

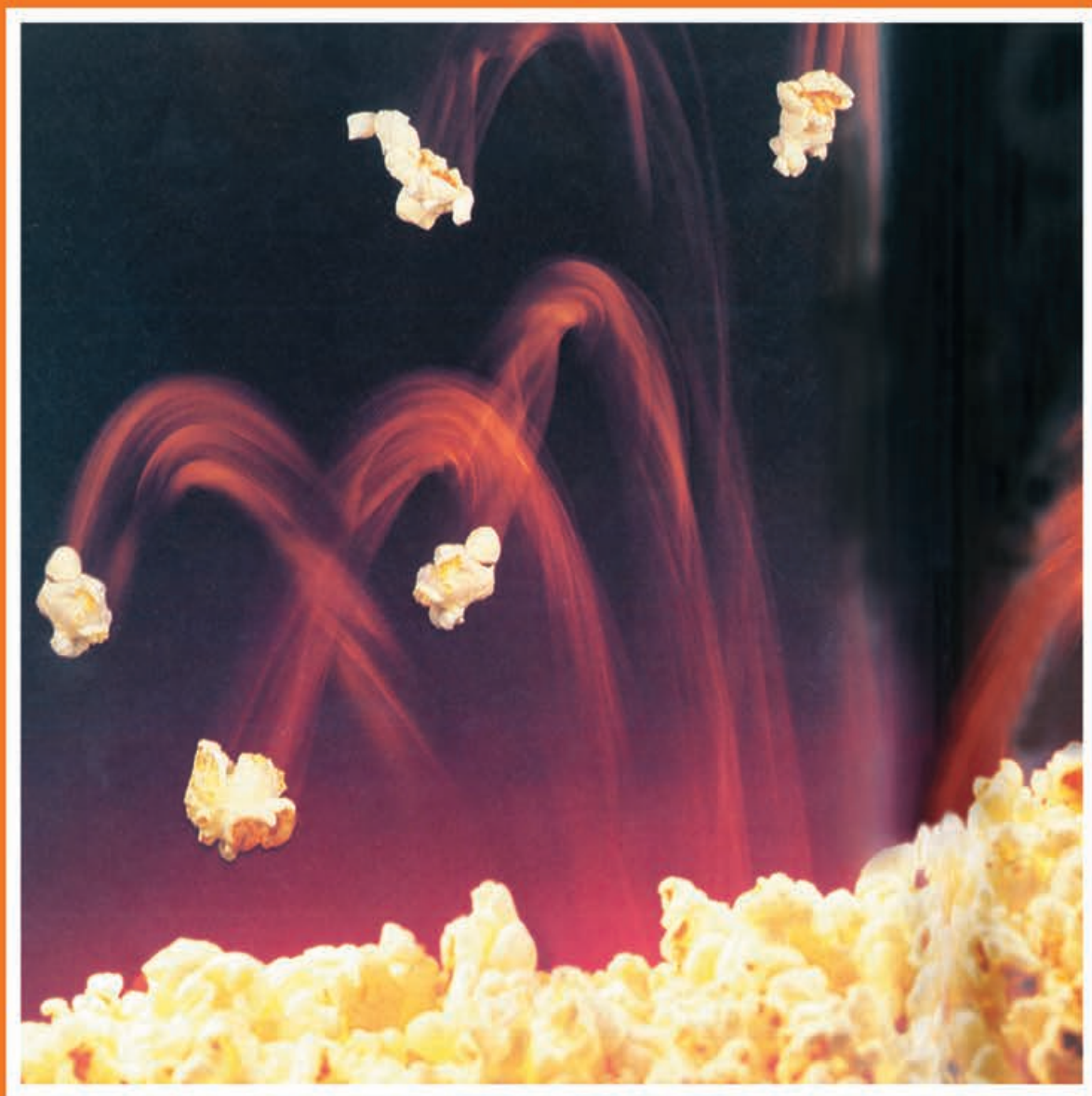


普通高中教科书

物理

选择性必修

第三册



上海科技教育出版社

普通高中教科书

物理

选择性必修

第三册

总主编 束炳如 何润伟



上海科技教育出版社

亲爱的同学：

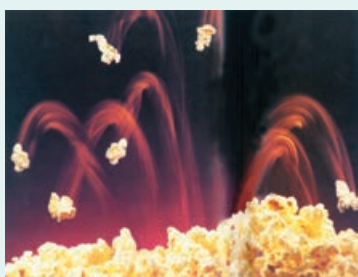
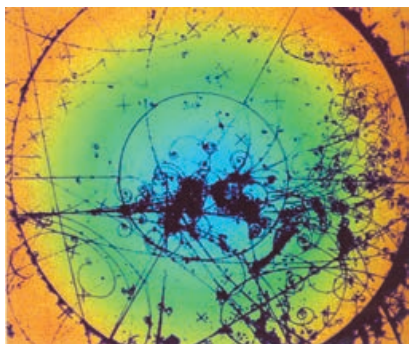
欢迎你学习《物理（选择性必修3）》！

本书是高中物理选择性必修的最后一册教材。它涵盖了近代物理学的一些基本知识，在高中物理中处于特别重要的地位。

我们将首次运用统计思想来研究大量分子做无规则运动的规律，从宏观和微观两个角度研究固体、液体和气体的性质，在量子论视野下探索原子世界的奥秘，认识光及实物粒子的波粒二象性。

我们将通过一系列的实验探究活动，增强科学探究意识；并通过回顾热力学定律和能量守恒定律的发现历程和原子世界的探秘过程等，增强科学探究能力和科学献身精神，树立可持续发展意识和社会参与意识，养成关心社会和对社会负责的态度。

为了让你在学习《物理（选择性必修3）》的过程中获得更大的成功，请浏览下面的栏目介绍。



第4章 热力学定律

物质世界在不断地运动变化着。自然界发生的任何运动变化过程都遵循着一条最基本、最普遍的规律——能量守恒定律。

你知道人们是怎样发现能量守恒定律的吗？

自然界的能量不会消失，那么它可以被人们反复利用吗？

能量可以相互转化，那么燃料的内能是否可以全部用来做功呢？

自然界宏观过程的方向性蕴含着怎样的物理原理？

本章将以能量为主线，研究改变内能的方式与规律——热力学第一定律，理解能量守恒定律及其应用；由自然界中宏观过程的方向性，了解热力学第二定律；回顾热力学第一定律和能量守恒定律的发现过程，体会科学探索中的挫折和失败对科学发现的意义。

每章的开头都有一些情境，提出一些问题，让你明确本章研究的主要内容。

实验探究

这里将要求你提出问题，设计实验方案，动手做一些有意义的实验，进行科学探究。

实验探究 观察液体表面张力现象

1. 在杯内装满水，试着把若干枚小硬币轻轻地平放在水面上。观察水面形状有什么变化？小硬币为什么不沉下去呢？

2. 用金属丝制成如图 3-2-2 所示各种形状的框架，分别把它们浸入肥皂液内，轻轻取出后观察框架上皂膜的形状。

如图 3-2-3 a 所示，用针捅破金属圆环棉线上边的皂膜，棉线的形状有什么变化？如图 3-2-3 b 所示，为什么金属框上的皂膜把细金属丝向左拉？对图 3-2-3 c 和图 3-2-3 d 所形成的皂膜形状，你有什么猜测？

3. 如图 3-2-4 所示，把橄榄油滴入水和酒精的混合液中，橄榄油滴呈什么形状？

这些实验表明，液体的表面就像紧绷着的橡皮膜，它有着一种收缩的趋势。使液体表面具有收缩趋势的力叫做表面张力（surface tension）。

那么，表面张力是怎样产生的呢？

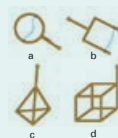


图 3-2-2 观察表面张力现象用的金属框架

分析与论证

这里你将进行分析、综合，并运用数学工具进行推理，得出物理学规律和公式。通过这一过程，你将体会科学思维的魅力。

分析与论证

综合上面的研究可以知道，使热力学系统从一个状态变化到另一个状态，既可以通过做功也可以通过热传递的方式。实验表明，这两种方式的物理过程虽然不同，对于系统内能的改变却是等效的。系统内能的改变过程可用能流图（图 4-1-5）形象地表示。

应该指出，“做功”和“热传递”虽有其等效的一面，但在物理本质上仍然存在着区别。“做功”（机械功）伴随着一定的宏观位移，它是系统外的有序运动的能量与系统内分子无规则运动能量之间的转化，从而改变系统的内能。“热传递”是通过分子之间的相互作用，是系统外的物质分子无规则运动的能量向系统内物质分子无规则运动能量之间完成的一种转移，从而改变系统的内能。

学生必做实验

用油膜法估测油酸分子的大小

分子很小，无法通过普通的光学显微镜直接观察。为了研究分子的大小，首先要建立一个简化的分子模型。我们设想组成物质的分子都是球形的，而且同种物质的分子都是一个一个大相同的小球。如果能把某一部分物质的分子一个紧挨一个铺展开来，形成一张“单分子膜”，那么，只要知道这部分物质的体积V和铺展开来的面积S，就可以估算出分子的直径及其大小。即

