学，原子中电子的坐标没有确定的值。因此，我们只能说某时刻电子在某点附近单位体积内出现的概率是多少，而不能把电子的运动看成一个具有确定坐标的质点的轨道运动。当原子处于不同的状态时，电子在各处出现的概率是不一样的。如果用疏密不同的点子表示电子在各个位置出现的概率，画出图来就像云雾一样，人们形象地把它叫作**电子云 (electron cloud)**。图 4.4-8 甲是氢原子处于  $n = 1$  状态时的电子云；当  $n = 2$  时有几个可能的状态，图 4.4-8 乙画的是其中一个状态的电子云。

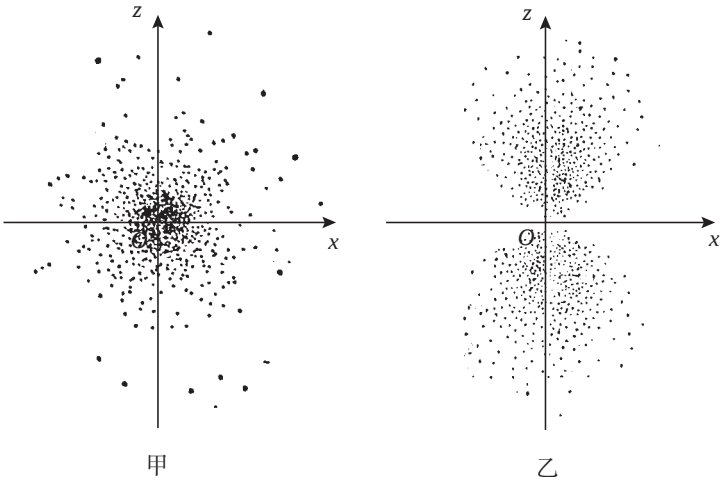


图 4.4-8 氢原子电子云示意图

<sup>①</sup> 量子力学的建立过程在本章第 5 节有详细介绍。

## 光谱分析

光谱一词最早由牛顿提出。1666年，牛顿把通过玻璃棱镜的太阳光分解成了从红光到紫光的各种颜色的光谱（图 4.4-9 甲），他发现白光是由各种颜色的光组成的。

1802年英国科学家沃拉斯顿和1814年德国物理学家夫琅禾费分别独立地观察到了太阳光谱中的暗线。夫琅禾费以不同的字母命名了一些主要的暗线（图 4.4-9 乙），后来就把这些暗线称为夫琅禾费线。

1821年，夫琅禾费又用光栅代替棱镜作为分光装置，使太阳光形成了更精细的光谱。利用光栅，他试着测定了太阳光中各条暗线的波长。夫琅禾费的工作当时没有受到重视，他本人也不明白太阳光谱中暗线的含义。

1859年，德国物理学家基尔霍夫解释了太阳光谱中暗线的含义。他和德国科学家本生制成了第一台棱镜光谱仪（图 4.4-9 丙），用于光谱研究。基尔霍夫发现，每一种元素都有自己的特征谱线，如果在某种光中观察到了这种元素的特征谱线，那么光源里面一定含有这种元素。太阳光中含有各种颜色的光，但当太阳光透过太阳的高层大气射向地球时，太阳高层大气含有的元素会吸收它自己特征谱线的光，然后再发射出去，不过这次是向四面八方发射，所以到达地球的这些谱线看起来就弱了，这样就形成了明亮背景下的暗线。基尔霍夫断定，太阳光谱中的夫琅禾费暗线就是各种物质的特征谱线。与已知元素的光谱相比较，知道太阳中存在钠、镁、铜、锌、镍等金属元素。

由基尔霍夫开创的光谱分析方法对鉴别化学元素有着巨大的意义。许多化学元素，像铯、铷、铊、铟、镓，都是在实验室里通过光谱分析发现的。

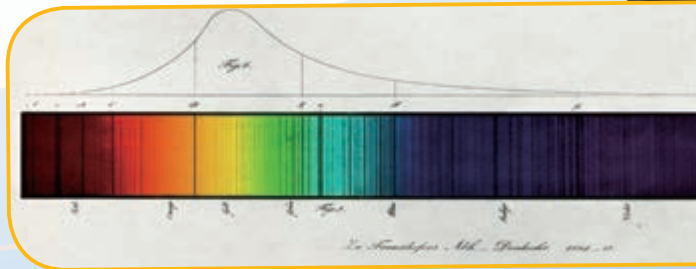
当天文学家将光谱分析方法应用于恒星时，马上就证明了宇宙中物质构成的统一性。我国研制的郭守敬望远镜（大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜，英文简称LAMOST，图 4-4-9 丁），将遥远天体的光分别传输到多台光谱仪而获得大量的光谱信息，为恒星的研究提供了重要的基础数据。除化学成分外，恒星的光谱还能够揭示其表面温度、质量和运动状态等信息。

光谱分析还为深入原子世界打开了道路。近代原子物理学正是从原子光谱的研究中开始的。

红 橙 黄 绿 蓝 靛 紫



甲 牛顿用棱镜得到太阳光谱



夫琅禾费线

图 4.4-9 光谱分析那些事儿

1. 什么是线状谱，什么是连续谱？原子的发射光谱是怎样的光谱？不同原子的发射光谱是否有可能相同？

2. 参考图 4.4-6，用玻尔理论解释，当巴耳末公式  $n=5$  时计算出的氢原子光谱的谱线，是哪两个能级之间的跃迁造成的？

3. 根据巴耳末公式，指出氢原子光谱在可见光范围内波长最长的前两条谱线所对应的  $n$ ，它们的波长各是多少？氢原子光谱有什么特点？

4. 如果大量氢原子处在  $n=3$  的能级，会辐射出几种频率的光？其中波长最短的光是在哪两个能级之间跃迁时发出的？

5. 请用玻尔理论解释：为什么原子的发射光谱都是一些分立的亮线？

6. 要使处于  $n=2$  的激发态的氢原子电离，它需要吸收的能量为多大？

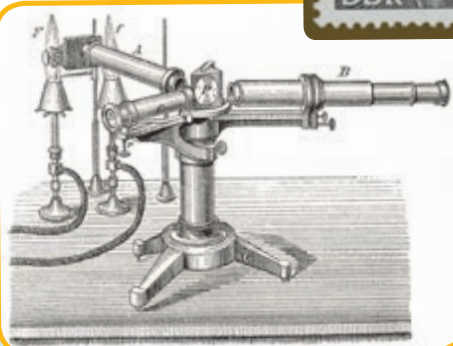
7. 包含各种波长的复合光，被原子吸收了某些波长的光子后，连续光谱中这些波长的位置上便出现了暗线，这样的光谱叫作吸收光谱。请用玻尔理论解释：为什么各种原子吸收光谱中的每一条暗线都跟这种原子的发射光谱中的一条亮线相对应？



乙 夫琅禾费记录太阳光谱



基尔霍夫



丙 基尔霍夫和本生制成的棱镜光谱仪



丁 郭守敬望远镜

## 5

## 粒子的波动性和量子力学的建立

## 问题



通过对双缝干涉、光电效应等一系列问题的研究，人们终于认识到光既有粒子性，又有波动性。

我们已经认识到如电子、质子等实物粒子是具有粒子性的，那么，实物粒子是否也会同时具有波动性呢？



## 粒子的波动性

1924年，法国物理学家德布罗意在对光的波粒二象性、玻尔氢原子理论以及相对论的深入研究的基础上，把波粒二象性推广到实物粒子，如电子、质子等。他写道：“整个世纪<sup>①</sup>以来，在光学上，与波动方面的研究相比，忽视了粒子方面的研究；而在实物粒子的研究上，是否发生了相反的错误呢？是不是我们把粒子方面的图像想得太多，而忽视了波的现象？”他提出假设：实物粒子也具有波动性，即每一个运动的粒子都与一个对应的波相联系。粒子的能量  $\varepsilon$  和动量  $p$  跟它所对应的波的频率  $\nu$  和波长  $\lambda$  之间，遵从如下关系

$$\nu = \frac{\varepsilon}{h}, \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

这种与实物粒子相联系的波后来被称为**德布罗意波**（de Broglie wave），也叫作**物质波**（matter wave）。

## 物质波实验验证

德布罗意关于实物粒子具有波动性的假说在当时来看

<sup>①</sup> 指 19 世纪。

是难以理解的。真正判定这个假说是否“站得住脚”的只能是实验。

我们知道，光的干涉和衍射现象是光具有波动性的有力证据。因此，如果电子、质子等实物粒子也真的具有波动性，那么，它们就应该像光波那样也能发生干涉和衍射。这是验证德布罗意波是否存在的一条途径。

电子的德布罗意波长与X射线的波长具有相近的数量级。前面讲过，X射线在通过晶体时会发生明显的衍射。1927年戴维孙和G. P. 汤姆孙分别用单晶和多晶晶体做了电子束衍射的实验，得到了类似图4.5-1的衍射图样，从而证实了电子的波动性。在后来的实验中，人们还进一步观测到了电子德布罗意波的干涉现象（图4.5-2）。

► G. P. 汤姆孙的父亲 J. J. 汤姆孙因发现电子而获诺贝尔物理学奖，他则由于验证了电子的波动性而获诺贝尔物理学奖。这是科学史上的一段佳话。

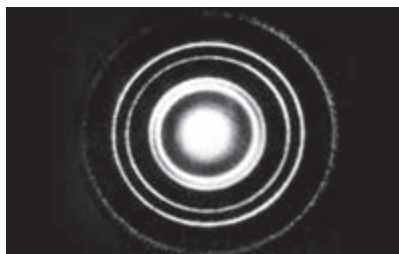


图 4.5-1 电子束穿过铝箔后的衍射图样

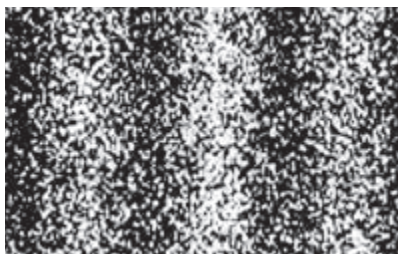


图 4.5-2 电子干涉条纹

1929年，德布罗意因提出物质波的假说获得了诺贝尔物理学奖。之后，戴维孙和G. P. 汤姆孙因证实电子波动性获得了1937年的诺贝尔物理学奖。

除了电子以外，后来还陆续证实了中子、质子以及原子、分子的波动性。对于这些粒子，德布罗意给出的  $v = \frac{E}{h}$  和  $\lambda = \frac{h}{p}$  的关系同样正确。

宏观物体的质量比微观粒子大得多，它们运动时的动量很大，根据  $\lambda = \frac{h}{p}$  可知，它们对应的德布罗意波的波长就很短。例如，一个质量为0.01 kg，速度为300 m/s的子弹，它的德布罗意波长只有  $2.2 \times 10^{-34}$  m，比宏观物体的尺度小得多，根本无法观察到它的波动性。而一个原来静止的电子，在经过100 V电压加速后，德布罗意波长约为0.12 nm，因此有可能观察到电子的波动性。

德布罗意提出物质波的观点被实验证实，表明电子、质子、原子等粒子不但具有粒子的性质，而且具有波动的性质。换句话说，它们和光一样，也具有波粒二象性。

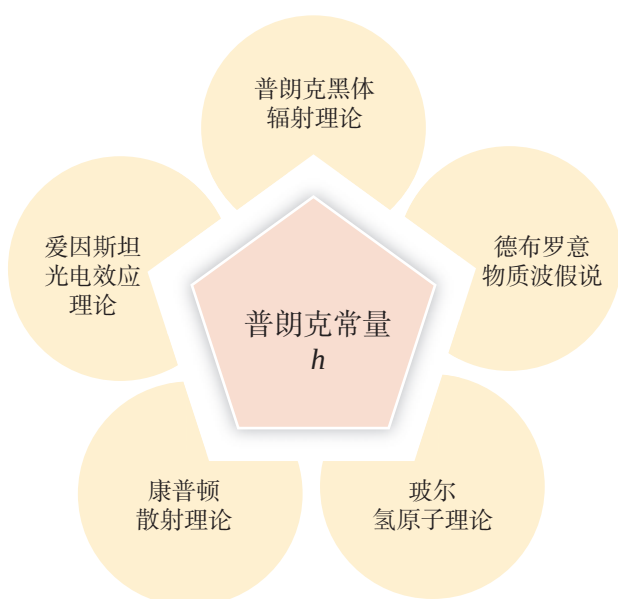


图 4.5-3 一系列理论都和普朗克常量紧密相关



图 4.5-4 薛定谔夫妇墓碑上方书写的是薛定谔方程

## 量子力学的建立

19、20 世纪之交，人们在黑体辐射、光电效应、氢原子光谱等许多类问题中，都发现了经典物理学无法解释的现象。这些现象不是孤立的，而是在各类系统中普遍存在的，且都和原子、分子等微观粒子的行为紧密相关。在这些问题中经典物理学往往连实验结果的定性行为都无法解释。这就表明，微观世界的物理规律和宏观世界的物理定律可能存在巨大的差别，人们需要建立描述微观世界的物理理论。

普朗克黑体辐射理论、爱因斯坦光电效应理论、康普顿散射理论、玻尔氢原子理论以及德布罗意物质波假说等一系列理论在解释实验方面都取得了成功。但它们中的每一个，都是针对一个特定的具体问题，都不是统一的普遍性理论。值得注意的是，在这些成功的理论中，普朗克常量都扮演了关键性的角色（图 4.5-3）。这就预示着这些理论之间存在着紧密的内在联系。在它们的背后，应该存在着统一描述微观世界行为的普遍性规律。

人们在 20 世纪 20 年代成功地建立了这种普遍性理论。1925 年，德国物理家海森堡和玻恩等人对玻尔的氢原子理论进行了推广和改造，使之可以适用于更普遍的情况。他们建立的理论被称为矩阵力学。很快，1926 年，奥地利物理学家薛定谔提出了物质波满足的方程——薛定谔方程（图 4.5-4）。把这个方程应用于氢原子，就很容易能得到氢原子光谱的公式。同时，这个方程还可以方便地应用于其他的系统，使玻尔理论的局限得以消除。由于这个理论

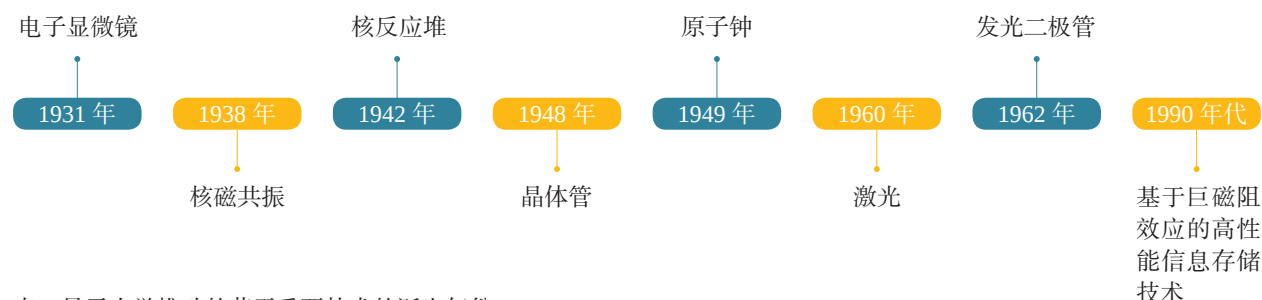


表 量子力学推动的若干重要技术的诞生年份

的关键是物质波，因此被称为波动力学。1926年，薛定谔和美国物理学家埃卡特很快又证明，波动力学和矩阵力学在数学上是等价的，它们是同一种理论的两种表达方式。

随后数年，在以玻恩、海森堡、薛定谔以及英国的狄拉克和奥地利的泡利为代表的众多物理学家的共同努力下，描述微观世界行为的理论被逐步完善并最终完整地建立起来，它被称为**量子力学**（quantum mechanics）。

量子力学是在普朗克、玻尔等人所建立的一个个的具体理论（它们被统称为“早期量子论”）的基础上创立的。它继承了早期量子论的成功之处并克服了其困难和局限，最终取代了早期量子论，成为统一描述微观世界物理规律的普遍理论。