分子直径 $D = \frac{V}{S}$

分子体积 $V_i = \frac{1}{6} \pi D^3 = \frac{1}{6} \pi \left(\frac{V}{S}\right)^3$

学生必做实验

这里为你提供了完整的实验活动，让你通过动手实验，探索物理规律，学习物理方法，形成物理观念，提高解决问题的能力，体验成功的喜悦。

信息浏览、STSE

这里为你提供了各种有趣、有用的资料，包括物理学史上的经典事例、科学家小故事等，它们反映了物理学与科学、技术、社会、环境的紧密联系。你的视野将更开阔，你会更加热爱科学。

信息浏览

原子，请你排好队！

借助光学显微镜，人们可以观察到细胞、细菌和其他微生物，其分辨本领可达 $2 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 。尽管从技术上来说，提高光学显微镜的放大倍数并不困难，但不管放大倍数有多大，比 $2 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 还小的物体，如大多数病毒，在光学显微镜下都不能被看清楚。

要提高显微镜的分辨本领，必须改用波长比可见光短得多的射线。电子的德布罗意波长很短，因此用电子束代替光束成为上佳选择。1931年德国物理学家鲁斯卡（E. Ruska）发明了世界上第一台电子显微镜。

1982年，美国IBM公司的物理学家宾尼希和他的老前辈罗雷尔发明了世界上第一台扫描隧道显微镜，它应用了电子的量子隧穿效应，能直接观

测到单个原子的立体形貌。利用STM，人类还实现了直接操纵和排布原子的奇迹（图 6-4-4）。

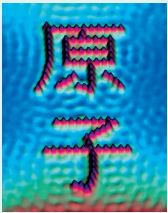


图 6-4-4 用扫描隧道显微镜把碳原子排布在铜表面上的“原子”两字

课题研究

肥皂水与清水的表面张力比较研究

请你设计一个实验，比较肥皂水与清水的表面张力，并粗略地研究表面张力与哪些因素

有关。做一下这个实验，并写出课题研究报告，在同学间相互交流评价。

课题研究

这里提供了一些课题供你选择研究，这种研究将使你的才智得到充分的展示。

多学一点

这里将介绍更多更深的奥秘，以开阔你的视野。你如果有兴趣，可以作进一步的探索。

多学一点 如何理解分子之间既有引力又有斥力

我们先来研究一下原子间的引力和斥力是如何产生的。原子中有一个直径约 10^{-15} m 的带正电的核，核外有带负电的电子组成的电子云。整个原子呈电中性。

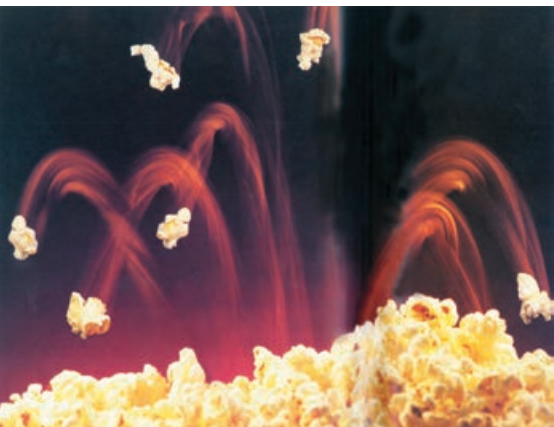
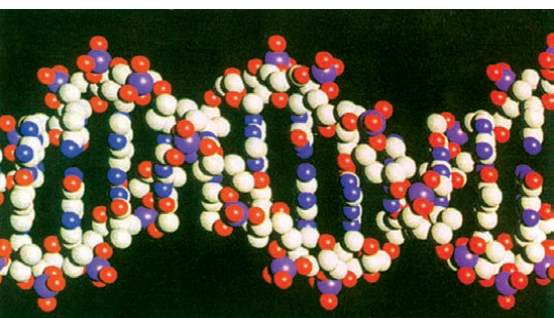
当两个原子相距较远时（图 1-3-6a），可以认为相互间没有静电力的作用。

当两个原子接近到如图 1-3-6b 所示的情况时，它们有一部分电子云互相重叠。原子 1 的电子已不能把原子 1 的核的正



图 1-3-6 分子间相互作用的微观解释

目 录



第 1 章 分子动理论..... 6

- 1.1 走进分子世界 7
- 1.2 无序中的有序 14
- 1.3 分子动理论 内能 20

第 2 章 气体定律与人类生活..... 25

- 2.1 气体的状态 26
- 2.2 玻意耳定律 29
- 2.3 查理定律和盖 – 吕萨克定律 34

第 3 章 固体、液体与新材料 40

- 3.1 固体的性质 41
- 3.2 液体的表面性质 45
- 3.3 液晶与显示器 51
- 3.4 半导体材料和纳米材料..... 56

第 4 章 热力学定律 64

- 4.1 热力学第一定律 65
- 4.2 能量守恒定律 70
- 4.3 热力学第二定律 75

第5章 原子世界探秘 82

- 5.1 电子的发现 83
- 5.2 原子模型的提出 86
- 5.3 量子论视野下的原子模型..... 89

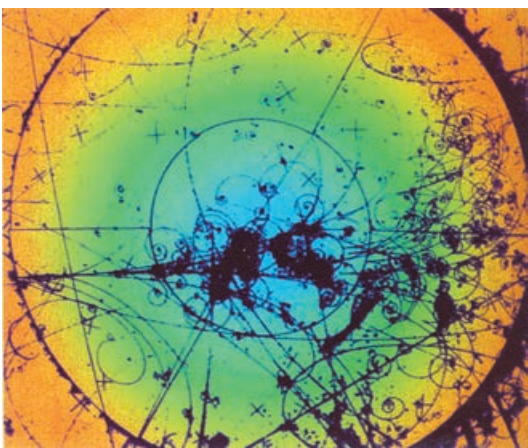
第6章 波粒二象性 96

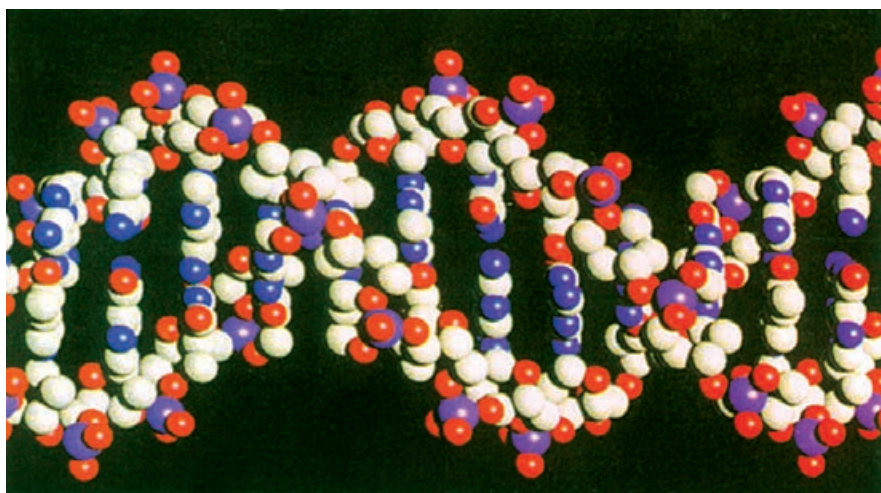
- 6.1 光电效应现象 97
- 6.2 光电效应的理论解释100
- 6.3 光的波粒二象性 103
- 6.4 实物粒子具有波动性 105

第7章 原子核与核能 110

- 7.1 原子核结构探秘 111
- 7.2 原子核的衰变 115
- 7.3 原子核的结合能 122
- 7.4 裂变与聚变 126
- 7.5 粒子物理与宇宙起源 134

- 总结与评价 课题研究成果报告会..... 140
- 研究课题示例 140
- 评价表 141





第 1 章 分子动理论

1827 年，英国植物学家布朗（R. Brown）在研究一种花粉的繁殖过程时注意到，悬浮在水中的花粉颗粒会不停地毫无规则地跳动，就像“活的”一样。这种由植物学家发现的现象，却难倒了当时的许多物理学家。

悬浮颗粒为什么会不停地做着这种杂乱无章的运动呢？这种运动是否就是人们猜测的分子运动的宏观表现？

组成物质的分子究竟有多大？

大量分子的运动有什么特点？

物质分子的微观运动在宏观上有何表现？

本章将采用宏观和微观相结合的方法，以统计思想和能量观点为主线来研究分子的运动；通过实例和活动，了解分子动理论的基本观点及相关的实验证据；了解分子运动速率分布的统计规律；结合分子动理论阐释温度和气体压强的微观意义，研究由分子运动所决定的物质系统的内能。

1.1 走进分子世界

我们知道，物体都是由许多很小的分子组成的。那么，分子有多大？怎样知道分子的大小呢？物质的分子有多少呢？它们的运动状态是怎样的？

分子的大小

 学生必做实验

用油膜法估测油酸分子的大小

分子很小，无法通过普通的光学显微镜直接观察。为了研究分子的大小，首先要建立一个简化的分子模型。我们设想组成物质的分子都是球形的，而且同种物质的分子都是一个个大小相同的小球。如果能把某一部分物质的分子一个紧挨一个铺展开来，形成一张“单分子膜”，那么，只要知道这部分物质的体积 V 和铺展开来的面积 S ，就可以估算出分子的直径和体积的大小。即

分子直径

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

分子体积

$$V_1 = \frac{1}{6} \pi D^3 = \frac{1}{6} \pi \left(\frac{V}{S}\right)^3$$

思考讨论

1. 怎样使某部分的物质分子一个紧挨一个地铺展开来呢？



图 1-1-1 场离子显微镜 (FIM) 拍摄的图像显示了铂针顶端的原子(橘黄色)排列情况，这个图像放大了 20 万倍

用油膜法估测分子的大小，提供了一个测量微观量的思想和方法。

实际分子有着复杂的内部结构，建立分子的球模型，仅是为了便于研究。



图 1-1-2 用扫描隧穿显微镜描绘的遗传分子 (DNA) 形状

2. 如何测量铺展后形成的不规则图形的面积？

设计实验

设计本实验的思想方法是：
如何将难以测量的微观量，转化为相对容易测量的宏观量。

以油酸（ $C_{17}H_{33}COOH$ ）为例，为了使分子排列起来，可以利用油酸分子的酸根—COOH对水有很强的亲和力这一特点。把一滴用酒精稀释过的油酸溶液滴在水面上，油酸就在水面散开，形成一层薄薄的膜（酒精溶于水，并会很快挥发）。这层薄膜可以看成是单分子层，它的厚度可以认为等于油酸分子的直径（图 1-1-3）。

实验操作

科学合理的实验操作是获取正确实验数据的关键，有助于减小实验中的误差。

- 1. 配制浓度为 0.1% 的油酸酒精溶液。
- 2. 将配制好的油酸酒精溶液放在小量筒中，用滴管吸取 1 cm^3 的溶液，数出均匀滴出时的总滴数 N ，得 1 滴溶液的体积。根据配制的浓度，即得 1 滴溶液中油酸的体积

$$V = \frac{1}{N} \times 0.1\% \text{ cm}^3$$

- 3. 在一个 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 的浅盘里倒入约 2 cm 深的水，将痼子粉或滑石粉均匀地撒在水面上。再用滴管吸取配制好的油酸酒精溶液，滴入一小滴到水面上，液滴很快会形成如图 1-1-4 所示的油酸薄膜。

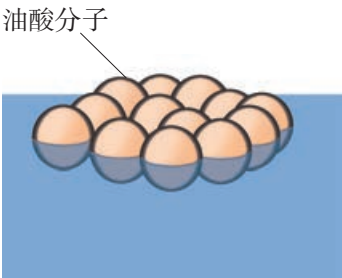


图 1-1-3 油酸分子形成单分子层的示意图

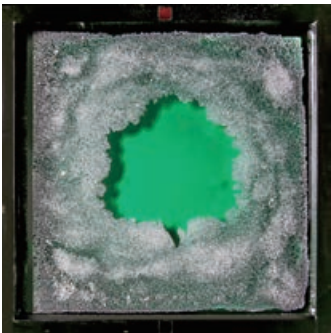


图 1-1-4 油酸薄膜形状

- 4. 用玻璃板盖在浅盘上，在玻璃板上覆一张半透明的坐标纸，将油膜形状描画在坐标纸上。

收集证据

要正确地读出和记录实验数据，运用恰当的方法处理数据并得出正确结论。

实验序号	1	2	3
油酸溶液体积			
油膜面积			

实验结论

通过计算可得油酸分子直径的测量值的数量级为 $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{ m}$ ，由此可见，分子是何其小！你的测量值是多少呢？

请你写出完整、规范的实验报告，正确表达科学探究的过程和结果。

研究表明，一般分子直径的数量级为 10^{-10} m 。例如，水分子的直径约为 $4 \times 10^{-10} \text{ m}$ ，氢分子的直径约为 $2.3 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。

现在，用扫描隧穿显微镜已经可以看到原子尺度的微观世界（图 1-1-5）。

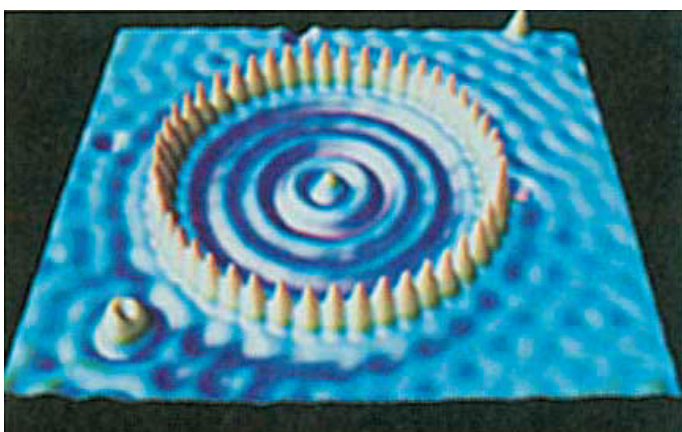


图 1-1-5 扫描隧穿显微镜观察到的圆形量子围栏

扫描隧穿显微镜 (scanning tunneling microscope, 简称 STM) 是在 1982 年由德国科学家宾尼希 (G. Binnig) 和瑞士科学家罗雷尔 (H. Rohrer) 首先研制成功的。为此，他俩与另一位科学家共同获得了 1986 年的诺贝尔物理学奖。

1993 年 5 月，美国 IBM 公司的科学家在 4 K 的温度下，用电子束将单层的铁原子蒸发到铜表面，然后用扫描隧穿显微镜针尖将 48 个铁原子排列成直径为 14.3 nm 的圆形量子围栏。

1 mol 物质的分子数

分子很小，通常的一小块物体中都包含着大量的分子。

我们在化学中已学过，1 mol 任何物质所包含粒子的数目都相等，这个数目叫做阿伏伽德罗常量 (Avogadro constant)。根据分子的球模型，可以算出阿伏伽德罗常量的大小，从而推算出一定量任何物质中所包含分子的数目。

以水为例，水的摩尔体积是 $V_{\text{mol}} = 1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$ ，水分子的直径约为 $D = 4 \times 10^{-10} \text{ m}$ ，由此得水分子的体积 $V_1 = \frac{1}{6} \pi D^3 = 3.0 \times 10^{-29} \text{ m}^3$ 。假设水分子是一个紧挨一个地排列着的，则 1 mol 水所含的水分子数目（即阿伏伽德罗常量）就等于

$$N_A = \frac{V_{\text{mol}}}{V_1} = \frac{1.8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}}{3.0 \times 10^{-29} \text{ m}^3} = 6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

阿伏伽德罗常量是一个重要的常量，它仿佛是联系宏观世界和微观世界之间的一座桥梁。利用阿伏伽德罗常量，可以把摩尔质量、摩尔体积等宏观量，跟分子质量、分子大小等微观量联系起来。有了它，我们可以通过对某些宏观量的测量，窥

对于一个系统，从整体上对其状态加以描述的方法叫做宏观描述。这时表征系统状态和属性的物理量叫宏观量。

通过微观粒子运动状态的说明，对系统的状态加以描述的方法叫做微观描述。描述微观粒子运动状态的物理量叫微观量。

见分子水平的微观世界。

目前，阿伏伽德罗常量的公认值是

$$N_A = 6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

在通常的计算中，可取 $N_A = 6.0 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。

案例分析

案例 一间教室长 $a = 8 \text{ m}$ ，宽 $b = 7 \text{ m}$ ，高 $c = 4 \text{ m}$ ，假设教室里的空气处于标准状况。为了估算出教室空气中气体分子的数目，有两位同学各自提出了一个方案：

方案1 取分子直径 $D = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$ ，算出分子体积 $V_1 = \frac{1}{6} \pi D^3$ ，根据教室内空气的体积 $V = abc$ ，算得分子数

$$N = \frac{V}{V_1} = \frac{6abc}{\pi D^3}$$

方案2 根据化学知识，1 mol 空气在标准状况下的体积 $V_0 = 22.4 \text{ L} = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。由教室内空气的体积，可算出教室内空气的摩尔数 $n = \frac{V}{V_0} = \frac{abc}{V_0}$ 。再根据阿伏伽德罗常量，算得空气中气体分子数

$$N = n N_A = \frac{abc}{V_0} N_A$$

请对这两种方案做一评价，并估算出你们教室空气中气体分子的数目。

分析 方案1把教室空气中的气体分子看成是一个个紧挨在一起的，没有考虑分子之间的空隙，不符合实际情况。通常情况下气体分子间距的数量级为 10^{-9} m ，因此分子本身体积只是气体所占空间的极小一部分，常常可以忽略不计。方案2的计算方法是正确的。

请根据方案2完成计算。可以估算出教室空气中气体分子数目的数量级达到 10^{27} 。

布朗运动

在初中物理中已经知道，物质分子永不停息地做着无规则的热运动，扩散现象和布朗运动就是分子无规则运动的结果。

扩散是由于分子做无规则运动使不同物质彼此进入对方的一种现象。无论气体、液体和固体等不同物态的物质，都会发生扩散。扩散在日常生活和生产实践中非常普遍，其中有一些扩散现象是十分有害的。例如，汽车排放的尾气，工厂排放的污水，燃煤的烟尘，工业废料中的重金属等都会向四周扩散，