► 量子力学的创立是物理学历史上的一次重要革命。它和相对论共同构成了20世纪以来物理学的基础。

## 量子力学的应用

量子力学被应用到众多具体物理系统中，得到了与实验符合得很好的结果，获得了极大的成功。借助量子力学，人们深入认识了微观世界的组成、结构和属性。

量子力学推动了核物理和粒子物理的发展。人们认识了原子、原子核、基本粒子等各个微观层次的物质结构。而粒子物理学的发展又促进了天文学和宇宙学的研究。从整个宇宙到微小的粒子，人类探索自然的视野前所未有的宽广。人们惊讶地发现，世界具有奇妙的结构，最微观层次和最宏观层次的规律，竟有着紧密的联系。核物理的发展，还让人们成功地认识并利用了原子核反应堆所释放的能量——核能。爱因斯坦说：“这是人们第一次利用太阳以外的能量。”

量子力学推动了原子、分子物理和光学的发展。人们认识了原子的结构，以及原子、分子和电磁场相互作用的方式。在此基础上，发展了各式各样的对原子和电磁场进行精确操控和测量的技术，如激光、核磁共振、原子钟，等等。激光技术使人们第一次拥有了纯净可控的光源，我们今天能在全球范围内实现即时通信，基础之一就是激光为载体的光纤网络（图4.5-5）。核磁共振技术使人们可以利用振荡的磁场测量材料中原子的性质，因此，被广泛地用于化学、生物研究和医学诊断。原子钟利用原子为电磁波校准频率，从而实现了时间的高精度测量。在日常



图 4.5-5 光纤通信

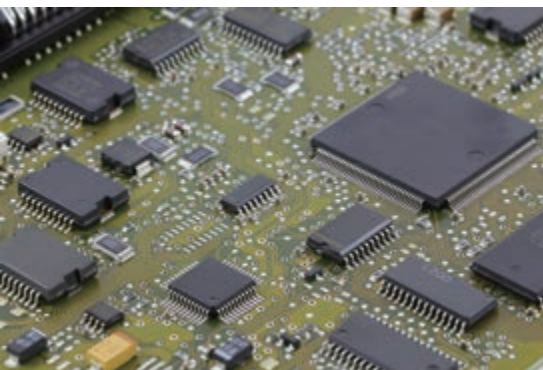


图 4.5-6 集成电路

生活和国家安全中发挥巨大作用的卫星定位技术，其核心部件就是原子钟。

量子力学推动了固体物理的发展。人们了解了固体中电子运行的规律，并弄清了为什么固体有导体、绝缘体和半导体之分。科学家们利用半导体的独特性质发明了晶体管等各类固态电子器件，并结合激光光刻技术制造了大规模集成电路，俗称“芯片”（图4.5-6）。这些器件利用固体的微观结构对电路进行操控，速度和可靠性都远胜过去的电子管，而体积则小得多。靠它们，人们才可以制造体积小且功能强大的电子计算机、智能手机等信息处理设备，真正走进了信息时代。此外，固体物理学的发展，还为人们带来了低能耗高亮度的半导体发光技术，并让人们认识了超导等一系列神奇的现象。

量子力学的应用还有很多。毫不夸张地说，在过去的近一百年中，量子力学极大地推动了人类的进步。“一步一重天，百步上云端”，人类探索自然的步伐不会停息，量子力学必将在这个征途上继续发挥巨大的基础性作用。



## 量子力学的创立和索尔维会议

量子力学和相对论的创立，是20世纪物理学的两个主要进展，给人类的科学、技术和社会形态带来了极其深刻的影响。相对论的创立，主要是爱因斯坦的贡献，而量子力学的创立则曲折得多，是普朗克（图4.5-7一排左二）、爱因斯坦（一排右五）、玻尔（二排右一）、海森堡（三排右三）、玻恩（二排右二）、薛定谔（三排右六）、狄拉克（二排右五）等一大批杰出物理学家历时30年左右（自1900年普朗克提出能量量子化到1920年代末期量子力学框架基本成型）共同努力的结果。我国物理学家曾谨言曾说：“20世纪量子物理学所碰到的问题是如此复杂和困难，以至没有可能期望一个物理学家能一手把它发展成一个完整的理论体系。”

美国著名物理学家，原子弹之父奥本海默曾经在玻恩门下学习和研究量子力学。他后来曾生动地描述量子力学创立阶段：“那是一个在实验室里耐心工作的时代，有许多关键性的实验和大胆的决策，有许多错误的尝试和不成熟的假设。那是一个真挚通讯与匆忙会议的时代，有许多激烈的辩论和无情的批评，里面充满了巧妙的数学性的论战方法。”

在量子力学创建过程中扮演重要角色的一系列“匆忙会议”中，最著名的要数索尔维会议。

索尔维会议的创始人是比利时企业家索尔维。索尔维本人是一位化学家和企业家，因为发明了制碱方法而变得非常富有。但他希望能够“将其部分财富偿还给人类”，因此创办了多个科学



图 4.5-7 1927 年第五届索尔维会议参加者合影

研究所、科学基金以及福利基金。从20世纪初开始，索尔维的科学基金会每隔几年轮流召开物理、化学领域的科学会议——索尔维会议。

1911年，第一届索尔维物理会议在布鲁塞尔召开，主题是“辐射与量子”。这次会议历时5天，名家云集。1927年10月召开的第五届索尔维物理会议最为著名，当时著名的物理学家纷纷出席（图4.5-7），例如，德布罗意（二排左三）、康普顿（二排右四）等，大家就量子力学的各方面问题进行了深入讨论。本次会议的29位参会者中，有17人获得了诺贝尔奖。

索尔维会议一直坚持举办，到2017年已经举办了27届物理会议和24届化学会议。这是企业资助科学研究的一个范例。事实上，除了政府拨款外，企业提供的各种经费和资助也是世界各国科学研究的一个重要经费来源。它们和政府拨款一道推动了基础科学的研究以及技术转化。除了索尔维会议，另一个著名的实例是，美国电话电报公司从20世纪30年代开始，支持其旗下的贝尔实验室开展在当时看来还十分遥远的半导体器件开发研究。经过十几年的探索，最终该实验室的科学家布莱特、巴丁和肖克利等人在1948年发明了半导体三极管，把信息技术由电子管时代带进了晶体管时代，并导致了硅谷的诞生和信息时代的到来。

## 练习与应用

1. 我们根据什么说光具有波粒二象性？
2. 一个电子和一个质子具有同样的动能时，它们的德布罗意波长哪个大？
3. 射击运动员射击时会因为子弹的波动性

而“失准”吗？为什么？根据现实情况下子弹质量、速度的大小所对应的德布罗意波长来做定性说明。

## A 组

1. 在光电效应实验中，小明用同一光电管在不同实验条件下得到了三条光电流与电压之间的关系曲线（甲、乙、丙），如图4-1所示。回答下面问题，并说明理由。

- (1) 甲、乙两种光的频率，哪个大？
- (2) 乙、丙两种光的波长，哪个大？
- (3) 乙、丙两种光所对应的截止频率，哪个大？
- (4) 甲、丙两种光所产生光电子的最大初动能，哪个大？

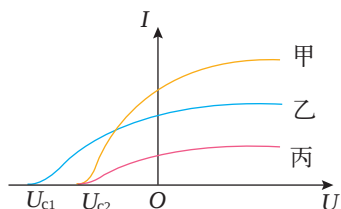


图 4-1

2. 一个电子与一个基态氢原子碰撞，刚好使这个氢原子电离。这个电子的动能是多少？
3. 有些荧光物质在紫外线照射下会发出可见光，大额钞票的荧光防伪标志就是一例。为什么任何物质都不会在红外线照射下发出可见光？
4. 估算运动员跑步时的德布罗意波长，为什么我们观察不到运动员的波动性？

5. 钠光谱中两条黄色谱线的波长分别为 589.6 nm 和 589.0 nm。分别计算钠原子辐射这两种波长的光时核外电子跃迁前后的能级差。

6. 氢原子光谱中巴耳末系最小波长与最大波长之比为多少？

7. 图4-2是研究光电效应的实验装置，某同学进行了如下操作。

(1) 用频率为  $\nu_1$  的光照射光电管，此时电流表中有电流。调节滑动变阻器，使微安表示数恰好变为 0，记下此时电压表的示数  $U_1$ 。

(2) 用频率为  $\nu_2$  的光照射光电管，重复(1)中的步骤，记下电压表的示数  $U_2$ 。

已知电子的电荷量为  $e$ ，请根据以上实验，推导普朗克常量实验测定值的计算式。

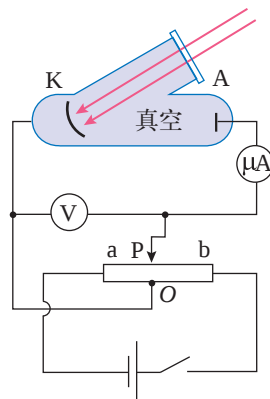


图 4-2

## B 组

1. 用同一束单色光，在同一条件下先后照射锌板和银板，都能产生光电效应。在以上两次实验中，对于下列四个物理量，哪些是一定相同的？哪些是可能相同的？哪些是一定不同的？

- (1) 光子的能量。

(2) 光电子的逸出功。

(3) 光电子的动能。

(4) 光电子的最大动能。

2. 大量氢原子处于  $n=1, 2, 3, 4$  的四个状态，处于较高能级的原子可以向任意一个较

低能级跃迁。这时我们可以观测到几种波长的光（包括不可见光）？最短的波长是多少？

3. 已知钠原子在A、B、C、D、E几个能级间跃迁时辐射的光的波长分别为：589 nm ( $B \rightarrow A$ )，330 nm ( $C \rightarrow A$ )，285 nm ( $D \rightarrow A$ )，514 nm ( $E \rightarrow B$ )。

试作出钠原子在这几个能量范围的能级图。作图时注意，表示能级的横线间的距离和相应能级差成正比，并在线旁以电子伏特为单位标出这个能级的值（设最高能级为0）。

4. 一个质子的动能是10 eV，如果有一个电子的德布罗意波长和这个质子的德布罗意波长

相等，这个电子的动能是多少？

5. A、B两种光子的能量之比为2 : 1，它们都能使某种金属发生光电效应，且所产生的光电子最大初动能分别为 $E_A$ 、 $E_B$ 。求A、B两种光子的动量之比和该金属的逸出功。

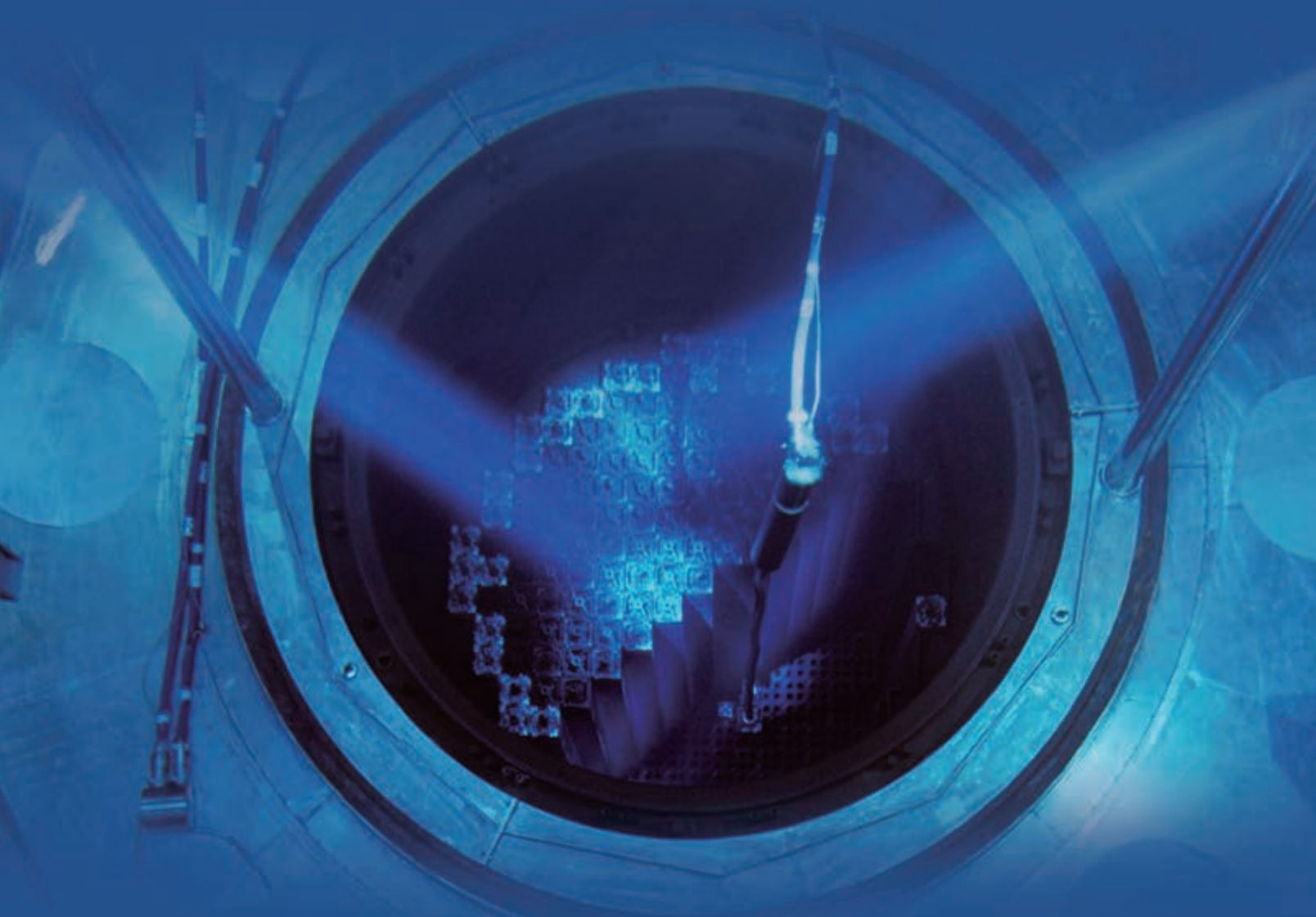
6. 人眼对绿光最为敏感，如果每秒有6个绿光的光子射入瞳孔，眼睛就能察觉。现有一个光源以0.1 W的功率均匀地向各个方向发射波长为530 nm的绿光，眼睛最远在多大距离能够看到这个光源？假设瞳孔在暗处的直径为4 mm，且不计空气对光的吸收。

# 5

## 第五章 原子核

核能是蕴藏在原子核内部的能量。核能的发现是人们探索微观物质结构的一个重大成果。人类通过许多方式利用核能，主要的途径是发电。如今，全世界大约有 16% 的电能是由核反应堆生产的。核能的利用可以有效缓解常规能源的短缺。

图为某核电站核反应堆的本体。它是浸没在水下的（蓝色）。其中含有铀和钚的燃料棒被装进核反应堆的堆芯，用于产生受控核裂变反应，释放出大量的能量。



随着核能的出现,我们这一代人为世界带来了人类发现火以来最革命性的力量。

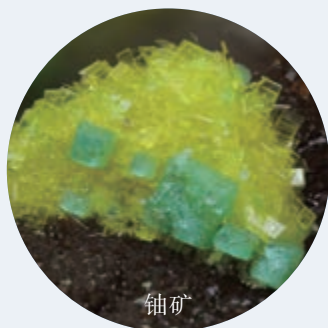
——爱因斯坦

## 1 原子核的组成

### 问题 ?

关于原子核内部信息的研究,最早来自矿物的天然放射现象。

那么,人们是怎样从破解天然放射现象入手,一步步揭开了原子核秘密的呢?