污染空气、河水和土壤等。

通过观察布朗运动可以更直观地体会分子运动的现象。如图 1-1-6 所示，将封有悬浊液的载玻片置于显微镜下，调节显微镜，即可看到悬浊液中小颗粒的运动。

如果追踪其中的一个小颗粒，每隔一定时间（如 30 s）记下它的位置，然后用线段把这些位置依次连接起来。可以看到，连成的折线曲曲折折，纵横交错（图 1-1-7）。这个现象说明小颗粒在不停地改变着自己的运动方向，做的是一种极其不规则的运动。小颗粒的这种无规则运动叫做**布朗运动**（Brownian motion）。这种小颗粒通常被叫做**布朗粒子**。

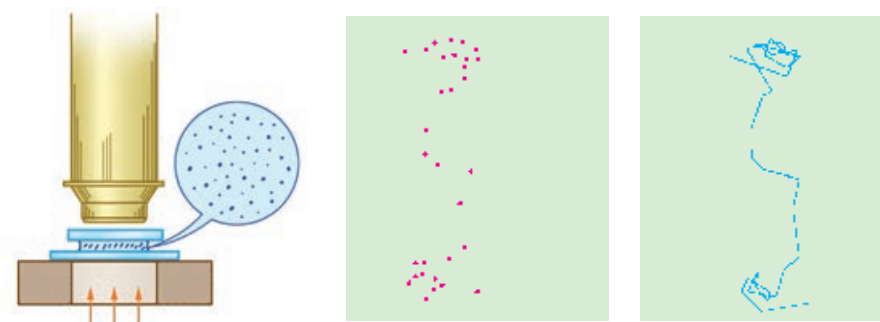


图 1-1-6 用显微镜观察布朗运动

a 认定一个小颗粒进行观察所得到的一系列位置
b 把这些位置依次连接起来得到的折线

图 1-1-7 布朗粒子无规则运动示意图

布朗运动是否就是分子的运动？你认为应该怎样解释这个实验现象？

我们知道，分子直径的数量级为 10^{-10} m，远比布朗粒子小，人眼无法直接看到。因此，布朗粒子的运动并不是分子的运动。

那么，布朗运动是怎样产生的呢？在物理学家迷茫了几十年后，爱因斯坦终于搞清楚了产生布朗运动的原因。原来，布朗粒子悬浮在液体中，会不断地受到其周围液体分子对它的撞击（图 1-1-8）。由于布朗粒子很小，因此这些撞击虽然来自四面八方，一般不会完全抵消。如果在某个瞬间，一个布朗粒子在某个与其运动不在一直线的方向上受到的撞击较强，那么它的运动方向就会发生相应的改变；如果在另一个瞬间，它在另一个与其运动方向不在一直线的方向上受到的撞击较强，那么它的运动方向又会发生另一种相应的改变。由于液体分子对布朗粒子的撞击是不规则的，布朗粒子也就不断地改变着运动方向，做着毫无规则的运动。

在布朗运动的实验中发现，液体的温度越高，布朗运动越明显。这间接说明了温度越高，液体分子的无规则运动越剧烈。在热力学中，我们研究的对象是由大量分子组成的集合体，叫

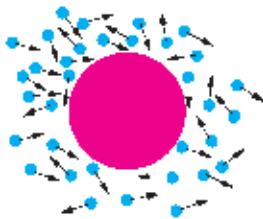


图 1-1-8 布朗运动的原因

做**热力学系统**（thermodynamic system）。由此可见，一个宏观系统的冷与热跟系统内大量分子无规则运动的剧烈程度有关。在物理学上，把分子永不停息的无规则运动叫做**热运动**（thermal motion）。

热运动与机械运动是完全不同的两种运动形式。热运动指的是系统内大量分子的无规则运动，机械运动则是系统整体的或某一部分的宏观位置变动。例如，在观察布朗运动的实验中，放在实验桌上容器中的液体，作为一个整体来说相对于实验室参考系是静止的，并不做机械运动，但液体内的分子却不停地在运动，整个液体处在一种热运动状态。

案例分析

案例 几位同学通过对布朗运动的观察后，提出了以下一些看法，其中正确的是（ ）。

- A. 布朗运动是组成固体微粒的分子无规则运动的反映
- B. 悬浮的固体微粒越小，布朗运动越显著
- C. 观察时间越长，布朗运动越显著
- D. 布朗运动的发生与温度的高低无关
- E. 从缝隙中射入一缕阳光，从阳光中看到的尘埃的运动就是布朗运动
- F. 雾霾天气时悬浮的 PM2.5 颗粒，也在空中做布朗运动

请你根据布朗运动的产生原因、热运动的意义、布朗粒子与尘埃等固体微粒尺度的比较等方面，对上述看法做出评价。

大气中存在着各种形状不规则的悬浮颗粒，科学上用 PM10、PM2.5 等名称分别表示直径小于或等于 10 μm、2.5 μm 的悬浮颗粒物。

信息浏览

关于布朗运动的研究

1827 年，布朗发现了花粉颗粒在水中杂乱无章的运动后，人们对这种运动的产生原因进行了种种猜想：

有人认为，这种运动起因于液体蒸发而造成的容器中液体的缓慢对流；

有人认为，这是一种生物现象，跟这种花粉所属的植物有关；

……

布朗用无机物颗粒（包括研细的石粉）做了

试验，他发现，只要颗粒足够小，它们悬浮在水中都会做这样的运动。布朗说：“在经过多次重复的观察后，我确信这些运动既不是液体的流动，也不是由液体的蒸发所引起的，而是属于粒子本身的运动。”

面对植物学家的发现，当时的物理学家显得束手无策。一个小小的花粉颗粒，却掀起了一场轩然大波。

整整过了半个世纪，到 1877 年，才有人指出，布朗运动是由于液体分子的碰撞产生的。

1905 年，爱因斯坦和波兰物理学家斯莫鲁霍夫斯基 (M. Smoluchovski) 分别发表了他们对布朗运动的理论研究结果，对布朗运动做出了理论上的解释。

布朗运动的实质是大量分子无规则运动引起的随机涨落，这种现象不仅在自然界中大量存在，而且在工程技术和社会生活中也存在。例如，许多精密仪表的指针，由于受空气中气体分子的碰撞也会出现无规则的左右摆动；股市中的股票价

格，会因各种随机的政治经济因素而发生变动。这些，都是随机涨落。

对布朗运动的研究有很重要的意义。爱因斯坦、佩兰 (J. Perrin)、默顿 (R. Merton) 和斯科尔斯 (M. Scholes) 这四位荣获诺贝尔奖的科学家（后两位是 1997 年诺贝尔经济学奖获得者），都对它进行过研究，这恐怕是布朗始料未及的。

家庭作业与活动

1. 估算一下，成年人深呼吸一次能吸进多少个气体分子？
2. 一只保温瓶内水的质量约 2.2 kg，其中水分子的数目约为多少？水的摩尔质量为 18 g/mol。
3. 用油膜法做实验时，事先将 1 cm^3 的油酸溶于酒精，制成 200 cm^3 的油酸酒精溶液。已知 1 cm^3 该溶液有 50 滴，现取 1 滴油酸酒精溶液滴到水面上，形成一层单分子薄膜，测得油膜的面积为 0.2 m^2 ，试估算油酸分子的直径大约为多少。
4. 为了测出阿伏伽德罗常量，需要知道的物理量是 ()。
 - A. 水的密度和水的摩尔质量
 - B. 水的摩尔质量和水分子的体积
 - C. 水分子的体积和水分子的质量
 - D. 水分子的质量和水的摩尔质量
5. 为了估算出教室空气中气体分子的间距，需要知道哪些物理量？请写出用这些物理量表示的分子间距表达式。
6. 有人说，图 1-1-7 b 中画出的就是一个布朗粒子的运动轨迹。这种说法对不对？
7. 实验研究表明：在观察布朗运动的实验中，布朗粒子越小，悬浮液的温度越高，布朗运动就越剧烈。请根据你对布朗运动的理解，分析一下原因。

1.2 无序中的有序

大量分子永不停息的无规则运动有一定的规律吗？我们先来研究气体分子的运动。

气体分子运动的特点

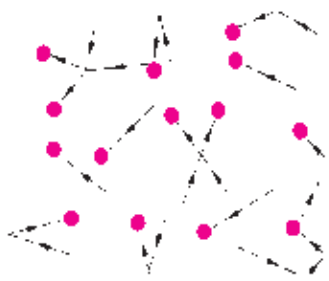


图 1-2-1 分子间频繁地碰撞

为了揭开气体分子运动之谜，我们可以在气体分子的球模型基础上再假设一些理想化条件。

通常状况下气体分子间的距离比较大，相互之间的作用力很小，因此可以忽略气体分子间的相互作用，认为气体分子除了相互碰撞或跟器壁碰撞外，不受力的作用，在空间自由运动。

大量分子的无规则运动，必然会导致分子间频繁地碰撞（图 1-2-1）。研究表明，在标准状况下，一个气体分子在 1 s 内跟其他气体分子的碰撞竟达到几十亿次之多。

由此可见，气体分子在不断的碰撞中频繁地改变着方向，做着杂乱无章的运动。

你是怎样理解分子杂乱无章的运动的呢？这么多分子沿各个方向运动的机会是均等的吗？

用统计思想研究分子运动

气象台的天气预报，除了报告未来几天的天气状况、气温变化外，有时还报告“降水概率”（图 1-2-2）。“降水概率”是指下雨可能性的大小。气象台预报说：“明天的降水概率是 70%。”这意味着明天有七成可能会下雨。

在大量的偶然事件背后，蕴藏着一种规律，这种规律要通过搜集大量资料并加以整理分析后才能显示出来，这种规律叫做统计规律。统计规律普遍存在于自然现象和社会现象之中。对于做无规则运动的大量分子，可以用统计思想方法加以研究。

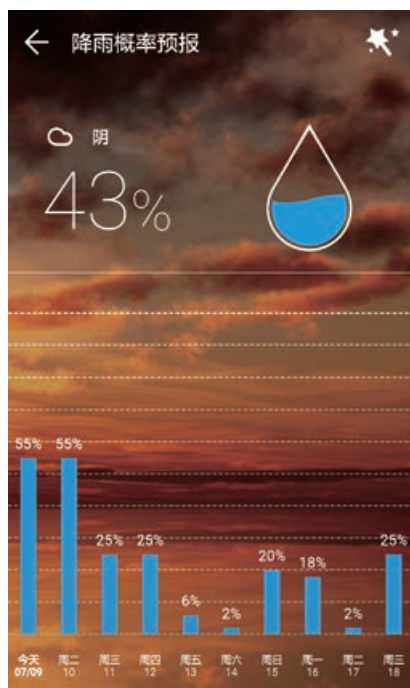


图 1-2-2 降水概率

气体分子运动的统计规律

大量气体分子在做杂乱无章的运动时，它们沿各个方向运动的概率是均等的。那么，这种运动中是否隐藏着某种规律？

实验探究

用伽尔顿板模拟分子的无规则运动

图 1-2-3a 所示的装置称为伽尔顿板。在一块竖直平板上均

匀地密布着许多钉子，平板下方有一木槽，木槽内分有许多宽度相同的竖立的小格。实验时，先让一个小球从平板上方下落，在下落过程中这个小球跟钉子磕磕碰碰，最后落到木槽的某个小格中；然后再让另一个小球下落，它可能落进另一个小格。多次重复这样的操作，我们可以发现，一个小球跟钉子碰撞后落进哪一个小格完全是无法预料的，也就是说，小球落入某个小格完全是一个随机的偶然事件。如果让许许多多小球落下去，那么可以看到，有些小格中落入的小球多，另一些小格中落入的小球少。多次重复操作可以发现，木槽的各小格中落入的小球数目有着一定的分布规律——始终是中间的小格多，两边的小格少，如图 1-2-3 b 所示。

如果把小球看成分子，它们落入木槽内不同的小格对应着分子经不断碰撞后获得的速度大小，那么，从伽尔顿板的实验中可以得到启示：对于由大量微观粒子组成的系统，就其宏观性质而言，统计规律起着主导作用。

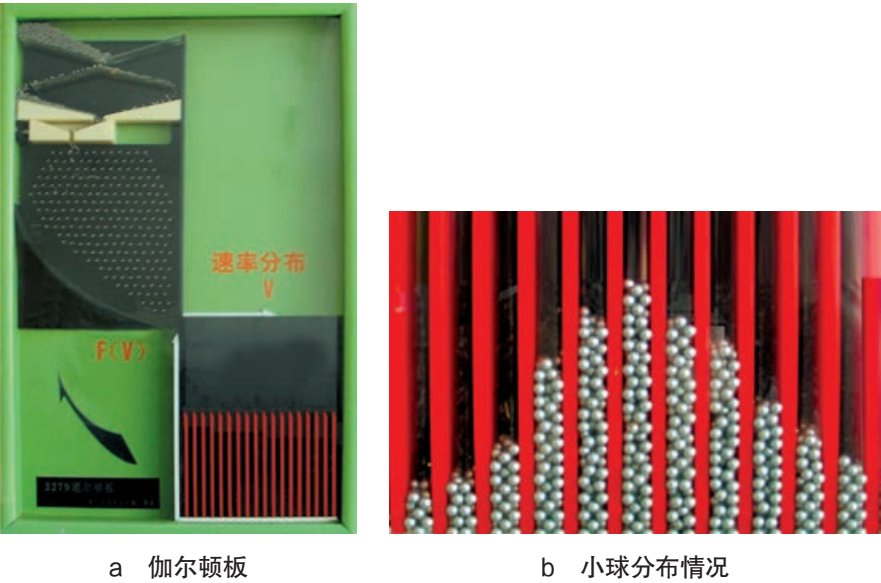


图 1-2-3 伽尔顿板实验

分析与论证

1859 年，麦克斯韦运用统计方法，找到了气体分子速率的分布函数，从而确定了气体分子速率的分布规律。这个规律指出，在一定状态下，气体的大多数分子的速率都在某个数值附近，速率离开这个数值越远，具有这种速率的分子就越少，即气体分子速率总体上呈现出“中间多，两头少”的正态分布特征〔如图 1-2-4 中的正态分布曲线， v 表示分子的速率， $f(v)$ 表示分子速率分布函数〕，很像伽尔顿板实验中落入各个小格中的小球多少所形成的分布（如图 1-2-4 中的直方图）。

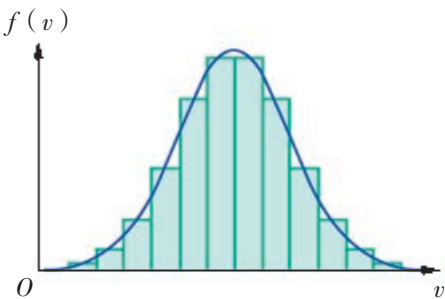


图 1-2-4 正态分布曲线

科学家用实验方法测出了在 0 ℃和 100 ℃时氧分子的速率分布，如下表所示。

氧分子的速率分布表

按速率大小划分的速率区间 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	不同温度下各速率区间的分子数占总分子数的百分比 / %	
	0 ℃	100 ℃
100 以下	1.4	0.7
100—200	8.1	5.4
200—300	17.0	11.9
300—400	21.4	17.4
400—500	20.4	18.6
500—600	15.1	16.7
600—700	9.2	12.9
700—800	4.5	7.9
800—900	2.0	4.6
900 以上	0.9	3.9

如果以横坐标上的各等长区间表示相应的速率范围，以纵坐标表示所占的百分比，那么可以用直方图表示出一定温度下分子速率的分布，如图 1-2-5 所示。

麦克斯韦的统计方法在物理学思想史上具有重大意义。它向人们指出，对于一个由大量微观粒子组成的系统，利用统计方法，一旦找出了某个微观量的分布函数，便可求出这个微观量的统计平均值，而这个统计平均值正好等于该系统的相应宏观量。这样，就把分子的微观运动跟物体的宏观表现紧密地联系起来了。

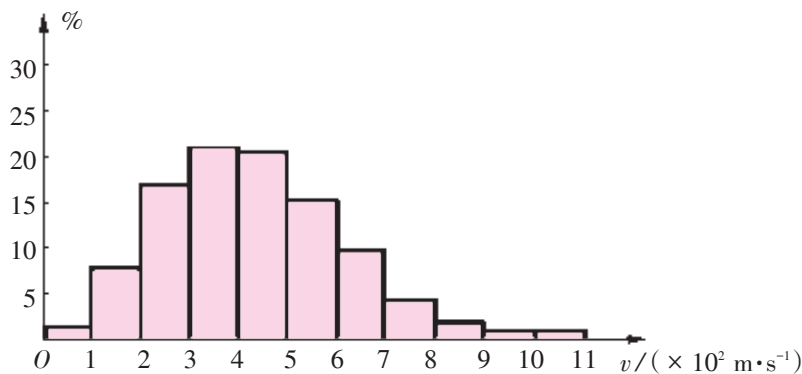
因此，人们称颂麦克斯韦的统计方法“标志着物理学新纪元的开始”。

思考与讨论

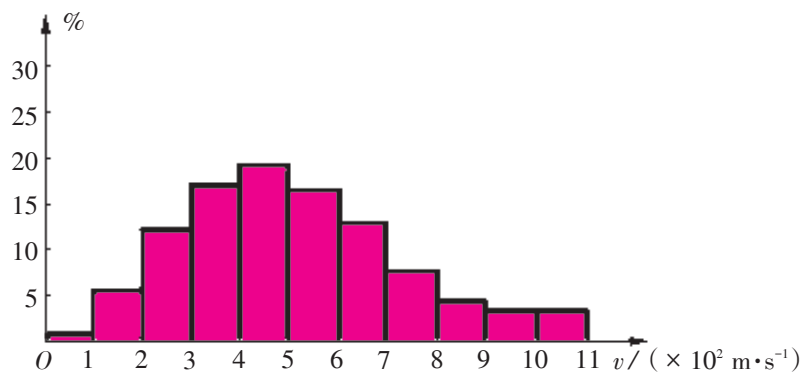
请比较不同温度下氧分子速率分布的直方图（图 1-2-5），你得到什么启示？

如果把图 1-2-5 中的分子速率区间缩短些，例如以 10 m/s、1 m/s 为区间长度，请推测一下，这时的速率分布将是怎样的一种图像？

历史上曾有人试图采用牛顿力学的方法，根据每个分子受到周围分子的作用列出运动方程，找出它的运动规律，但很快就陷入困境。



a 0°C时的速率分布



b 100°C时的速率分布

图 1-2-5 一定温度下氧分子的速率分布

温度的微观解释

从人类对冷热程度的直接感觉到伽利略制成第一支验温器，经历了漫长的岁月。如今，在实验室里能产生的最高温度已达 10^8 K ，最低温度则低至 10^{-8} K ，相差 16 个数量级。如果把目前已知的温度从小到大依次排列起来，就可以得到一个有大约 50 个数量级的温度阶梯（图 1-2-6）。