### 天然放射现象

1896年,法国物理学家贝克勒尔发现,铀和含铀的矿物能够发出看不见的射线,它能穿透黑纸使照相底版感光。

受到贝克勒尔的发现的鼓舞,波兰裔法国物理学家玛丽·居里和她的丈夫皮埃尔·居里对铀和含铀的各种矿石进行了深入研究。

他们发现了一种沥青中的含铀物质,根据它的含铀量计算发出的射线不会太强,但实际测得的射线要强得多。进一步研究后,发现这种沥青中还存在着两种能够发出更强射线的新元素,居里夫人把其中一种元素命名为钋(Po),另一种元素命名为镭(Ra)。

物质发出射线的性质称为**放射性**(radioactivity),具有放射性的元素称为放射性元素。后来发现,放射性并不是少数元素才有的,原子序数大于83的元素,都能自发地发出射线,原子序数小于或等于83的元素,有的也能发出射线。放射性元素自发地发出射线的现象,叫作天然放射现象。



玛丽·居里(Marie Curie, 1867—1934)和她的丈夫皮埃尔·居里(Pierre Curie, 1859—1906)

## 射线的本质

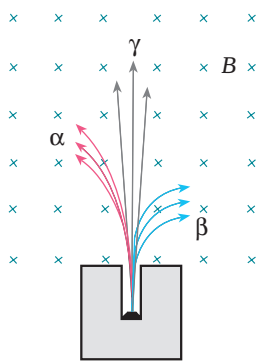


图 5.1-1 三种射线在磁场中的运动径迹不同

发现了天然放射现象之后不久，人们就在想，这些射线到底是什么呢？

把放射源铀、钋或镭放入用铅做成的容器中，射线只能从容器的小孔射出，成为细细的一束。若在射线经过的空间施加磁场，可以发现射线分裂成三束，其中两束在磁场中向不同的方向偏转，这说明它们是带电粒子流；另一束在磁场中不偏转，说明它不带电（图5.1-1）。于是，人们把这三种射线分别叫作 $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线和 $\gamma$ 射线。

### 思考与讨论

如果 $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线都是带电粒子流，按照图5.1-1中标出的径迹判断，它们分别带什么电荷？

如果不用磁场而用电场判断它们带电的性质，两个电极怎样放置可以使三种射线大致沿图示的方向偏转？

► 射线使原子中的电子脱离核的束缚成为自由电子，这样的过程叫作电离。射线的上述作用叫作电离作用。

物理学家们经过多方面的研究后确认 $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线和 $\gamma$ 射线具有以下特征。

$\alpha$ 射线 是高速粒子流，粒子带正电，电荷量是电子的2倍，质量是氢原子的4倍，其组成与氦原子核相同。 $\alpha$ 粒子的速度可以达到光速的 $\frac{1}{10}$ 。由于 $\alpha$ 粒子带电，质量又比较大，通过气体时很容易把气体分子中的电子剥离，使气体电离。由于与物质中的微粒作用时会损失自己的能量， $\alpha$ 粒子的穿透能力较弱，在空气中只能前进几厘米，用一张纸就能把它挡住。

$\beta$ 射线 是高速电子流，它的速度更大，可达光速的99%。它的电离作用较弱，穿透能力较强，很容易穿透黑纸，也能穿透几毫米厚的铝板。

$\gamma$ 射线 是能量很高的电磁波，波长很短，在 $10^{-10}$  m以下。它的电离作用更弱，穿透能力更强，甚至能穿透几厘米厚的铅板和几十厘米厚的混凝土。

实验发现，如果一种元素具有放射性，那么，无论它是以单质存在的，还是以化合物形式存在的，都具有放射

性。放射性的强度也不受温度、外界压强的影响。由于元素的化学性质决定于原子核外的电子，这就说明射线与这些电子无关，也就是说，射线来自原子核。这说明原子核内部是有结构的。

$\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线都是高速运动的粒子，能量很高， $\gamma$ 射线是波长很短的光子，能量也很高。

► 从原子内部能够射出这样高能的粒子，这使人们意识到原子核是一个能量的宝库。

 拓展学习

威耳逊云室

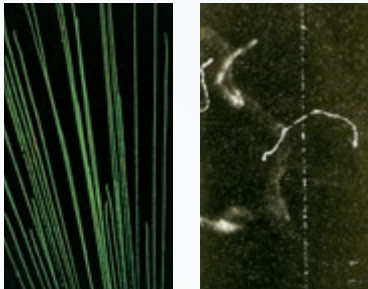
图5.1-2是威耳逊云室的实物照片。云室内部设计有可以上下移动的活塞，上盖是透明的，可以通过它观察粒子运动的径迹。

云室里面有干净的空气。实验时，先往云室里加少量酒精，使室内充满酒精的饱和蒸气，然后迅速向下拉动活塞，室内气体膨胀，温度降低，酒精蒸气达到过饱和状态。这时如果有粒子在室内气体中飞过，使沿途的气体分子电离，过饱和酒精蒸气就会以这些离子为核心凝结成雾滴，于是显示出粒子运动的径迹。这种云室是英国物理学家威耳逊在1912年发明的，叫作威耳逊云室。

图5.1-3中甲、乙两图分别是 $\alpha$ 射线和 $\beta$ 射线在云室中的径迹。 $\alpha$ 粒子的质量比较大，在气体中飞行时不易改变方向。由于它的电离本领大，沿途产生的离子多，所以它在云室中的径迹直而清晰。高速 $\beta$ 粒子的径迹又细又直，低速 $\beta$ 粒子的径迹又短又粗而且是弯曲的。 $\gamma$ 射线的电离本领很小，在云室中一般看不到它的径迹。



图 5.1-2 威耳逊云室



甲  $\alpha$  粒子      乙  $\beta$  粒子

图 5.1-3 粒子在威耳逊云室中的径迹

 原子核的组成

1919年，卢瑟福用镭放射出的 $\alpha$ 粒子轰击氮原子核，从氮原子核中打出了一种新的粒子（图5.1-4）。根据这种粒子

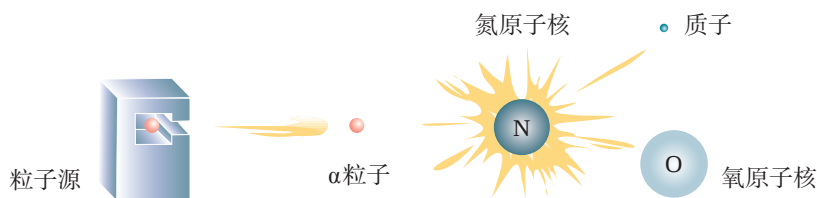


图 5.1-4  $\alpha$ 粒子轰击氮原子核示意图

在电场和磁场中的偏转，测出了它的质量和电荷量，原来它就是氢原子核，叫作**质子 (proton)**，用 **p** 表示。以后，人们用同样的方法从氟、钠、铝等原子核中都打出了质子，由此断定，质子是原子核的组成部分。

质子带正电荷，电荷量与一个电子的电荷量相等。质子的质量为

$$m_p = 1.672\,621\,898 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

### 思考与讨论

原子核是只由质子组成的吗？如果原子核中只有质子，那么，任何一种原子核的质量与电荷量之比，都应该等于质子的质量与电荷量之比。但事实是这样的吗？

实际情况并非如此。绝大多数原子核的质量与电荷量之比都大于质子的相应比值。卢瑟福猜想，原子核内可能还存在着另一种粒子，它的质量与质子相同，但是不带电，他把这种粒子叫作**中子 (neutron)**。1932年，卢瑟福的学生查德威克通过实验证实了这个猜想（图 5.1-5）。

中子不带电，用 **n** 表示。中子的质量是

$$m_n = 1.674\,927\,471 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

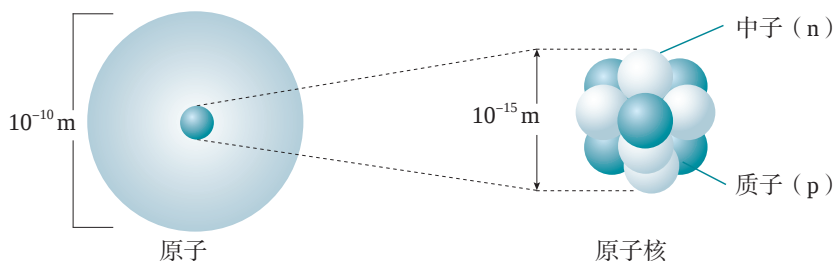


图 5.1-5 原子核的示意图

它与质子的质量非常接近，只比质子质量约大千分之一。

质子和中子除了是否带电的差异以及质量上的微小差别外，其余性质十分相似，而且，都是原子核的组成成分，所以统称为**核子**（nucleon）。

由于中子不带电，原子核所带的电荷等于核内质子电荷的总和。所以，原子核所带的电荷总是质子电荷的整数倍，通常用这个整数表示原子核的电荷量，叫作原子核的**电荷数**，用  $Z$  表示。原子核的质量等于核内质子和中子的质量的总和，而质子与中子的质量几乎相等，所以原子核的质量几乎等于单个核子质量的整数倍，这个倍数叫作原子核的**质量数**，用  $A$  表示。

原子核的电荷数就是核内的质子数，也就是这种元素的原子序数，而原子核的质量数就是核内的核子数。

原子核常用符号  ${}_Z^AX$  表示（图 5.1-6）， $X$  为元素符号， $A$  表示核的质量数， $Z$  表示核的电荷数（即原子序数）。例如，氢原子核可以表示为  ${}_1^1\text{H}$ ，有时也用它表示质子。氦原子核可以表示为  ${}_2^4\text{He}$ ，它有 2 个质子和 2 个中子，所以电荷数是 2，质量数是 4。又如， ${}_{92}^{238}\text{U}$  代表一种铀核，它的质量数为 238，电荷数为 92，即核内有 92 个质子、146 个中子。

元素的性质与原子核外的电子有密切的关系。同种元素的原子，质子数相同，核外电子数也相同，它们就会具有相同的化学性质。但是，它们的中子数可能不同。这些具有相同质子数而中子数不同的原子核组成的元素，在元素周期表中处于同一位置，因而互称**同位素**（isotope）。

氢有三种同位素，分别叫作氕（也就是通常说的氢）、氘（也叫重氢）、氚（也叫超重氢），符号分别是  ${}_1^1\text{H}$ 、 ${}_1^2\text{H}$ 、 ${}_1^3\text{H}$ （图 5.1-7）。

► 原子核的电荷数不是它所带的电荷量，质量数也不是它的质量。



图 5.1-6 原子核符号

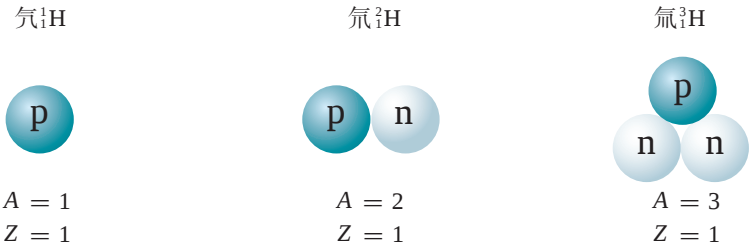


图 5.1-7 氢的同位素

## 天然放射现象的发现

1895 年末，德国物理学家伦琴发现了一种新的射线——X 射线，即伦琴射线。它具有一定的辐射性。现在我们知道，X 射线是原子内层电子跃迁时发射的波长很短的电磁波。但在当时并不知道这些，所以，它的发现激起了许多科学家的研究兴趣。

法国物理学家贝克勒尔对荧光研究了多年，他决定研究荧光与 X 射线的关系。1896 年初，他选择了在日光照晒时能发出荧光的铀盐——硫酸钾铀酰做实验材料。他用黑纸把照相底片包住，放到这种铀盐的下面，在阳光下曝晒了几小时。底片显影后，发现了铀盐在底片上的黑色轮廓，表示底片已经感“光”。阳光是不能透过黑纸的，贝克勒尔认为，这种铀盐受到阳光照射后除了能够发出可见的荧光外，还能发射 X 射线，是 X 射线透过黑纸使底片感光。再次准备实验的时候遇到了几个阴天，贝克勒尔只好把准备好的铀盐和包好的底片一起放进了抽屉。几天以后，贝克勒尔在检查底片时意外发现底片又已经感光。这个事实使贝克勒尔认为铀盐本身能够发射一种神秘的射线，正是这种射线导致了底片感光。1896 年 3 月 2 日，他在法国科学院例会上公布了这一发现。贝克勒尔进一步用不发荧光的其他铀化合物进行实验，发现也能使底片感光。铀化合物发出的射线也像 X 射线一样能穿透多种物质。他还发现，只要有铀元素存在，不论是什么化合物，就一定有这种贯穿本领很强的射线发出。贝克勒尔认为这种射线不是 X 射线；他还进一步指出，发出射线的能力是铀原子自身的性质。

1897 年，居里夫人在撰写博士论文时选择了贝克勒尔发现的射线作为研究课题。她首先证实，铀盐发出射线的强度只与化合物中铀的含量成正比，而与化合物的种类无关，也不受光照、加热、通电等因素的影响。由此，她确认这一现象的起因在于原子内部，并提出了“放射性”这个词，用来描写这一现象。

居里夫妇提出了一个重要的问题：是否还有其他元素也具有这种性质？他们决定检查当时知道的所有元素，结果发现钍也发射类似的射线。居里夫妇还发现，某些含有铀钍混合物矿石的辐射强度比已测到的铀和钍的放射性强得多，他们大胆假定这些矿石中含有当时尚不知晓的某种其他放射性元素，并一起开始了一项艰苦的工作：从沥青铀矿中分离这种新元素。1898 年 7 月，他们得到了一种放射性比铀强 400 倍的新元素，并把它命名为钋，以表达居里夫人对祖国波兰的热爱。同年 12 月，他们又发现了放射性比铀强百万倍的镭。镭的发现再次轰动了科学界，但是也有人怀疑它的存在。为了排除这一怀疑，居里夫妇经过艰苦繁重的工作，在几万次提炼之后，终于在 1902 年从 8 t 沥青铀矿渣中提炼出 0.12 g 纯净的氯化镭，向世人证实了镭元素的存在。

居里夫妇和贝克勒尔由于对放射性的研究而一起获得 1903 年的诺贝尔物理学奖。在发现镭射线的治癌功能后，他们认为这种济世救人之物应该属于全世界。当镭以昂贵的价格出现在市场上时，他们自己却甘愿过着清贫的生活。居里夫人在 1911 年又因镭和钋的发现而获得了诺贝尔化学奖，成为两次获得诺贝尔奖的科学家。

可能是由于长期受到射线的照射，居里夫人死于白血病。

1. 有什么事实和理由可以说明放射性元素放出的射线来自原子核的内部？天然放射现象的发现对物质微观结构的研究有什么意义？

2.  $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线和 $\gamma$ 射线中哪种射线更像X射线？为什么说 $\gamma$ 射线是能量很高的电磁波，它的波长就一定短？

3. 一个验电器带正电，因为空气干燥，验电器金属箔的张角能维持很长的时间。现有一束 $\alpha$ 射线射向这个验电器上端的金属球，验电器金属箔的张角将会怎样变化？为什么？

4. 当人们发现了质子，并在很多原子核中打出了质子以后，有什么理由可以认定原子核

中一定还存在着另外不同种类的粒子？

5. 用符号表示以下原子核，并说出原子核的质子数、中子数。

(1)  $\alpha$ 粒子。

(2) 质量数为14的碳原子核。

(3) 电荷数为8、质量数为17的氧原子核。

(4) 质量数为40的钾原子核。

(5) 电荷数为86、核子数为222的氡原子核。

6. 写出原子核中的中子数分别为0、1、2的三种氢的同位素符号。比较铀的三种同位素 ${}_{92}^{234}\text{U}$ 、 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 、 ${}_{92}^{238}\text{U}$ 的异同。

## 2 放射性元素的衰变

### 问题 ?

在古代，不论是东方还是西方，都有一批人追求“点石成金”之术，他们试图利用化学方法将一些普通的矿石变成黄金。当然，这些炼金术士的希望都破灭了。

那么，真的存在能让一种元素变成另一种元素的过程吗？



类似于“点石成金”的事一直就在自然界中进行着，这就是伴随着天然放射现象发生的原子核“衰变”过程。

### 原子核的衰变

原子核自发地放出 $\alpha$ 粒子或 $\beta$ 粒子，由于核电荷数变了，它在元素周期表中的位置就变了，变成另一种原子核。我们把这种变化称为原子核的**衰变**（decay）。

铀 238 放出一个 $\alpha$ 粒子后，质量数减少 4，电荷数减少 2，成为新核。这个新核就是钍 234（图 5.2-1）。

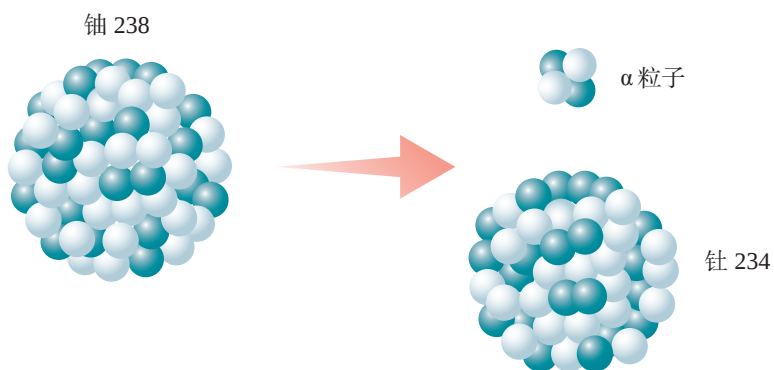
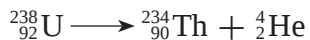