面对这个温度阶梯，我们很自然地会想到一个问题：温度的高低究竟是由什么因素决定的呢？下面我们用统计思想来进行解释。

分析与论证

我们从扩散现象和布朗运动的研究已经知道，分子的运动跟温度有关。温度越高，分子扩散得越快，布朗运动越明显，表明分子运动得越快。麦克斯韦得到的气体速率分布表明，温度越高，速率大的分子所占的比例越大，所有分子的平均速率也随之增大。由此可见，温度的高低由物质分子的运动情况所决定。

理论研究指出，温度的高低与一个热学系统内所有分子热

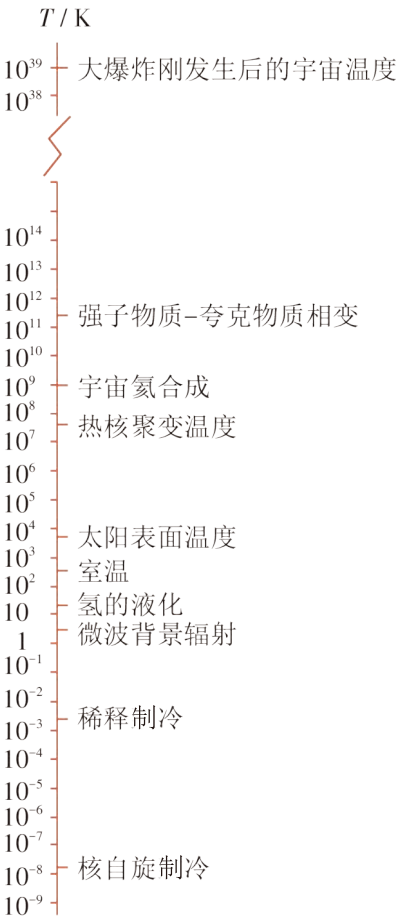


图 1-2-6 温度阶梯

运动的平均动能有关。温度升高，系统内分子热运动的平均动能增加；温度降低，系统内分子热运动的平均动能减少。因此，从分子尺度的观点来看，系统内分子的微观运动决定着系统宏观的温度。

温度是系统内所有分子热运动的平均动能的标志。

值得注意的是，系统内分子的平均动能跟系统整体做机械运动的动能是两个不同的概念。系统整体做机械运动的动能由其质量和速度决定，通常认为与温度无关，相对于参考系静止时，其动能为零。系统内分子的平均动能是指组成系统的大量分子做无规则运动所具有的动能的平均值，它的大小决定于温度和物质的量。在任何情况下，系统内分子的运动永不停息，系统内分子的平均动能总不为零，因此系统总是有一定的温度。由此可见，温度是组成物质的大量分子的热运动的集体表现，它只具有统计的意义，对单个分子来说，温度是没有意义的。

思考与讨论

初中物理中，把温度定义为“物体冷热的程度”，现在我们把温度定义为“系统内分子平均动能的标志”，请比较这两种定义的联系与区别。

气体压强的微观解释

在研究大气压的时候，有一个问题常使人们迷惑不解：在“大气海洋”底层的物体（包括人体），受到上方厚厚的大气产生的压强，这个压强为什么会跟地面附近一小瓶气体产生的压强一样呢？要回答这个问题，必须从气体压强的产生原因和决定大气压强大小的因素上去寻找。

为了简化研究，可以把气体分子看成一群弹性小球。分子撞击器壁的运动就像乒乓球对坚硬墙壁的碰撞，每次撞击都会对器壁产生一定的压力。大量分子的频繁碰撞，从宏观上会对器壁形成一个持续稳定的压力。

实验探究

用钢珠模拟分子碰撞产生的压力

如图 1-2-8 所示，让小钢珠从同一高度大量持续地落到一台电子秤的秤盘上，电子秤的示数并不做大幅度的跳动，而仅是在某个值附近摆动。这说明在大量粒子的连续撞击下，秤盘上受到的是一个持续稳定的压力。

接着，让小钢珠从更高处大量持续地落到秤盘上，秤的示数会在另一个较大的值附近变动。



图 1-2-7 在“大气海洋”的底层



图 1-2-8 用钢珠模拟分子碰撞

分析与论证

气体的压强反映着器壁单位面积上所受平均压力的大小。那么，从微观角度来看，气体压强的大小由什么因素决定呢？从上述实验中可以找到对应关系：

钢珠越密集——单位体积中的分子数越多

下落高度越大——分子的平均速率越大

指示的数值越大——分子对器壁的压力越大

由此可见，气体压强的大小跟两个因素有关，一个是单位体积中的分子数（分子的密集程度），一个是气体分子的平均动能。

气体压强是大量气体分子集体行为的反映，它同样具有统计的意义。气体分子做的是无规则运动，因此在任何时刻分子向各个方向运动的概率都相等，反映在宏观上，就是容器中各处压强的大小都相等。

思考与讨论

根据决定气体压强大小的两个微观因素，你能对“大气海洋”底层的压强，跟地面附近一小瓶空气的压强一样的问题进行解释吗？

家庭作业与活动

1. 教室里有许多不同种类的物质——铁、铜、塑料、木材、水、空气等，它们同处一室。这些物质分子的平均动能是否相同？这些物质分子的平均速率是否相同？为什么？

2. 根据温度的微观意义，有人提出以下的说法：

（1）物体的温度升高，物体每一个分子的动能都一定增加；物体的温度降低，物

体内每一个分子的动能都一定减少。

- （2）现有甲、乙两个由同种材料组成的物体，若甲的温度比乙的温度高，那么甲物体每一个分子的动能一定都比乙物体每一个分子的动能大。

你认为这两种说法对不对？为什么？

课外活动

寻找生活中正态分布的实例

麦克斯韦得出的气体分子速率分布规律并不神秘，它跟你的学习和生活十分接近。图1-2-9所示是一条古老的石阶，它记录着千千万万人的脚印。人们在这条石阶上走上走下时，脚踏在中间的多，踏在两边的少，因此每一个台