图 5.2-1  $\alpha$  衰变

这种衰变过程叫作 $\alpha$ 衰变。这个过程可以用下面的衰变方程表示



在这个衰变过程中，衰变前的质量数等于衰变后的质量数之和；衰变前的电荷数等于衰变后的电荷数之和。大量事实表明，**原子核衰变时电荷数和质量数都守恒**。

### 思考与讨论

在  $\alpha$  衰变中，新核的质量数与原来的核的质量数有什么关系？相对于原来的核在元素周期表中的位置，新核在元素周期表中的位置应当向前移还是向后移？要移动几位？你能概括出  $\alpha$  衰变的质量数、核电荷数变化的一般规律吗？

${}_{92}^{238}\text{U}$  在  $\alpha$  衰变时产生的  ${}_{90}^{234}\text{Th}$  也具有放射性，它能放出一个  $\beta$  粒子而变为  ${}_{91}^{234}\text{Pa}$ （镤）（图 5.2-2）。

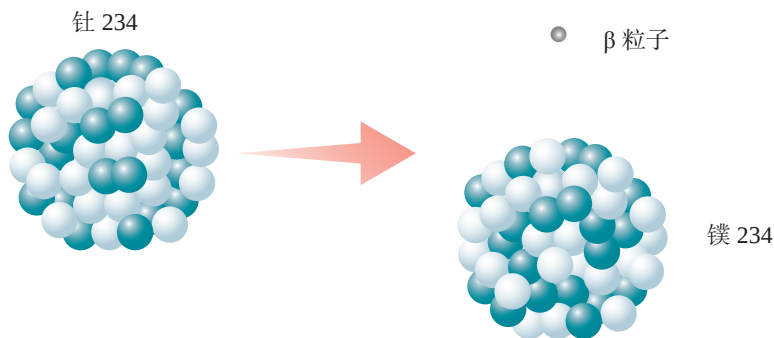


图 5.2-2  $\beta$  衰变

由于电子的质量比核子的质量小得多，因此，我们可以认为电子的质量数为 0、电荷数为  $-1$ ，可以把电子表示为  ${}_{-1}^0\text{e}$ 。这样，原子核放出一个电子后，因为其衰变前后电荷数和质量数都守恒，新核的质量数不会改变但其电荷数应当加 1。其衰变方程为<sup>①</sup>



放出  $\beta$  粒子的衰变叫作  $\beta$  衰变。

► “电荷数之和”指代数和，因为发生  $\beta$  衰变时，电子的电荷数是  $-1$ 。

<sup>①</sup> 发生  $\beta$  衰变时，除了产生电子  ${}_{-1}^0\text{e}$  外，还产生反电子中微子  $\bar{\nu}_e$ 。由于  $\bar{\nu}_e$  的质量数和电荷数都是 0，所以在中学教科书中一般都不写出。

## 思考与讨论

在 $\beta$ 衰变中，质量数、核电荷数有什么变化规律？原子核里没有电子， $\beta$ 衰变中的电子来自哪里？

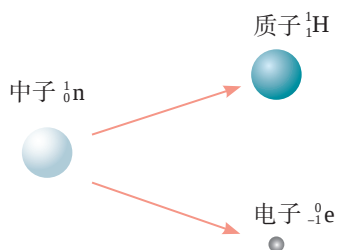


图 5.2-3 中子的转化

进一步的研究发现， $\beta$ 衰变的实质在于核内的中子转化成了一个质子和一个电子（图 5.2-3），其转化方程是



这种转化产生的电子发射到核外，就是 $\beta$ 粒子；与此同时，新核少了一个中子，却增加了一个质子。所以，新核质量数不变，而电荷数增加1。

事实表明，两个中子和两个质子能十分紧密地结合在一起，因此，在一定条件下它们会作为一个整体从较大的原子核中被抛射出来，于是，放射性元素就发生了 $\alpha$ 衰变。

原子核的能量也跟原子的能量一样，其变化是不连续的，也只能取一系列不连续的数值，因此，也存在着能级，同样是能级越低越稳定。

放射性的原子核在发生 $\alpha$ 衰变、 $\beta$ 衰变时产生的新核处于高能级，这时它要向低能级跃迁，并放出 $\gamma$ 光子。因此， $\gamma$ 射线经常是伴随 $\alpha$ 射线和 $\beta$ 射线产生的。当放射性物质连续衰变时，原子核中有的发生 $\alpha$ 衰变，有的发生 $\beta$ 衰变，同时伴随着 $\gamma$ 射线辐射。这时，放射性物质发出的射线中就会同时具有 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 三种射线。

## 半衰期

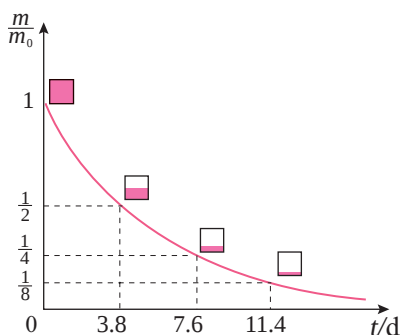


图 5.2-4 氡的衰变

放射性同位素衰变的快慢有一定的规律。例如氡222经过 $\alpha$ 衰变成为钋218。如图 5.2-4，横坐标表示时间，纵坐标表示任意时刻氡的质量 $m$ 与 $t = 0$ 时的质量 $m_0$ 的比值。如果隔一段时间测量一次剩余氡的数量就会发现，每过3.8 d就有一半的氡发生了衰变。也就是说，经过第一个3.8 d，剩有一半的氡；经过第二个3.8 d，剩有 $\frac{1}{4}$ 的氡；再经过3.8 d，剩有 $\frac{1}{8}$ 的氡……因此，我们可以用“半衰期”来表示放射性元素衰变的快慢。放射性元素的原子核有半数发生衰变

所需的时间，叫作这种元素的**半衰期**（half life）。

不同的放射性元素，半衰期不同，甚至差别非常大。例如，氡222衰变为钋218的半衰期是3.8 d，镭226衰变为氡222的半衰期是1 620年，铀238衰变为钍234的半衰期竟长达 $4.5 \times 10^9$ 年。

对于一个特定的氢原子，我们只知道它发生衰变的概率，而不知道它将何时发生衰变。一个特定的氢核可能在下1 s就衰变，也可能在10 min之内衰变，也可能在200万年之后再衰变。然而，量子理论可以对大量原子核的行为作出统计预测。例如，对于大量氢核，可以准确地预言在1 s后、10 min后，或200万年后，各会剩下百分之几没有衰变。放射性元素的半衰期，描述的就是这样的统计规律。

放射性元素衰变的快慢是由核内部自身的因素决定的，跟原子所处的化学状态和外部条件没有关系。例如，一种放射性元素，不管它是以单质的形式存在，还是与其他元素形成化合物，或者对它施加压力、提高温度，都不能改变它的半衰期。这是因为压力、温度或与其他元素的化合等，都不会影响原子核的结构。

► 衰变是微观世界里原子核的行为，而微观世界规律的特征之一在于“单个微观事件不可以预测”。

## 核反应

衰变是原子核的自发变化，科学家更希望人工控制原子核的变化。当初卢瑟福用 $\alpha$ 粒子轰击氮原子核，产生了氧的一种同位素——氧17和一个质子，即



这是人类第一次实现的原子核的人工转变。不仅用 $\alpha$ 粒子，用质子、中子甚至用 $\gamma$ 光子去轰击一些原子核，都可以实现原子核的转变，通过这种方式可以研究原子核的结构，还可以发现和制造新元素。

原子核在其他粒子的轰击下产生新原子核的过程，称为**核反应**（nuclear reaction）。与衰变过程一样，在核反应中，质量数守恒、电荷数守恒。

## 放射性同位素及其应用

很多元素都存在一些具有放射性的同位素，它们被称

► 与天然放射性物质相比，人工放射性同位素的放射强度容易控制，半衰期比较短，因此放射性废料容易处理，获得了广泛的应用。

为放射性同位素。天然放射性同位素不过40多种，而今天通过核反应生成的人工放射性同位素已达1 000多种，每种元素都有了自己的放射性同位素。丰富的放射性同位素资源在国民经济和科学研究的各个领域得到了广泛的应用。

**射线测厚仪** 工业部门可以使用放射性同位素发出的射线来测厚度。例如，轧钢厂的热轧机上可以安装射线测厚仪（图5.2-5），让 $\gamma$ 射线穿过钢板，仪器探测到的 $\gamma$ 射线强度与钢板的厚度有关，轧出的钢板越厚，透过的射线越弱。因此，将射线测厚仪接收到的信号输入计算机，就可以对钢板的厚度进行自动控制。

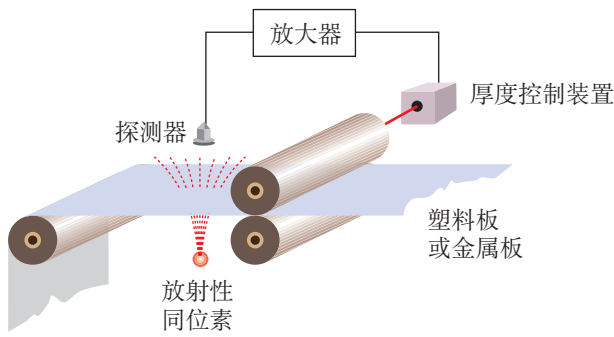


图 5.2-5 射线测厚装置



图 5.2-6 放射治疗

**放射治疗** 在医疗方面，患了癌症的病人可以接受钴60的放射治疗（图5.2-6）。为什么射线能够用于治疗癌症呢？原来人体组织对射线的耐受能力是不同的，细胞分裂越快的组织，它对射线的耐受能力就越弱。像癌细胞那样，不断迅速繁殖的、无法控制的细胞组织，在射线照射下破坏得比健康细胞快。



图 5.2-7 射线的照射能延长草莓的保质期

**培优、保鲜** 利用 $\gamma$ 射线照射种子，会使种子的遗传基因发生变异，经过筛选，可以培育出新品种。用 $\gamma$ 射线照射食品可以杀死使食物腐败的细菌，抑制蔬菜发芽，延长保存期（图5.2-7）。

**示踪原子** 一种放射性元素的原子核，跟这种元素其他同位素的原子核具有相同数量的质子，因此，核外电子的数量也相同。由此可知，一种元素的各种同位素都有相同的化学性质。这样，我们可以用放射性同位素代替非放射性的同位素来制成各种化合物，这种化合物的原子跟通常的化合物一样参与所有化学反应，但却带有“放射性标记”，可以用仪器探测出来。这种原子就是示踪原子。

棉花在开花、结桃的时候需要较多的磷肥，把磷肥喷在棉花叶子上，磷肥也能被吸收。但是，什么时候的吸收率最高、磷在作物内能存留多长时间、磷在作物体内的分布情况等，用通常的方法很难研究。如果用磷的放射性同位素制成肥料喷在棉花的叶面上，然后每隔一定时间用探测器测量棉株各部位的放射性强度，上面的问题就解决了。

人体甲状腺的工作需要碘，碘被吸收后聚集在甲状腺内。如图 5.2-8，给人注射碘的放射性同位素碘 131，在颈部底部的甲状腺（红色，部分被遮蔽），被放射性示踪剂碘 131 高亮着色。定时用探测器测量甲状腺及邻近组织的放射强度，有助于诊断甲状腺的疾病。

近年来，有关生物大分子的结构及其功能的研究，几乎都要借助于示踪原子。

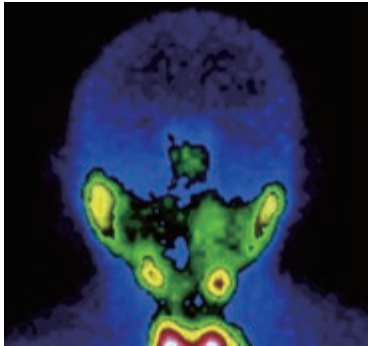


图 5.2-8 碘 131 用于甲状腺疾病的诊断

## 辐射与安全

人类一直生活在放射性的环境中。例如，地球上的每个角落都有来自宇宙的射线，我们周围的岩石，其中也有放射性物质。我们的食物和日常用品中，有的也具有放射性，例如，食盐和有些水晶眼镜片中含有钾 40，香烟中含有钋 210，这些也是放射性同位素，不过它们辐射的强度都在安全剂量之内。

然而过量的射线对人体组织有破坏作用，这些破坏往往是对细胞核的破坏，有时不会马上察觉。因此，在使用放射性同位素时，必须严格遵守操作规程，注意人身安全，同时，要防止放射性物质对空气、水源、用具等的污染。存在射线危险的地方，常能看到如图 5.2-9 所示的标志。



图 5.2-9 国际通用的放射性标志



### 碳 14 测年技术

自然界中的碳主要是碳 12，也有少量的碳 14。宇宙射线进入地球大气层时，同大气作用产生中子，中子撞击大气中的氮引发核反应产生碳 14。核反应方程为



碳 14 具有放射性，能够自发地进行  $\beta$  衰变而变成氮，核反应方程为



碳14的半衰期 $T_{1/2}$ 为5 730年。碳14不断产生又不断衰变，达到动态平衡，因此，它在大气中的含量相当稳定，大约每 $10^{12}$ 个碳原子中有一个碳14。活的植物通过光合作用和呼吸作用与环境交换碳元素，体内碳14的比例与大气中的相同。植物枯死后，遗体内的碳14仍在衰变，不断减少，但是不能得到补充。因此，根据放射性强度减小的情况就可以推算植物死亡的时间。

例如，要推断一块古木的年代，可以从中取出一些样品，测量样品中的碳14含量。如果含量是现代植物的 $\frac{1}{2}$ ，则说明这块古木的历史大概有碳14的一个半衰期 $T_{1/2}$ ，即5 730年。类似地，如果碳14含量是现代植物的 $\frac{1}{4}$ ，则古木历史大概是 $2T_{1/2}$ ，即11 460年……

在经济建设中也会用到碳14测定年代的方法。例如，进行基本建设时，地质基础的力学性质是个重要指标。一般说来，地层形成年代越早，固结程度越高，抗冲击性和承压性越好。北京饭店新楼施工时，在地面以下13 m深的位置发现了两棵直径达1 m的榆树。用碳14测定，这两棵树距今 $29\,285 \pm 1\,350$ 年。据此数据，建设部门认为这个地层已经足够古老，可以作为地基，于是停止下挖，这样就节约了资金。

## 练习与应用

1.  $\beta$ 射线是高速电子流。原子核中没有电子，为什么有些放射性元素的原子核会放出 $\beta$ 粒子？写出下列各放射性元素的 $\beta$ 衰变方程。

(1)  ${}^{244}_{83}\text{Bi}$  (铋核)。

(2)  ${}^{210}_{84}\text{Po}$  (钋核)。

2. 写出 ${}^{234}_{90}\text{Th}$  (钍核) 与 ${}^{66}_{29}\text{Cu}$  (铜核) 两种放射性元素的 $\alpha$ 衰变方程。 ${}^{238}_{92}\text{U}$  (铀核) 衰变为 ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  (氡核) 要经过几次 $\alpha$ 衰变，几次 $\beta$ 衰变？

3. 已知钍234的半衰期是24 d，1 g钍234经过120 d后还剩多少？若已知铋210的半衰期是5 d，经过多少天后，20 g铋210还剩1.25 g？

4. 原子核的人工转变与放射性元素的衰变有什么区别？

5. 写出下列原子核人工转变的核反应方程。

(1)  ${}^{23}_{11}\text{Na}$  (钠核) 俘获1个 $\alpha$ 粒子后放出

1个质子。

(2)  ${}^{27}_{13}\text{Al}$  (铝核) 俘获1个 $\alpha$ 粒子后放出1个中子。

(3)  ${}^{16}_8\text{O}$  (氧核) 俘获1个中子后放出1个质子。

(4)  ${}^{30}_{14}\text{Si}$  (硅核) 俘获1个质子后放出1个中子。

6. 完成下列核反应方程。

(1)  ${}^{19}_9\text{F} + {}^4_2\text{H} \longrightarrow {}^1_1\text{H} + (\quad)$ 。

(2)  ${}^{15}_5\text{B} + (\quad) \longrightarrow {}^1_0\text{n} + {}^{14}_5\text{B}$ 。

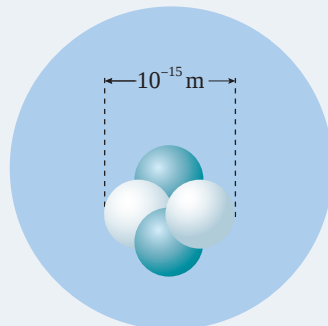
(3)  ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \longrightarrow (\quad) + {}^1_1\text{H}$ 。

7. 存在射线危险的地方，常能看到如图5.2-9所示的标志。你在什么地方见过这个标志？为了保护人身安全，在有这样的标志的场所，应该注意什么？

### 3 核力与结合能

#### 问题 ?

原子核是由中子和质子构成的。在原子核那样狭小的空间里，是什么力量把带正电的质子紧紧地束缚在一起而不飞散开呢？



#### 核力与四种基本相互作用

现代物理学认为，自然界存在着四种基本相互作用，即引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用。自然界中的各种力，都可以归结为这四种相互作用。

17世纪下半叶，人们发现了万有引力。正是万有引力把行星和恒星聚在一起（图 5.3-1），组成太阳系、银河系和其他星系。引力是自然界的一种基本相互作用，地面物体所受的重力只是引力在地球表面附近的一种表现。

19世纪后，人们逐渐地认识到，电荷间的相互作用、磁体间的相互作用，从本质上说是同一种相互作用的不同表现，这种相互作用称为**电磁相互作用**（electromagnetic interaction）或电磁力。它也是自然界的一种基本相互作用。我们知道，宏观物体中包含了大量带负电的电子和带正电的原子核。宏观物体之间的压力、拉力、弹力、支持力等等，都起源于这些电荷之间的电磁相互作用。

20世纪，物理学家发现原子核是由若干带正电荷的质子和不带电的中子组成的。然而，带正电的质子之间存在相互排斥的电磁力，这种斥力比它们之间的万有引力大得多，似乎质子与质子结合在一起是不可能的。物理学家们发现，原子核中的核子之间存在一种很强的相互作用，即存在一种核力，它使得核子紧密地结合在一起，形成稳定的原子核（图 5.3-2）。这种作用称为**强相互作用**（strong interaction）。与万有引力和电磁力不同，距离增大时，强



图 5.3-1 万有引力使众多恒星聚在一起形成星团

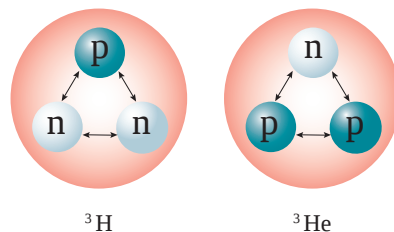


图 5.3-2 强相互作用可以存在于各种核子之间

相互作用急剧减小，它的作用范围只有约  $10^{-15}$  m，即原子核的大小，超过这个界限，这种相互作用实际上已经不存在了，它是短程力。这样，万有引力、电磁力和强相互作用分别在不同的尺度上发挥了作用。

19世纪末20世纪初，物理学家发现了放射现象。后来发现，在某些放射现象中起作用的还有另一种基本相互作用，称为**弱相互作用**（weak interaction）。<sup>①</sup>弱相互作用是引起原子核 $\beta$ 衰变的原因，即引起中子—质子转变的原因。弱相互作用也是短程力，其力程比强相互作用更短，只有  $10^{-18}$  m。

## 结合能

我们考虑下面的问题。相距很远的两个物体，由于万有引力而相互接近，运动速度越来越大，引力势能转化为动能。最后撞在一起，一部分动能变成热并散失掉了。两个物体为了结合而付出了代价——失去了一些能量，如果要把它们分开，还要重新赋予它们能量。

类似地，要使基态氢原子电离，也就是要从氢原子中把电子剥离，需要通过碰撞、施加电场、让氢原子吸收光子等途径使它得到相应的能量。

### 思考与讨论

如图 5.3-3，氦原子核是由两个质子和两个中子凭借核力结合在一起的，要把它们分开，需要吸收能量。反过来，4个核子结合成氦原子核要放出能量。那么，把核子分开需要的能量与核子结合放出的能量有什么关系？

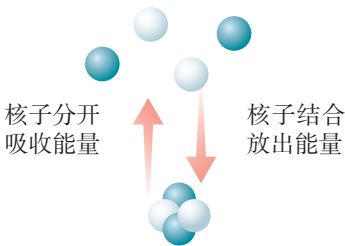


图 5.3-3

原子核是核子凭借核力结合在一起构成的，要把它们分开，也需要能量，这就是原子核的**结合能**（binding energy）。这个能量也是核子结合成原子核而释放的能量。

自然，组成原子核的核子越多，它的结合能越大。原子核的结合能与核子数之比，叫作**比结合能**（specific

<sup>①</sup> 1967 年，美国物理学家温伯格和巴基斯坦物理学家萨拉姆在美国物理学家格拉肖前期工作的基础上提出了电弱统一理论，把电磁相互作用和弱相互作用统一成了一种相互作用。他们三人因此获得了 1979 年的诺贝尔物理学奖。

binding energy)，也叫作平均结合能。比结合能越大，原子核中核子结合得越牢固，原子核越稳定。

## 质量亏损

原子核的结合能很难直接测量。幸好，爱因斯坦已经给我们指出了物体的能量与它的质量的关系，即

$$E = mc^2$$

单个的质子、中子的质量已经精确测定。用质谱仪或其他仪器测定某种原子核的质量，与同等数量的质子、中子的质量之和相比较，看一看两条途径得到的质量之差，就能推知原子核的结合能。

### 【例题】

已知中子的质量  $m_n$  为  $1.674\,9 \times 10^{-27}$  kg，质子的质量  $m_p$  为  $1.672\,6 \times 10^{-27}$  kg，氘核的质量  $m_D$  为  $3.343\,6 \times 10^{-27}$  kg，求氘核的比结合能。

**分析** 氘核是由 1 个质子和 1 个中子凭借核力结合在一起的，要把它们分开，需要吸收能量，这个能量就是氘核的结合能。由氘核的质量与同等数量的核子质量之间的差值就可以求出与这一质量亏损相对应的能量，再根据氘核的核子数求出氘核的比结合能。

**解** 单个的质子与中子的质量之和为

$$m_p + m_n = (1.672\,6 + 1.674\,9) \times 10^{-27} \text{ kg} = 3.347\,5 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

这个数值与氘核质量之差

$$\Delta m = (m_p + m_n) - m_D = (3.347\,5 - 3.343\,6) \times 10^{-27} \text{ kg} = 3.90 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

与这个质量差相对应的能量为

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 3.90 \times 10^{-30} \times (3.00 \times 10^8)^2 \text{ J} = 3.51 \times 10^{-13} \text{ J}$$

在核物理中，能量单位常常使用电子伏特 (eV)，即

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

所以，氘核的结合能是

$$\Delta E = \frac{3.51 \times 10^{-13}}{1.60 \times 10^{-19}} \text{ eV} = 2.19 \times 10^6 \text{ eV} = 2.19 \text{ MeV}$$

氘核的比结合能为

$$\frac{2.19 \text{ MeV}}{2} = 1.10 \text{ MeV}$$

通过这个例题可以看出，原子核的质量小于组成它的核子的质量之和，这个现象叫作**质量亏损**（mass defect）。质量亏损表明，的确存在着原子核的结合能。

不同原子核的比结合能是不一样的，图 5.3-4 是按照实际测量结果画的图线。可以看出，中等大小的核的比结合能最大（平均每个核子的质量亏损最大），这些核最稳定。

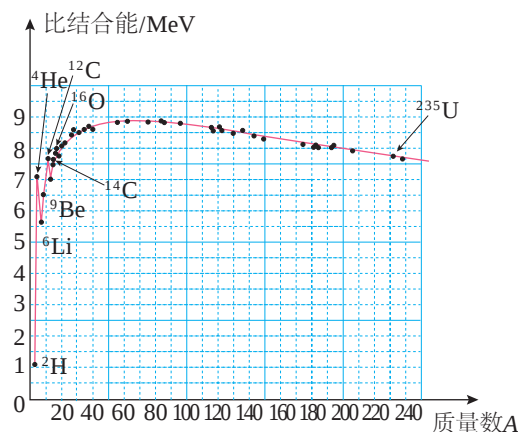


图 5.3-4



## 练习与应用

1. 从以下几个方面比较核反应与化学反应的相同和相异之处。

(1) 它们各自涉及四种基本相互作用中的哪一种？

(2) 每种反应分别改变了或重新安排了什么？

2. 为什么原子核的比结合能越大，原子核越稳定？

3. 生活中，我们常能看到物体的能量发生了变化，为什么觉察不到物体质量发生的变化？

4. 原子物理中常把碳12原子质量的  $\frac{1}{12}$  叫作“原子质量单位”，用  $1\text{ u}$  表示（ $1\text{ u} = 1.6606 \times 10^{-27}\text{ kg}$ ）。

请根据  $E = mc^2$  证明： $1\text{ u}$  相当于  $931.5\text{ MeV}$  的能量。已知光速  $c$  为  $2.9979 \times 10^8\text{ m/s}$ ，元电荷  $e$  为  $1.6022 \times 10^{-19}\text{ C}$ 。

5. 印刷“两弹一星”这四个字的油墨的质量大约是  $1\text{ }\mu\text{g}$ （ $10^{-9}\text{ kg}$ ）。与这些质量相当的能量如果完全用来增加重力势能，它可以使一架本身质量  $6000\text{ kg}$ 、载有  $60$  名体重  $50\text{ kg}$  学生的直升机升高多少？

6. 一个铀核衰变为钍核时释放一个  $\alpha$  粒子。在这个衰变过程中释放的能量等于多少焦耳？已知铀核的质量为  $3.853131 \times 10^{-25}\text{ kg}$ ，钍核的质量为  $3.786567 \times 10^{-25}\text{ kg}$ ， $\alpha$  粒子的质量为  $6.64672 \times 10^{-27}\text{ kg}$ 。

## 4 核裂变与核聚变

### 问题 ?

较重的核分裂成中等大小的核，较小的核合并成中等大小的核的过程中，都有可能释放出能量。核电站以及原子弹、氢弹等核武器，利用的就是这些核能。在这些装置中，核能是怎样被转化和使用的呢？



20世纪30年代，物理学家的一个重大发现改变了人类历史。原子核在“分裂或聚合”时，会释放出惊人的能量。

### 核裂变的发现

1938年底，德国物理学家哈恩和他的助手斯特拉斯曼在用中子轰击铀核的实验中发现，生成物中有原子序数为56的元素钡。奥地利物理学家迈特纳和弗里施对此给出了解释：铀核在被中子轰击后分裂成两块质量差不多的碎块（图5.4-1）。弗里施借用细胞分裂的生物学名词，把这类核反应定名为**核裂变**（nuclear fission）。

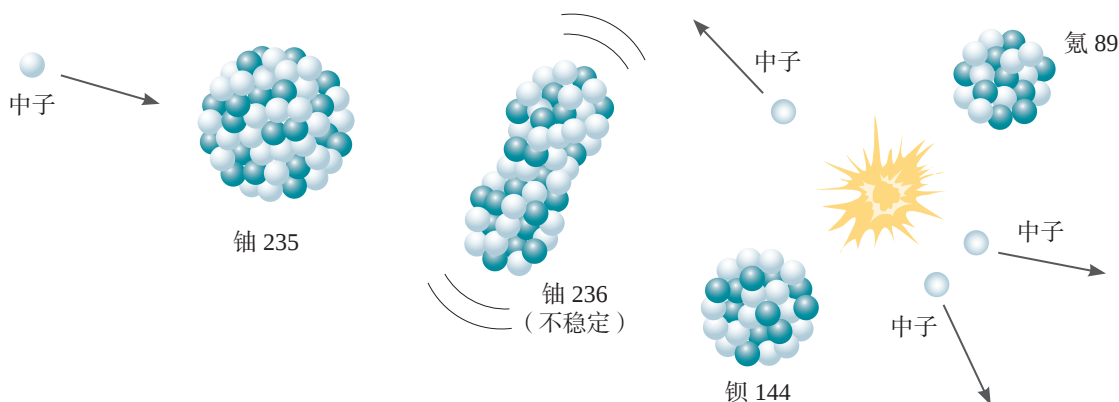


图 5.4-1 核裂变示意图

铀核裂变的产物是多样的，一种典型的铀核裂变是生成钡和氪（铀236为中间过程，不稳定），同时放出3个中

子，核反应方程是



核裂变中放出中子，数目有多有少，中子的速度也有快有慢。以铀235为例，核裂变时产生两或三个中子。如果这些中子继续与其他铀235发生反应，再引起新的核裂变，就能使核裂变反应不断地进行下去（图5.4-2）。这种由重核裂变产生的中子使核裂变反应一代接一代继续下去的过程，叫作核裂变的**链式反应**（chain reaction）。

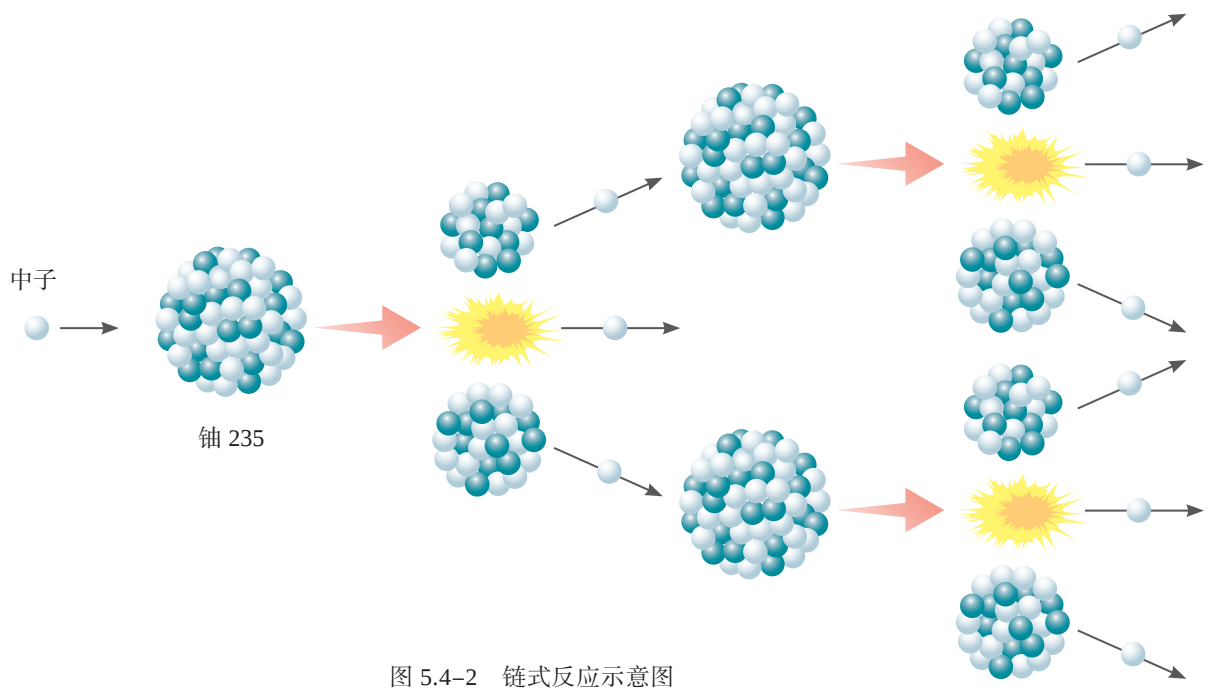


图 5.4-2 链式反应示意图

铀块的大小是链式反应能否进行的重要因素。原子核的体积非常小，原子内部的空隙很大，如果铀块不够大，中子在铀块中通过时，很有可能碰不到铀核而跑到铀块外面去，链式反应不能继续。只有当铀块足够大时，核裂变产生的中子才有足够大的概率打中某个铀核，使链式反应进行下去。通常把核裂变物质能够发生链式反应的最小体积叫作它的临界体积，相应的质量叫作临界质量。