阶的中间都比两边磨损得多，显出正态分布的特征。

请寻找其他具有正态分布特征的实际例子。



图 1-2-9 一条古老的石阶

1.3 分子动理论 内能

分子力

扩散现象和布朗运动，不仅说明了组成物质的分子在永不停息地运动，而且说明物质分子不是紧紧地挤在一起的，分子之间是有空隙的。

图 1-3-1 是用扫描隧穿显微镜拍摄的石墨表面原子的排列情况，一排排亮点(碳原子)之间的暗背景显示出原子间的空隙。

分子间存在着空隙，而固体却能保持一定的形状，这启示我们：分子之间存在着相互作用力。

研究表明，分子之间同时存在着引力和斥力，它们的大小

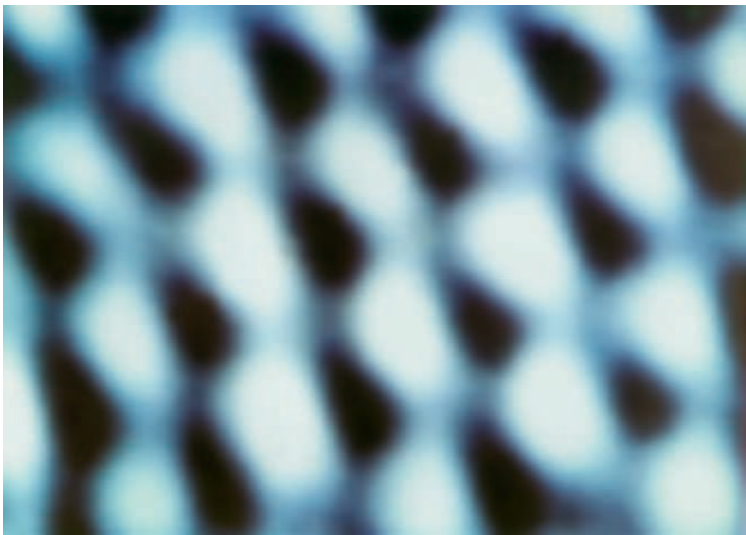


图 1-3-1 用扫描隧穿显微镜拍摄的石墨表面的原子排列情况

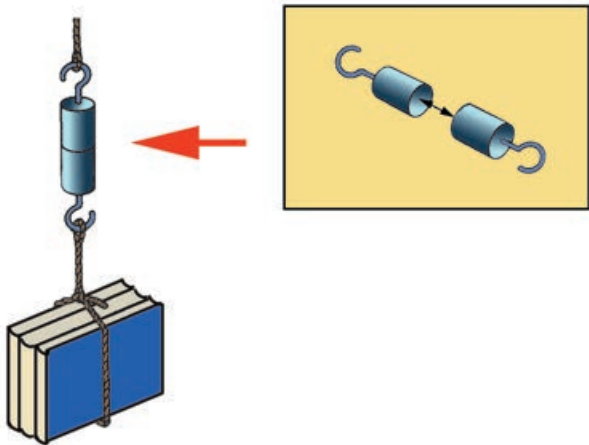


图 1-3-2 由于分子之间引力的作用，两段铅柱会结合成一体，下方挂上一定质量的重物后也不分开

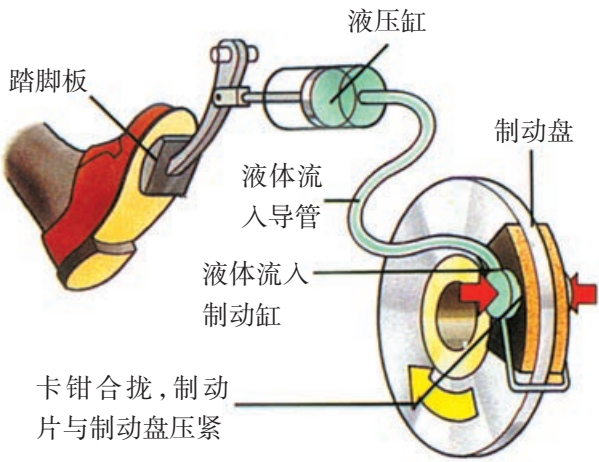


图 1-3-3 水、油等液体很难被压缩，显示分子之间斥力的作用。水压机、液压传动就是利用了它们的“不可压缩性”

都跟分子之间的距离有关。图 1-3-4 中横轴上下的两条虚线分别表示两个分子间的引力和斥力随距离变化的关系，实线表示引力和斥力的合力随距离变化的关系。当两个分子间的距离为 r_0 时，引力和斥力相互平衡，这时，我们说这两个分子处于平衡位置。 r_0 的数量级约为 10^{-10} m。

分子动理论

综上所述，我们知道，一个宏观的热学系统是由大量分子组成的；分子在永不停息地做着无规则运动；分子之间同时存在着引力和斥力。这就是分子动理论（molecular kinetic theory）的基本内容。

思考与讨论

结合图 1-3-4 讨论一下：当两个分子间的距离小于 r_0 、等于 r_0 、大于 r_0 等不同情况时，分子间相互作用力有什么特点？

初中物理也学习过分子动理论，你觉得哪些方面有了更深刻的认识？请相互交流。

分子的动能和势能

分子有一定的质量，又在不停地做着无规则运动，因此分子都具有动能。我们知道，由于地球与物体间的万有引力作用，地面附近的物体具有重力势能；由于电荷与电荷间存在的静电相互作用，电荷具有电势能。既然分子间也存在着相互作用，因此分子同样会具有势能。在物理学中，把由分子间的相对位置决定的势能，叫做分子势能。

分子势能的变化，同样由分子力做功的情况决定。

图 1-3-5 把两个分子间的相互作用跟两个点电荷间的相互

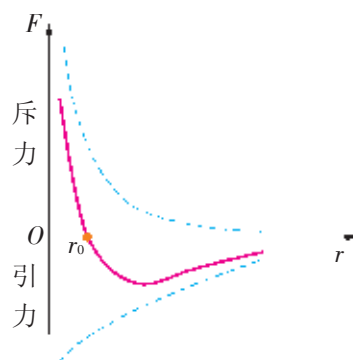


图 1-3-4 分子力与分子间距的关系

通常把分子间引力用负值表示，而斥力用正值表示。

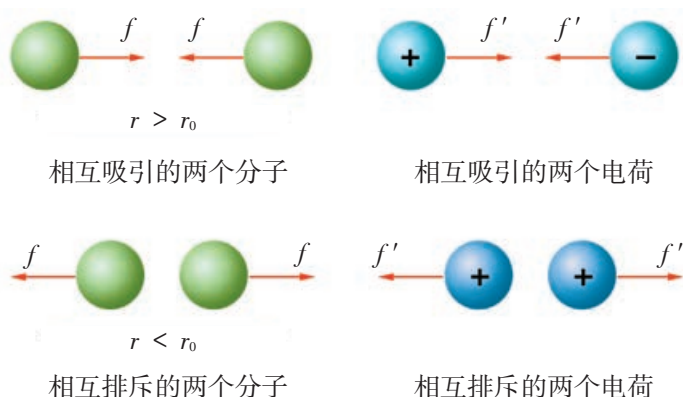


图 1-3-5 分子力与电荷间相互作用力的类比

作用做了类比。请你也用类比的方法，找出分子势能的变化与分子力做功的关系。

通过类比，可以知道，当 $r > r_0$ 时，随着分子间距离的增大（减小），分子引力做负功（正功），分子势能增加（减少）；当 $r < r_0$ 时，随着分子间距离的减小（增大），分子斥力做负功（正功），分子势能增加（减少）。总之，当分子力做正功时，分子势能减少；当分子力做负功时，分子势能增加。

物体内部分子间的距离发生了变化，在宏观上就表现为物体的体积发生了变化，所以，分子势能跟物体的体积有关。

内能

物理学中，把系统内所有分子的热运动动能和分子势能的总和，叫做系统的内能（internal energy），又叫做热力学能，用符号 U 表示。

根据内能的定义可知，在微观上，一个系统的内能大小跟它所包含的分子的多少、分子热运动的速率和分子间相互作用等因素有关。

内能是不同于机械能的另一种形式的能。由于任何系统的分子都在不停地运动，分子间又存在着相互作用，所以任何系统都具有内能。但是，某系统在一个确定状态下的内能究竟有多大是无法计算的，因此，在处理实际问题时，有意义的不是系统内能的大小，而是内能的变化量。

多学一点 如何理解分子之间既有引力又有斥力

我们先来研究一下原子间的引力和斥力是如何产生的。原子中有一个直径约 10^{-15} m 的带正电的核，核外有带负电的电子组成的电子云。整个原子呈电中性。

当两个原子相距较远时（图 1-3-6 a），可以认为相互间没有静电力的作用。

当两个原子接近到如图 1-3-6 b 所示的情况时，它们有一部分电子云互相重叠。原子 1 的电子已不能把原子 1 的核的正

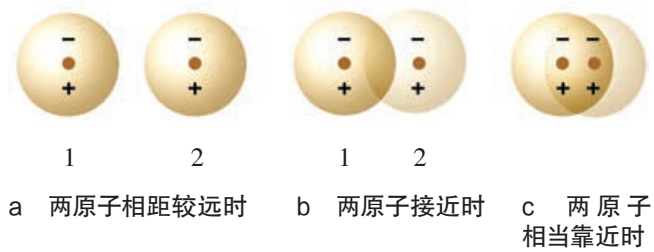


图 1-3-6 分子间相互作用的微观解释

电作用屏蔽掉,使得原子 2 的电子也受到原子 1 的核的吸引;同样,原子 1 的电子也受到了原子 2 的核的吸引。于是,两原子间产生了引力。

当两原子接近到如图 1-3-6 c 所示的情况时,两原子核间的斥力要比它们与对方原子的电子间的引力大,于是两原子间总的相互作用力就变为斥力了。

分子间的相互作用与此类似。分子力是由于构成分子的带电粒子(电子、质子)的相互作用引起的。

家庭作业与活动

- 分子间的相互作用力由引力 $f_{\text{引}}$ 和斥力 $f_{\text{斥}}$ 两部分组成,则()。
 - $f_{\text{引}}$ 和 $f_{\text{斥}}$ 是同时存在的
 - $f_{\text{引}}$ 总是大于 $f_{\text{斥}}$, 其合力总表现为引力
 - 分子之间的距离越小, $f_{\text{引}}$ 越小, $f_{\text{斥}}$ 越大
 - 分子之间的距离越小, $f_{\text{引}}$ 越大, $f_{\text{斥}}$ 越小
- 当两个分子间的距离等于 r_0 时,分子处于平衡状态。若两个分子间对外表现的分子力如图 1-3-7 所示,则两分子间的距离 r 应是()。
 - $r = r_0$
 - $r > r_0$
 - $r \geq r_0$
 - $r < r_0$
- 根据内能的定义,分别比较下列三组中各系统内能的大小,并说明道理。
 - 1 kg 50 °C 的水和 10 kg 50 °C 的水
 - 1 kg 50 °C 的水和 1 kg 80 °C 的水
 - 1 kg 100 °C 的水和 1 kg 100 °C 的水汽
- 分析下列说法中,哪些是正确的,哪些是不正确的。
 - 物体的机械能大,它的内能一定也大。
 - 物体可以同时具有内能和机械能。
 - 任何物质系统都具有内能。
 - 物体的机械能改变时,它的内能一定也变化;物体的内能改变时,它的机械能一定也变化。
- 根据你的认识,对机械能和内能这两种形式的能作一比较。