钱三强（1913—1992）和他的夫人何泽慧（1914—2011）

我国科学家钱三强、何泽慧夫妇于1947年在实验中发现铀核也可能分裂为三部分或四部分，其概率大约是分裂为两部分的概率的  $\frac{1}{300}$  和  $\frac{1}{5\,000}$ 。这一研究成果得到了广泛的认可和赞誉。

铀核裂变时如果生成物不同，释放的能量也有差异。如果一个铀235核裂变时释放的能量按200 MeV估算，

1 kg 铀 235 全部裂变时放出的能量就相当于 2 800 t 标准煤<sup>①</sup>  
完全燃烧时释放的化学能！

 拓展学习

原子弹

原子弹是利用重核裂变的链式反应制成的，在极短时间内能够释放大量核能，发生猛烈爆炸。

原子弹的燃料是铀 235 或钚 239。在天然铀中只有 0.7% 的铀 235，剩下的 99.3% 是不易核裂变的铀 238。为得到高浓度的铀 235，就必须进行同位素分离，形成铀 235 含量较高的浓缩铀。钚 239 在自然界并不存在，人们利用核反应堆中产生的中子打击铀 238，生成物衰变后成为钚 239，然后再利用化学方法将钚 239 从铀 238 中分离出来。

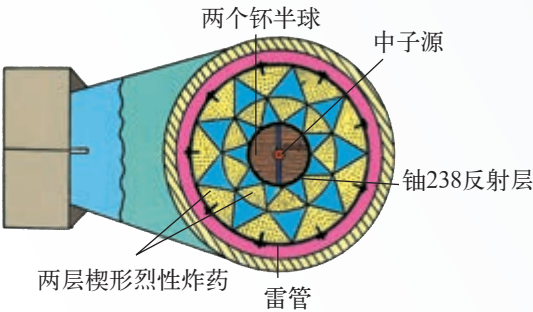


图 5.4-3 内爆式原子弹示意图

图 5.4-3 是“内爆式”原子弹结构图。核燃料一般被分成若干块放置，每块的体积都小于临界体积。它的外部安放化学炸药，引爆时利用化学炸药爆炸的冲击波将核燃料压缩至高密度的超临界状态，聚心冲击波同时压缩放在核燃料球心的中子源，使它释放中子，引起核燃料的链式反应。其中，中子源的四周用铀 238 做成中子反射层，使逸出燃料区的部分中子返回，从而，降低中子逃逸率以减小临界质量，节省核燃料。

反应堆与核电站

原子核的链式反应也可以在人工控制下进行。这样，释放的核能就可以为人类的和平建设服务。其实，在第一个原子弹制成以前，科学家们已经实现了核能的可控释放。1942 年，美籍意大利物理学家费米就主持建立了世界上第一个称为“核反应堆”的装置，首次通过可控制的链式反应实现了核能的释放。

图 5.4-4 是当前普遍使用的“热中子（慢中子）”核反应堆的示意图。实际上，中子的速度不能太快，否则会与铀 235 “擦肩而过”，铀核不能“捉”住它，不能发生核裂变。实验证明，速度与热运动速度相当的中子最适于引发核裂变。这样的中子就是“热中子”，或称慢中子。但是，核裂

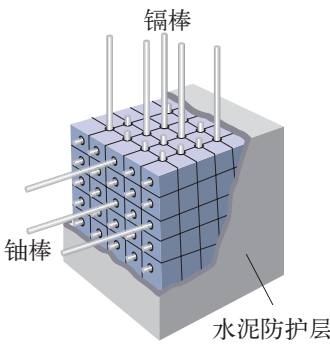


图 5.4-4 反应堆示意图

► 热中子反应堆的核燃料是铀棒，成分是天然铀或浓缩铀（铀 235 的含量占 2% ~ 4%）。

<sup>①</sup> 1 t 标准煤燃烧时放出  $2.93 \times 10^{10}$  J 的热量。

► 重水是两个氘原子与一个氧原子形成的化合物，它的化学性质与普通水相同，但分子质量比普通水的大。

变产生的是速度很大的快中子，因此，还要设法使快中子减速。为此，在铀棒周围要放“慢化剂”，快中子跟慢化剂中的原子核碰撞后，中子能量减少，变为慢中子。常用的慢化剂有石墨、重水和普通水（也叫轻水）。

为了调节中子数目以控制反应速度，还需要在铀棒之间插进一些镉棒。镉吸收中子的能力很强，当反应过于激烈时，将镉棒插入深一些，让它多吸收一些中子，链式反应的速度就会慢一些。这种镉棒叫作控制棒。

核燃料发生核裂变释放的能量使反应区温度升高。水或液态的金属钠等流体在反应堆内外循环流动，把反应堆内的热量传输出去，用于发电，同时也使反应堆冷却。

如图 5.4-5，反应堆放出的热使水变成水蒸气，这些高温高压的蒸汽推动汽轮发电机发电。这一部分的工作原理跟火力发电站相同。

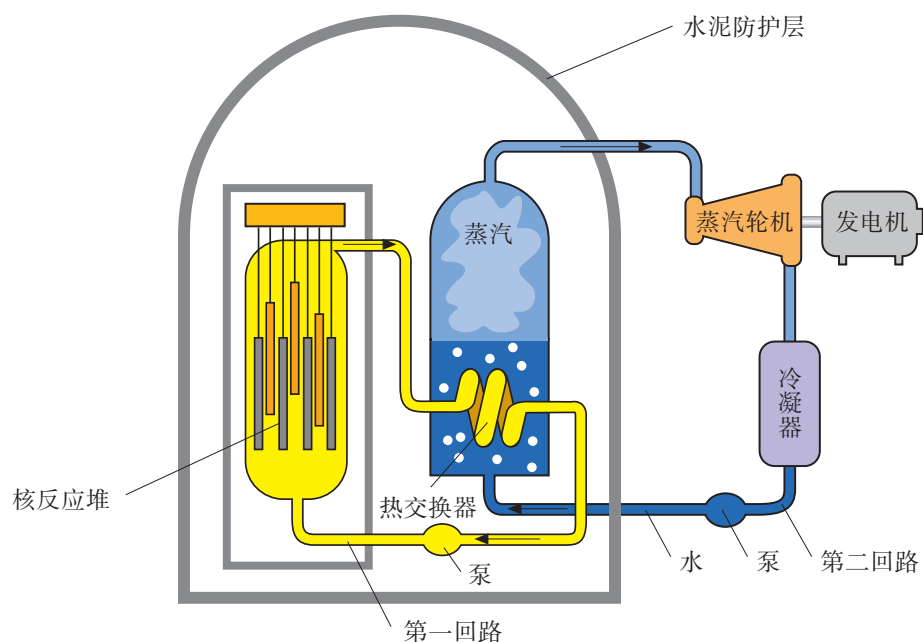


图 5.4-5 核电站工作流程

第一回路中的水被泵压入反应堆，通过堆芯时核反应放出的热使水的内能增加，水温升高，进入热交换器后，把热量传给第二回路的水，然后又被泵压回反应堆里。

在热交换器内，第二回路中的水被加热生成高温高压蒸汽，驱动汽轮机运转。

在核电站中，只要“烧”掉一支铅笔那么多的核燃料，释放的能量就相当于 10 t 标准煤完全燃烧放出的热。一座百万千瓦级的核电站，每年只消耗 30 t 左右的浓缩铀，而

同样功率的火电站，每年要烧煤  $2.5 \times 10^6 \text{ t}$ ！

建造核电站时需要特别注意防止放射线和放射性物质的泄漏，以避免射线对人体的伤害和放射性物质对水源、空气和工作场所造成放射性污染。为此，在反应堆的外面需要修建很厚的水泥层，用来屏蔽裂变产物放出的各种射线。核反应堆中的核废料具有很强的放射性，需要装入特制的容器，深埋地下。

## 核聚变

两个轻核结合成质量较大的核，这样的核反应叫作**核聚变**（nuclear fusion）。如图5.4-6，一个氘核与一个氚核聚合成一个氦核的同时放出一个中子，释放17.6 MeV的能量，平均每个核子放出的能量在3 MeV以上，比核裂变反应中平均每个核子放出的能量大3~4倍。这时的核反应方程是

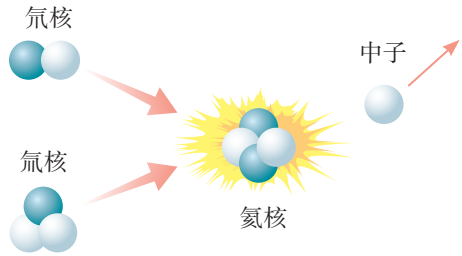


图 5.4-6 核聚变示意图



## 思考与讨论

要使轻核发生核聚变，必须使它们的距离达到  $10^{-15} \text{ m}$  以内，核力才能起作用。由于原子核都带正电，要使它们接近到这种程度，必须克服巨大的库仑斥力。也就是说，原子核要有很大的动能才会“撞”到一起。什么办法能使大量原子核获得足够的动能而发生核聚变呢？

有一种办法，就是把它们加热到很高的温度。当物质的温度达到几百万开尔文时，剧烈的热运动使得一部分原子核具有足够的动能，可以克服库仑斥力，碰撞时十分接近，发生核聚变。因此，核聚变又叫热核反应。热核反应一旦发生，就不再需要外界给它能量，靠自身产生的热就会使反应继续下去。

实际上，热核反应在宇宙中时时刻刻地进行着，太阳就是一个巨大的热核反应堆（图5.4-7）。太阳的主要成分是氢。太阳的中心温度达  $1.6 \times 10^7 \text{ K}$ 。在这样的高温下，氢核聚变成氦核的反应不停地进行着，不断地放出能量。太阳每秒辐射出的能量约为  $3.8 \times 10^{26} \text{ J}$ ，相当于1 000亿亿吨

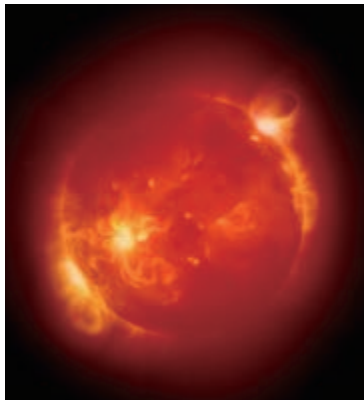


图 5.4-7 太阳

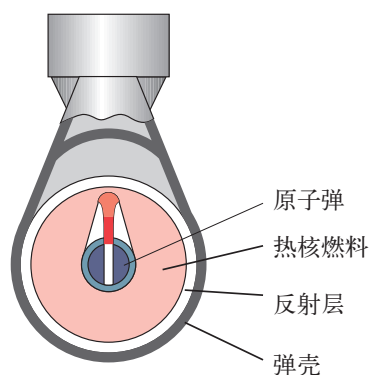


图 5.4-8 氢弹原理图

煤燃烧所放出的能量，其中 20 亿分之一左右的能量被地球接收。现在地球上消耗的能量，追根溯源，绝大部分还是来自太阳，即太阳内部核聚变时释放的核能。

太阳在“核燃烧”的过程中“体重”不断减轻。它每秒有 7 亿吨原子核参与反应。科学家估计，太阳的这种“核燃烧”还能维持几十亿年。当然，与人类历史相比，这个时间很长很长！太阳的寿命已经有 50 亿年了。

目前，人工产生的热核反应主要用在核武器上，那就是氢弹。氢弹原理如图 5.4-8 所示，首先由化学炸药引爆原子弹，再由原子弹爆炸产生的高温高压引发热核爆炸。

此外，人们也一直在努力尝试实现可控的人工核聚变，进而利用核聚变中的能源。与核裂变相比，核聚变有很多优点。第一，轻核聚变产能效率高，也就是说，相同质量的核燃料，反应中产生的能量比较多。第二，地球上核聚变燃料氘和氚储量丰富。第三，轻核聚变更安全、清洁。

然而，核聚变需要的温度太高，地球上没有任何容器能够经受如此高的温度。这构成了实现可控核聚变的主要困难。为了解决这个难题，科学家设想了两种方案，即磁约束和惯性约束。

**磁约束** 带电粒子运动时，在匀强磁场中会由于洛伦兹力的作用而不飞散，因此有可能利用磁场来约束参加反应的物质，这就是磁约束。如图 5.4-9，环流器（即

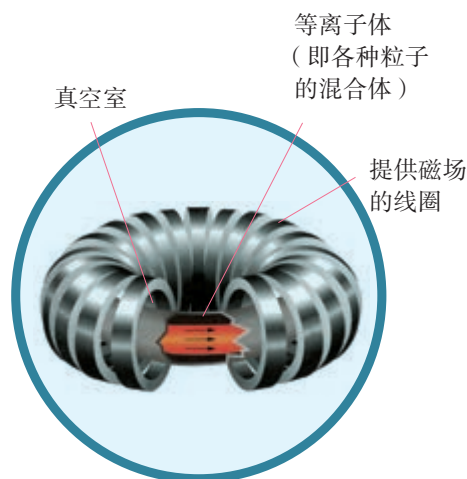


图 5.4-9 环流器的结构示意图



图 5.4-10 中国科学院的环流器装置

tokamak，音译为托卡马克）是目前性能最好的一种磁约束装置。图 5.4-10 是中国科学院的环流器装置 EAST。

**惯性约束** 利用核聚变物质的惯性进行约束。在惯性约束下，可以用高能量密度的激光或 X 射线从各个方向照射参加反应物质，使它们“挤”在一起发生反应。由于核聚变反应的时间非常短，被“挤”在一起的核聚变物质因自身的惯性还来不及扩散就完成了核反应（图 5.4-11）。在我国，中国工程物理研究院等单位建造了“神光Ⅲ”激光约束核聚变研究装置。总的来说，实现受控核聚变还有一段很长的路要走。

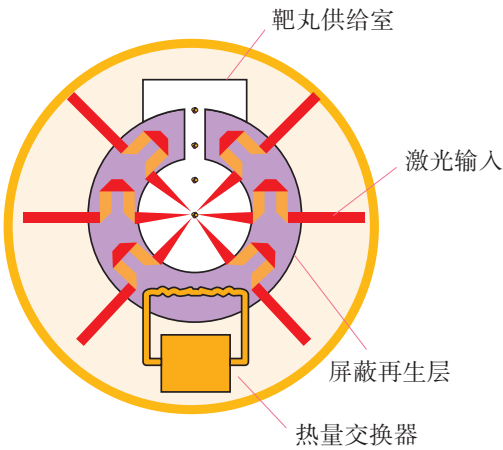


图 5.4-11 惯性约束示意图

### 练习与应用

1. 什么是核裂变？什么是链式反应？
2. 在核反应堆中，用什么方法控制核裂变的速率？
3. 什么是核聚变？核聚变过程中的能量转化有什么特点？
4. 请分析：在地球上实现受控热核反应的必要性、可能性和困难是什么？
5. 在一个反应堆中用石墨做慢化剂使快中子减速。碳核的质量是中子的 12 倍，假设中子与碳核的每次碰撞都是弹性正碰，而且认为碰撞前碳核都是静止的。  
(1) 设碰撞前中子的动能是  $E_0$ ，经过一次

- 碰撞，中子失去的动能是多少？  
(2) 至少经过多少次碰撞，中子的动能才能小于  $10^{-6} E_0$ ？
6. 泰山核电站第一期工程装机容量为  $3 \times 10^8 \text{ W}$ 。如果 1 g 铀 235 完全核裂变时产生的能量为  $8.2 \times 10^{10} \text{ J}$ ，并且假定所产生的能量都变成了电能，那么每年要消耗多少铀 235？
  7. 太阳的总输出功率为  $3.8 \times 10^{26} \text{ W}$ ，它来自三种核反应，这些反应的最终结果是氢转变为氦  ${}^4_2\text{He}$ 。按照总输出功率计算，太阳每秒失去多少质量？

## 5 “基本”粒子

### 问题 ?

图中显示的是质子对质子碰撞后粒子的轨迹。20世纪，人们通过对粒子碰撞和宇宙线的观测，发现了很多新粒子。这些新发现的粒子分为哪几类？彼此间有什么关系？



直到19世纪末，人们都认为原子是组成物质的不可再分的最小微粒。后来发现了电子、质子和中子，并且知道了原子核和电子组成了原子，质子和中子组成了原子核。于是许多人认为光子、电子、质子和中子是组成物质的不可再分的最基本的粒子，并把它们叫作“基本粒子”。然而，随着科学的进一步发展，科学家们认识到这些粒子并不“基本”。这是因为，一方面，科学家们逐渐发现了数以百计的不同种类的新粒子，它们并不能看作由质子、中子、电子组成的；另一方面，科学家们又发现质子、中子等本身也有自己的复杂的结构。所以，从20世纪后半期起，就将“基本”二字去掉，统称为粒子。

### 发现新粒子

从20世纪30年代以来，人们在对宇宙线的研究中陆续发现了一些新的粒子。1932年发现了正电子，1937年发

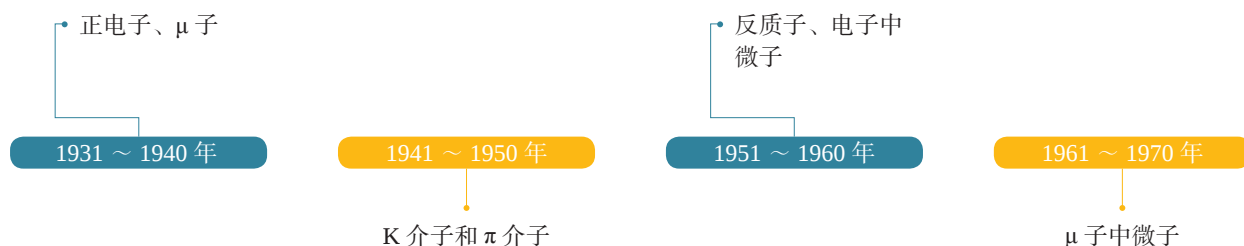


表 部分新粒子的实验发现年代

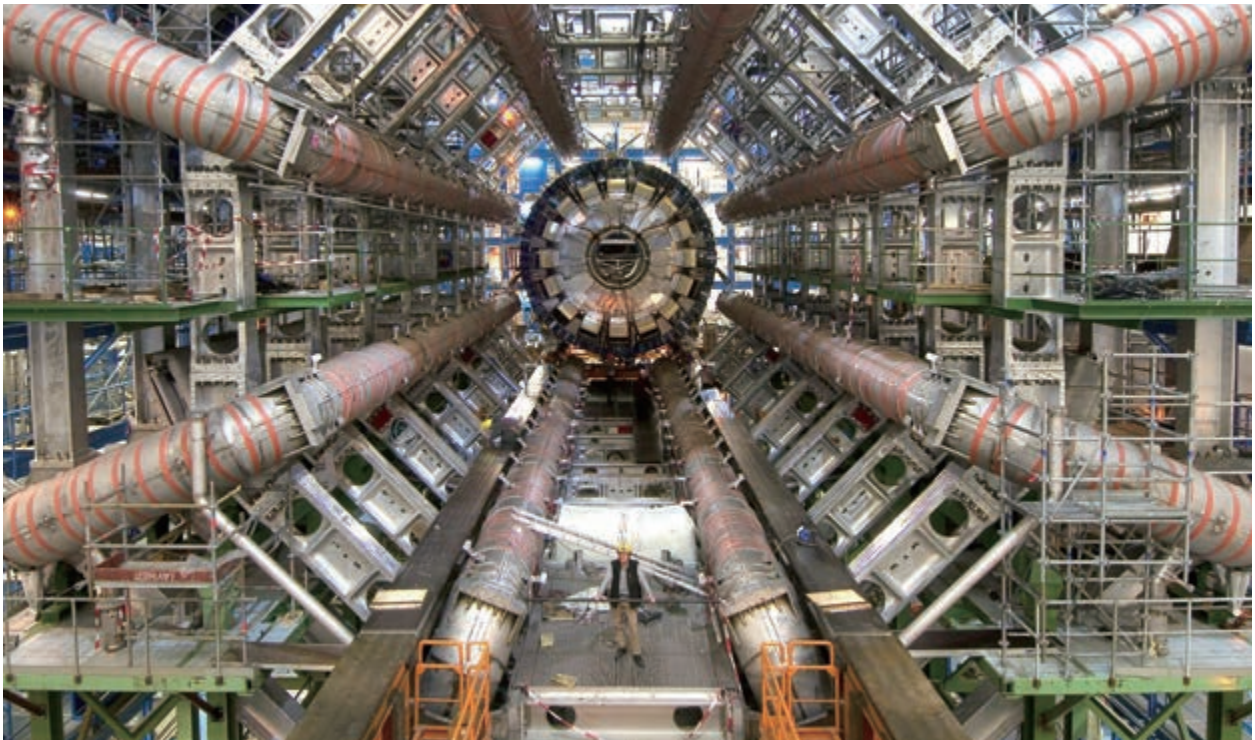
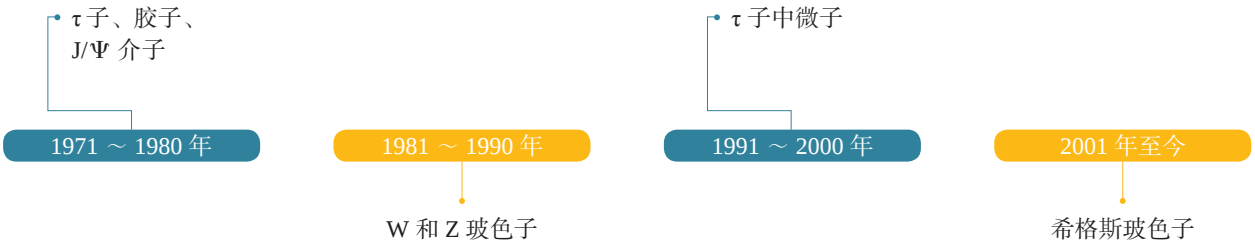


图 5.5-1 大型强子对撞机内部设备的一个局部

现了 $\mu$ 子，1947年发现了K介子和 $\pi$ 介子。后来还发现了一些粒子，质量比质子的质量大很多，叫作超子。

1932年发明的粒子加速器，能使带电粒子加速到很高的能量。让这些高能粒子彼此对撞，就能产生更多的粒子，这种装置称为对撞机。利用加速器和对撞机，人们发现了更多的粒子。粒子物理的研究不再单纯依赖宇宙线。高能量的对撞机往往极为庞大和复杂。如图5.5-1，欧洲核子研究中心的大型强子对撞机是世界上最庞大的科学装置之一，放置在一个周长27 km的圆形地下隧道内。它由全球85个国家的大学与研究机构，逾8 000位物理学家合作兴建，建造过程历时十余年。

下表呈现的是自20世纪30年代至今物理学家通过实验发现的一部分新粒子。



实验中发现，存在着这样一类粒子，它们的质量、寿命、自旋等物理性质与过去已经发现的粒子相同，而电荷等其他性质相反，这些粒子叫作反粒子。例如，电子的反粒子是正电子，它的电荷量与电子相同，但带的是正电荷。质子的反粒子是反质子，它的电荷量与质子相同，但带的是负电荷。

## 粒子的分类

现在已经发现的粒子达400多种。它们大体可被分为强子、轻子、规范玻色子和希格斯玻色子几种类别。

**强子** 强子是参与强相互作用的粒子。质子和中子都是强子。

**轻子** 轻子不参与强相互作用。最早发现的轻子是电子，后来发现的轻子有电子中微子、 $\mu$ 子、 $\mu$ 子中微子以及 $\tau$ 子和 $\tau$ 子中微子。每种轻子都有对应的反粒子。目前发现的轻子只有这6种，其中 $\tau$ 子的质量比核子的质量还大，但从相互作用的性质上讲它仍然属于轻子。现代实验还没有发现轻子的内部结构。

**规范玻色子** 规范玻色子是传递各种相互作用的粒子，如光子、中间玻色子（W和Z玻色子）、胶子。光子传递电磁相互作用，中间玻色子传递弱相互作用，胶子传递强相互作用。

**希格斯玻色子** 希格斯玻色子是希格斯场的量子激发。基本粒子因与希格斯场耦合而获得质量。希格斯玻色子是这几种基本粒子中最后一个被发现的。2012年，欧洲核子研究中心利用大型强子对撞机发现了希格斯玻色子。



### 拓展学习

#### 夸克与粒子物理标准模型

许多实验事实表明，强子是有内部结构的（图5.5-2）。1964年，美国科学家盖尔曼等人提出了夸克模型，认为强子由更基本的成分组成，这种成分叫作夸克。夸克模型经过几十年的发展，已经被多数物理学家接受。夸克有6种，它们是上夸克、下夸克、奇异夸克、粲夸克、底夸克、顶夸克，它们带的电荷分别为元电荷的 $+\frac{2}{3}$ 或 $-\frac{1}{3}$ 。每种夸克都有对应的反夸克。到目前为止，人们已经从实验中发现了所有6种夸克及其反夸克存在的证据。由于对粒子物理学方面的贡献，盖尔曼获得了1969年的诺贝尔物理学奖。

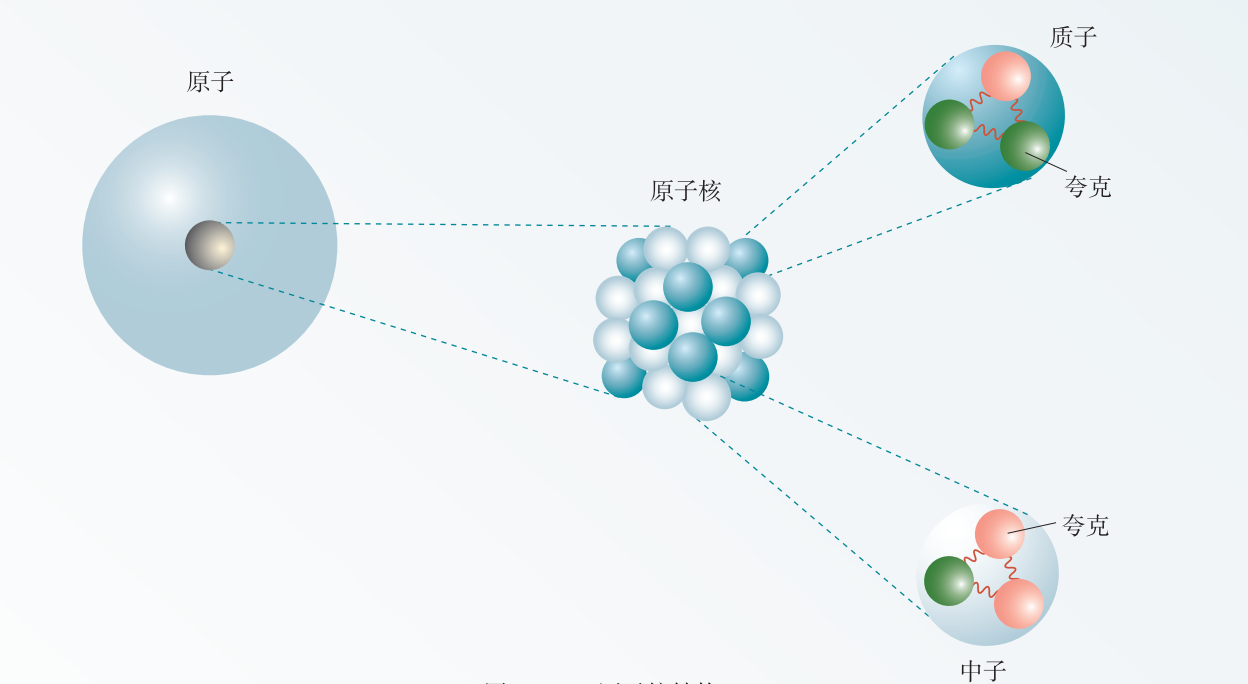


图 5.5-2 原子核结构

夸克模型的提出是物理学发展中的一个重大突破，它指出电子电荷不再是电荷的最小单元，即存在分数电荷。科学家们直到今天还从未捕捉到自由的夸克。夸克不能以自由的状态单个出现，这种性质称为夸克的“禁闭”。

在夸克模型的基础上，科学家们发展出了描述强相互作用的系统理论——量子色动力学。以量子色动力学和电弱统一理论为核心，人们已经完成了一整套关于粒子的理论，称为粒子物理标准模型。标准模型和大量实验吻合得很好，取得了很大的成功。在标准模型中，夸克、轻子、规范玻色子和希格斯玻色子是组成物质的几类最基本的粒子（图 5.5-3）。

|    |                  |                         |                           |                  |             |
|----|------------------|-------------------------|---------------------------|------------------|-------------|
| 夸克 | u<br>上夸克         | c<br>粲夸克                | t<br>顶夸克                  | g<br>胶子          | H<br>希格斯玻色子 |
|    | d<br>下夸克         | s<br>奇异夸克               | b<br>底夸克                  | $\gamma$<br>光子   |             |
|    | e<br>电子          | $\mu$<br>$\mu$ 子        | $\tau$<br>$\tau$ 子        | $Z^0$<br>Z 玻色子   |             |
|    | $\nu_e$<br>电子中微子 | $\nu_\mu$<br>$\mu$ 子中微子 | $\nu_\tau$<br>$\tau$ 子中微子 | $W^\pm$<br>W 玻色子 | 规范玻色子       |
| 轻子 |                  |                         |                           |                  |             |

图 5.5-3 标准模型中最基本的粒子类型

### 华人科学家在粒子物理学领域的杰出贡献

在粒子物理学的发展史上，有一批华人科学家作出了众多举世瞩目并被载入史册的重大贡献。

1930 年，在美国加州理工学院学习的赵忠尧和英国剑桥大学的科学家各自独立地发现硬  $\gamma$  射线在重元素中的“反常吸收”。同年，他又发现了  $\gamma$  射线在重元素中的“额外散射”。这实际上是对正负电子对产生和湮灭过程的最早观察（尽管赵忠尧当时并未意识到这一点）。更重要的是，他的实验结果直接激发美国物理学家安德森完成了发现正电子的著名实验。

1933 年，谢玉铭和美国科学家豪斯顿合作对氢原子光谱进行了精准测量，发现测量结果和当时的理论有差异，并提出这可能是由于当时关于光和物质相互作用的理论还需要改进。他们发现的这个问题被美国物理学家兰姆等人的实验进一步确认，而理论确实因此而作了重要改进。粒子物理学中极其重要的重整化理论就是由此诞生的。

1942 年，王淦昌提出证实中微子存在的一种实验方案：观察轻原子 K 俘获过程中的核反冲。半年后，美国物理学家阿伦照此方案进行实验，找到了中微子。王淦昌还预言在 100 亿电子伏特质子同步加速器上有可能找到反超子，并于 1959 年找到了一个与反西格玛负超子有关的事例。

1954 年，杨振宁和美国物理学家米尔斯提出了杨—米尔斯规范场理论。后来的电弱统一理论和量子色动力学都是在杨—米尔斯规范场理论的基础上建立的。

1956 年，李政道和杨振宁提出，在弱相互作用过程中宇称不守恒，并提出了实验验证的建议。

1957 年，吴健雄领导的小组在钴 60 的衰变中证实了宇称不守恒的论断。不久，宇称不守恒在其他弱相互作用过程中也得到了证实。为此，杨振宁、李政道获得 1957 年的诺贝尔物理学奖。

1974 年，丁肇中领导的小组发现了一种新的粒子。这种粒子有两个奇怪的性质：质量大，大约是质子质量的 3.3 倍；寿命长，比一般介子的寿命长 5 000 倍。这个发现证实了人们对存在第四种夸克——粲夸克的预测。美国科学家里克特也在这一年独立地发现了这种粒子，丁肇中与里克特共获 1976 年的诺贝尔物理学奖。这种新粒子被命名为  $J/\Psi$  介子。

 练习与应用

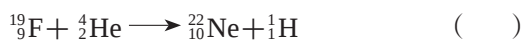
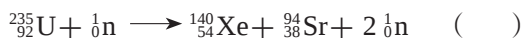
1. 请设计和绘制一个合理的表格，在表格中填入相关的内容，全面概括你对粒子分类的了解。

2. 查找华人科学家在粒子物理领域的成果和事迹，写一篇文章，并与同学交流。

## A 组

1. 把铀矿石放在一只玻璃管内，过几天在管内发现了氦气。怎样解释这一现象？

2. 目前，我们学习过的核反应有 4 种类型：衰变、核裂变、核聚变和人工核转变。请在下列方程后的括号内填写正确的类型。



3. 一个  $\alpha$  粒子融合到一个  ${}_{8}^{16}\text{O}$  核中，写出这个核反应的方程式。这个反应式左右两边的原

子核相比，哪边具有较多的结合能？

4. 在火星上太阳能电池板发电能力有限，因此科学家用放射性材料—— $\text{PuO}_2$  作为发电能源为火星车供电。 $\text{PuO}_2$  中的 Pu 元素是  ${}_{94}^{238}\text{Pu}$ 。

(1) 写出  ${}_{94}^{238}\text{Pu}$  发生  $\alpha$  衰变的核反应方程。

(2)  ${}_{94}^{238}\text{Pu}$  的半衰期是 87.7 年，大约要经过多少年会有 87.5% 的原子核发生衰变？

5. 已知  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ 、 ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ 、 ${}_2^4\text{He}$  的原子量分别是 226.025 4、222.017 5、4.002 6。求出  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  在  $\alpha$  衰变过程中放出的能量（以电子伏特为单位）。

## B 组

1. 钍 232 经过 6 次  $\alpha$  衰变和 4 次  $\beta$  衰变后变成一种稳定的元素。这种元素是\_\_\_\_，它的质量数是\_\_\_\_，原子序数是\_\_\_\_。

2. 某放射性元素经过 6 d 后，只剩下  $\frac{1}{8}$  没有衰变，它的半衰期是多少天？为估算某水库的库容，可取一瓶无毒的该放射性元素的水溶液，测得瓶内溶液每分钟衰变  $8 \times 10^7$  次。现将这瓶溶液倒入水库，8 d 后在水库中取水样  $1.0 \text{ m}^3$ （可认为溶液已均匀分布），测得水样每分钟衰变 20 次。请估算水库中水的体积。

3. 两个氦核结合成一个氦核，已知氦核质量为  $2.014 1 \text{ u}$ ，氦核质量为  $4.002 6 \text{ u}$ 。求出  $1 \text{ kg}$  氦完全结合成氦时可以释放出的能量。阿伏加德罗常数  $N_A$  为  $6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ， $m_{\text{氦}}$  为  $2 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ， $1 \text{ u}$  相当于  $931.5 \text{ MeV}$  的能量。

4. 钚的放射性同位素  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  静止时衰变为铀核激发态  ${}_{92}^{235}\text{U}^*$  和  $\alpha$  粒子，而铀核激发态  ${}_{92}^{235}\text{U}^*$  立即衰变为铀核  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ，并放出能量为  $0.097 \text{ MeV}$  的  $\gamma$  光子。已知  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  的质量  $m_{\text{Pu}}$  为

$239.052 1 \text{ u}$ 、 ${}_{92}^{235}\text{U}$  的质量  $m_{\text{U}}$  为  $235.043 9 \text{ u}$  和  $\alpha$  粒子的质量  $m_{\alpha}$  为  $4.002 6 \text{ u}$ ，且  $1 \text{ u}$  相当于  $931.5 \text{ MeV}$  的能量。

(1) 写出衰变方程。

(2) 已知衰变放出的光子的动量可忽略，求  $\alpha$  粒子的动能。

5. 核电站利用核反应堆工作时释放出的热能使水汽化以推动汽轮发电机发电。请解答以下问题，计算结果保留两位有效数字。

(1) 核反应堆中的“燃料”是  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ，请完成核反应方程式：



(2) 铀核的质量  $m_{\text{U}}$  为  $235.043 9 \text{ u}$ ，中子的质量  $m_{\text{n}}$  为  $1.008 7 \text{ u}$ ，锶 (Sr) 核的质量  $m_{\text{Sr}}$  为  $89.907 7 \text{ u}$ ，氙 (Xe) 核的质量  $m_{\text{Xe}}$  为  $135.907 2 \text{ u}$ ， $1 \text{ u}$  为  $1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，浓缩铀中铀 235 的含量占 2%。求一座 100 万千瓦的核电站每年 ( $t = 3.15 \times 10^7 \text{ s}$ ) 大约需要多少吨浓缩铀？

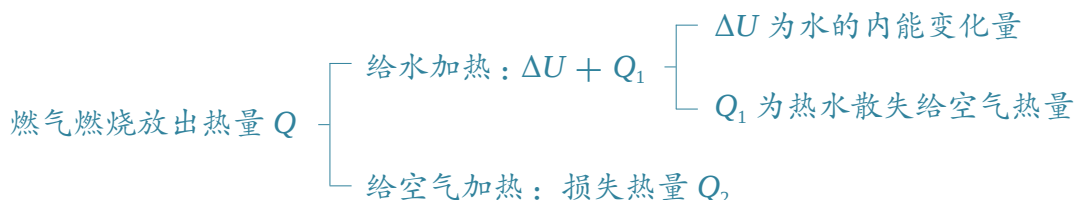
# 课题研究

## 研究样例

### 燃气灶火力对烧水效率的影响

#### 问题的提出

用燃气灶烧水时，怎样控制火力的大小来提高烧水效率，这是使用燃气灶时普遍遇到的问题。为此，需要研究影响燃气灶烧水效率的因素。<sup>①</sup> 现把燃气灶烧水时的能量转化和转移的情况分析如下。



用燃气灶烧水时，水的内能增加了，水的内能的变化量  $\Delta U$  就是燃气灶输出的有用能量。因此，燃气灶烧水的效率  $\eta = \frac{\Delta U}{Q}$ ，而  $Q = \Delta U + Q_1 + Q_2$ ，这样，要提高燃气灶的烧水效率  $\eta$ ，便要设法减小烧水过程中热水散失给空气的热量  $Q_1$  和火焰加热空气损失的热量  $Q_2$ 。

燃气灶火力如果太大，火焰散失在空气中的热量  $Q_2$  相对较多，会降低效率；调小火力，会延长烧水的时间，热水散失给空气的热量  $Q_1$  随加热时间延长而增大，也会降低效率。

怎样的火力有利于提高燃气灶烧水的效率呢？

#### 热水散热损失（ $Q_1$ ）的研究及其启示

在一个水壶（燃气灶头和水壶吸收的热量忽略不计）

<sup>①</sup> 水壶的质量和比热容都较小，以下不考虑其吸收的热量。

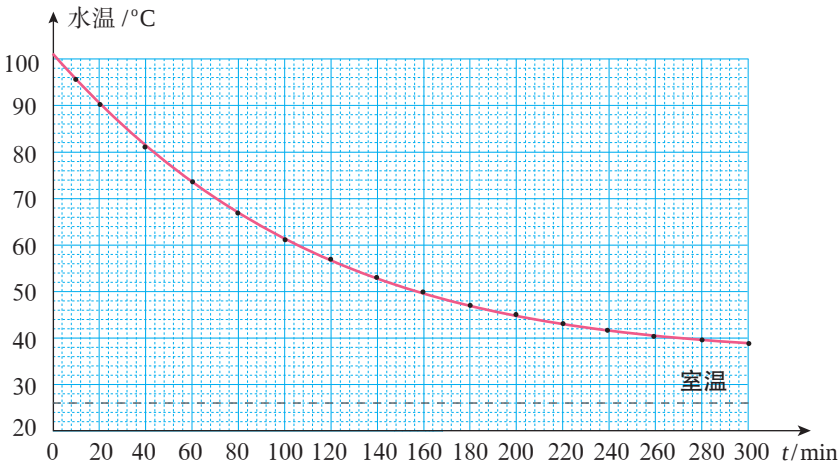
中盛水 4.0 kg，用燃气灶加热，如图研-1 所示。水烧开后让其在自然散热下冷却，开始每隔 10 min 记录一次，一段时间后，每隔 20 min 记录水温一次。记录数据时室温为 26 ℃，基本上保证了实验环境温度的恒定。<sup>①</sup> 记录散热过程中不同时刻水的温度值如表 1 所示，作出水的温度随时间变化的水温—时间图像，如图研-2 所示。

表 1 开水冷却过程水温随时间的变化

| 时间<br><i>t</i> /min | 0     | 10   | 20   | 40   | 60   | 80   | 100  | 120  | 140  | 160  | 180  | 200  | 220  | 240  | 260  | 280  | 300  |
|---------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 水温<br>/℃            | 101.9 | 94.8 | 90.0 | 81.0 | 73.5 | 66.5 | 61.5 | 57.5 | 53.5 | 50.5 | 47.5 | 45.5 | 43.7 | 42.0 | 40.8 | 39.8 | 38.8 |



图研 -1



图研 -2

质量一定时，水放出的热量跟它温度的下降量成正比。从表 1 中可以看出，水在 0 ~ 20 min 下降的温度（11.9 ℃）约为 180 ~ 200 min 下降的温度（2.0 ℃）的 6 倍，说明在单位时间内，水在 90 ~ 100 ℃ 温度区间散失的热量远大于它在 40 ~ 50 ℃ 温度区间散失的热量。为减小水在高温时的放热损失，应缩短水在高温时的加热时间。因此，水在高温时，燃气灶的火力不能太小。

■ 燃气加热空气损失能量（ $Q_2$ ）的研究及其启示

燃气灶的火力太大，烧水时明显感到水壶周围空气的热浪，这就意味着燃气在烧水时使周围的空气被加热，浪费了能源。为此，我们选择两种不同火力，分别加热质量

<sup>①</sup> 室内空间较大，开启了一台排气扇的低风挡进行换气。

为 4 kg 的水从室温上升到 50 ℃。之所以只加热到 50 ℃就停止，是因为 50 ℃以下的水，通过水散失给空气的热量  $Q_1$  并不多，可把不同火力下的  $Q_1$  视为实验中的常量。该过程中，烧水的能量损失主要是燃气加热空气的热量  $Q_2$  所造成的。

表 2 中的火力 1 是燃气灶的最大火力；火力 2 是燃气火焰大到恰好布满壶底但又不火焰四射的火力。用两种火力把相同的水都升高到 50 ℃所消耗的燃气量如表 2 所示。

表 2 同一燃气灶不同火力加热的耗气量

| 火力       | 水的质量 /kg | 水的初温 /℃ | 水的末温 /℃ | 加热前燃气表读数 /m <sup>3</sup> | 加热后燃气表读数 /m <sup>3</sup> | 消耗燃气 /m <sup>3</sup> |
|----------|----------|---------|---------|--------------------------|--------------------------|----------------------|
| 火力 1（大火） | 4.0      | 26.0    | 50.0    | 995.598 5                | 995.643 8                | 0.045 3              |
| 火力 2（中火） | 4.0      | 26.0    | 50.0    | 995.643 8                | 995.671 6                | 0.027 8              |

由表 2 可知，水温较低时，燃气灶火力不能太大。

### 燃气灶烧水火力的设计

根据以上对  $Q_1$  和  $Q_2$  的研究，可以形成以下燃气灶烧水的节能策略：加热初期，水温不太高时用中火，避免燃气过分加热空气造成的浪费；加热后期，水温较高时用大火，避免因加热时间过长，热水长时期散热造成的浪费。

用实验检验研究结论的正确性。表 3 是三种不同加热方案消耗燃气的实验数据。

表 3 燃气灶三种加热方案消耗燃气的实验数据（水的质量、初温相同，都加热到沸腾）

| 方案            | 加热前燃气表读数 /m <sup>3</sup> | 加热后燃气表读数 /m <sup>3</sup> | 消耗燃气 /m <sup>3</sup> |
|---------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|
| 方案 1（始终大火）    | 995.972 5                | 996.060 8                | 0.088 3              |
| 方案 2（始终中火）    | 996.060 8                | 996.145 3                | 0.084 5              |
| 方案 3（先中火，后大火） | 996.145 3                | 996.223 7                | 0.078 4              |

实验结果表明，方案 3 所消耗的燃气量最少，验证了先中火，后大火加热方案的正确性。

## 参考选题

### 家用燃气热水器不同加热温度时的热效率研究

#### 研究内容

使用热水器洗澡时，常有两种调温习惯：一种是把加热后的水温直接调节至洗澡的合适温度，如 38℃ 左右；另一种是把热水器的加热温度调到更高，如 50℃ 左右，再通过淋浴水龙头加兑冷水至合适水温，后者可以获得更大的适温水量。这两种情况下热水器工作的热效率相同吗？

#### 研究思路

热水器工作前，先观察燃气表读数，测量加热前水的温度。第一次加热时，把热水器水温调为 38℃，将加热后的热水注入一容器中（如洗衣机或水桶），达到一定体积时，让热水器停止工作。观察燃气表读数，记录所用去的燃气体积。第二次工作时调节热水器的加热温度至更高（例如 50℃），记录加热同样体积的水所需要的燃气。根据热水内能的增加量  $\Delta U = cm\Delta t$  和所消耗的燃气，就可以比较两种情况下热效率的高低。

如果已知被加热水的体积，查找燃气的热值，还可以算出两种情况下热效率的大小。

# 索引

(名词后面的数字是该名词中、英文第一次出现的页码)

## B

|       |     |
|-------|-----|
| 半衰期   | 111 |
| 比结合能  | 117 |
| 表面张力  | 37  |
| 波粒二象性 | 77  |
| 玻意耳定律 | 24  |
| 布朗运动  | 4   |

## C

|      |    |
|------|----|
| 查理定律 | 27 |
|------|----|

## D

|        |     |
|--------|-----|
| 单晶体    | 33  |
| 德布罗意波  | 92  |
| 电磁相互作用 | 115 |
| 电子云    | 90  |
| 定态     | 87  |
| 多晶体    | 33  |

## F

|       |     |
|-------|-----|
| 放射性   | 101 |
| 分子动理论 | 6   |

## G

|         |    |
|---------|----|
| 盖-吕萨克定律 | 26 |
| 各向同性    | 32 |
| 各向异性    | 32 |
| 光电效应    | 71 |

## H

|     |     |
|-----|-----|
| 核反应 | 111 |
| 核聚变 | 123 |
| 核裂变 | 119 |
| 核子  | 105 |

|    |    |
|----|----|
| 黑体 | 67 |
|----|----|

|      |    |
|------|----|
| 黑体辐射 | 67 |
|------|----|

## J

|      |     |
|------|-----|
| 基态   | 87  |
| 激发态  | 87  |
| 结合能  | 116 |
| 截止频率 | 72  |
| 绝热过程 | 47  |

## K

|       |    |
|-------|----|
| 开尔文   | 21 |
| 康普顿效应 | 76 |
| 扩散    | 3  |

## L

|      |     |
|------|-----|
| 理想气体 | 29  |
| 链式反应 | 120 |
| 量子力学 | 95  |

## M

|      |    |
|------|----|
| 毛细现象 | 38 |
|------|----|

## N

|    |    |
|----|----|
| 内能 | 15 |
|----|----|

## P

|     |    |
|-----|----|
| 平衡态 | 20 |
|-----|----|

## Q

|       |     |
|-------|-----|
| 强相互作用 | 115 |
|-------|-----|

## R

|         |    |
|---------|----|
| 热力学第二定律 | 59 |
| 热力学第一定律 | 50 |

|       |    |
|-------|----|
| 热力学温度 | 21 |
|-------|----|

|       |    |
|-------|----|
| 热力学系统 | 19 |
|-------|----|

|     |    |
|-----|----|
| 热平衡 | 20 |
|-----|----|

|     |   |
|-----|---|
| 热运动 | 4 |
|-----|---|

|       |     |
|-------|-----|
| 弱相互作用 | 116 |
|-------|-----|

## S

|    |     |
|----|-----|
| 衰变 | 108 |
|----|-----|

## T

|     |     |
|-----|-----|
| 同位素 | 105 |
|-----|-----|

|      |    |
|------|----|
| 统计规律 | 10 |
|------|----|

## W

|    |    |
|----|----|
| 温标 | 21 |
|----|----|

|    |    |
|----|----|
| 温度 | 20 |
|----|----|

|     |    |
|-----|----|
| 物质波 | 92 |
|-----|----|

## Y

|     |    |
|-----|----|
| 逸出功 | 73 |
|-----|----|

|      |    |
|------|----|
| 阴极射线 | 78 |
|------|----|

## Z

|      |     |
|------|-----|
| 质量亏损 | 118 |
|------|-----|

|    |     |
|----|-----|
| 质子 | 104 |
|----|-----|

|    |     |
|----|-----|
| 中子 | 104 |
|----|-----|

|      |    |
|------|----|
| 状态参量 | 19 |
|------|----|