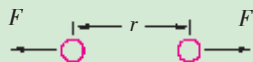


图 1-3-7

第 1 章家庭作业与活动

A 组

- 纳米(nm)是长度单位, $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ 。如果有一个边长为 1 nm 的立方体盒子,则其中可容纳的氢分子(直径约为 10^{-10} m)数目的数量级是_____。
- 1 g 食盐完全均匀分布在 $1 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 的水中,

则 1 cm^3 的盐水中所含食盐分子数目的数量级是_____。食盐的摩尔质量为 58.5 g/mol。

- 一颗小雾珠的体积大约是 $6.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^3$, 这颗小雾珠里含有的水分子数目约为_____。
- 利用单分子油膜法可以粗略测定分子大小和阿伏伽德罗常量。如果已知体积为 V 的一个油滴,

滴在水面上散开后形成的单分子油膜面积为 S ，则这种油分子的直径 $D =$ _____；如果这种油的摩尔质量为 M ，密度为 ρ ，则可推算出阿伏伽德罗常量 $N_A =$ _____。

5. 布朗运动是指 ()。
 - A. 液体分子的运动
 - B. 悬浮在液体中的固体分子的运动
 - C. 悬浮在液体中的固体微粒的运动
 - D. 液体分子与固体分子的共同运动
6. 较大的悬浮颗粒不易发生布朗运动，其原因是 ()。
 - A. 液体分子不一定与颗粒相撞
 - B. 液体分子对颗粒在所有方向上的冲撞的平均效果互相平衡
 - C. 颗粒的质量越大，越不易改变运动状态
 - D. 颗粒分子本身的热运动缓慢
7. 关于分子力做功，下列说法中正确的是 ()。
 - A. 如果分子间作用力表现为引力，则两分子间距离增大时，一定是克服分子力做功
 - B. 如果分子间作用力表现为引力，则两分子间距离减小时，一定是克服分子力做功
 - C. 如果分子间作用力表现为斥力，则两分子间距离减小时，一定是分子力做功
 - D. 如果分子间作用力表现为斥力，则两分子间距离增大时，一定是克服分子力做功
8. 两个分子甲和乙相距较远（此时它们之间的分子力可忽略），设甲固定不动，乙逐渐向甲靠近直到不能再靠近的整个过程中 ()。
 - A. 分子力总是对乙做正功
 - B. 乙总是克服分子力做功
 - C. 先是乙克服分子力做功，然后分子力对乙做正功
 - D. 先是分子力对乙做正功，然后乙克服分子力做功
9. 关于物体的内能和分子势能，下列说法中正确的是 ()。
 - A. 物体的速度增大，则分子的动能增加，内能也一定增加
 - B. 物体温度不变，内能可能变大
 - C. 物体的内能与温度有关，与物体的体积无关

D. 把物体举得越高，分子势能越大

B 组

1. 为了估测一容器中气体分子间的平均距离，需要知道的物理量是 ()。
 - A. 阿伏伽德罗常量、该气体的质量和摩尔质量
 - B. 阿伏伽德罗常量、该气体的摩尔质量和密度
 - C. 阿伏伽德罗常量、该气体的质量和体积
 - D. 该气体的密度、体积和摩尔质量
2. 走访当地的环保部门：（1）了解近 5 年来雾霾天数的变化情况；（2）取近 5 年来当地最严重的雾霾天气，对比 PM2.5 指数的变化情况；（3）了解当地雾霾天气时所含颗粒物的主要成分以及环保部门所采取的应对措施。
3. 在“用油膜法估测分子大小”的实验中，所用的油酸酒精溶液的浓度为每 1 000 mL，溶液中有纯油酸 0.6 mL，用注射器测得 1 mL 上述溶液为 80 滴，把 1 滴该溶液滴入盛水的浅盘内，让油膜在水面上尽可能散开，测得油酸薄膜的轮廓形状和尺寸如图 1-B-1 所示，图中正方形方格的边长为 1 cm。
 - （1）实验中为什么要让油膜尽可能散开？
 - （2）实验测出油酸分子的直径是多少？（结果保留两位有效数字。）
 - （3）如果已知体积为 V 的一滴油在水面上散开形成的单分子油膜的面积为 S ，这种油的密度为 ρ ，摩尔质量为 M ，试写出阿伏伽德罗常量的表达式。

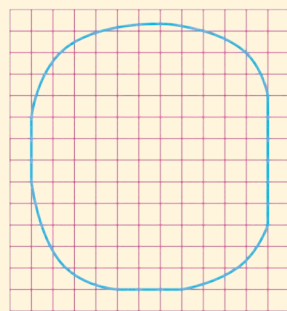


图 1-B-1

4. 设想将 1 g 水均匀分布在地球表面上，估算 1 cm^2 的表面上有多少个水分子？（已知 1 mol 水的质量为 18 g。地球的表面积约为 $5 \times 10^{14} \text{ m}^2$ ，结果保留一位有效数字。）



第2章 气体定律与人类生活

我们生活在空气的怀抱中。然而，在很长一段时期内，人们对空气的性质几乎没有研究。真是“不识庐山真面目，只缘身在此山中”^{*}。直到17世纪中叶，意大利物理学家托里拆利（E. Torricelli）揭示了“托里拆利真空”，人们才逐渐研究气体的性质。

气体具有流动性，没有一定的形状和体积。跟力学中研究物体的机械运动不同，研究气体时，我们需要解决的问题是：

应该用哪些物理量来描述气体的宏观状态？这些物理量跟气体分子的运动有什么联系？

当气体的状态发生变化时遵循什么规律？

.....

本章将探究如何描述气体的状态和研究气体状态的变化。通过实验，了解气体实验定律。认识理想气体模型，用分子动理论和统计观点解释气体压强和气体实验定律。利用气体实验定律，解决一些实际问题。

^{*} 摘引自苏轼《题西林壁》。

2.1 气体的状态

在力学中，为了描述物体做机械运动的状态，我们引进了位移、速度、动能等物理量。那么，描述气体的宏观状态，应该引入哪些物理量呢？

用温度、体积、压强描述气体的状态

我们知道，一定量气体是一个由大量分子组成的物质系统。它所反映的宏观性质多种多样，有力学性质、热学性质、几何性质等，跟它们对应的物理量就是温度、体积和压强等。由于分子永不停息地做着无规则运动，系统的各种性质经常会发生变化，要精确地描述每个时刻系统的各种性质是非常困难的，在实际应用中，往往也是不必要的。

研究表明，当一个热力学系统跟外界没有任何相互作用时，不管这个系统内各部分原有的温度和压强如何，经过相当长时间后，系统各部分将具有相同的温度和压强。如果它与外界没有能量交换，内部也没有任何形式的能量转换，系统的温度和压强将不随时间变化。这时，我们就称系统处于平衡状态（equilibrium state），简称平衡态。

处在平衡态的气体在宏观上表现为各部分的密度均匀、温度均匀、压强均匀，我们可以用一组物理量表示它的状态。描述系统平衡态性质的物理量叫做状态参量（state parameter）。温度、体积、压强就是气体的状态参量。

由于分子始终在不停地运动，所以气体系统的平衡状态也叫做热动平衡状态。

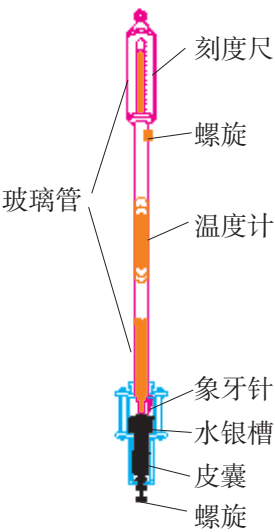


图 2-1-1 槽式气压计

槽式气压计是用一根长约 1 m、一端封闭、一端开口的玻璃管，管内注满水银后倒立在水银槽内组成的，故名。



图 2-1-2 金属压强计

实验探究

用压强计测压强

用槽式气压计测量大气压

图 2-1-1 所示是实验室常用的槽式气压计，它是根据托里拆利实验的原理制成的。使用时调节其下端螺旋，使水银面刚好接触象牙针尖，移动附在刻度尺上的游标就可以准确读出大气压值。

用金属压强计测量自行车车胎内气体的压强

如图 2-1-2 所示，用金属压强计测出自行车车胎内气体的压强。

怎样研究气体的状态变化

当气体与外界发生能量交换时,气体的状态就会发生变化。气体从一个状态变化到另一状态所经历的过程叫做**状态变化过程**。气体发生状态变化时,描述气体状态的参量中,至少有两个参量发生了变化。

那么,怎样研究气体的状态变化规律呢?

建立理想气体模型

实际气体是比较复杂的。不同气体分子的大小和结构不同,同时分子间还存在着随距离不断变化的引力和斥力作用。为了便于研究,我们需要把实际气体理想化。在物理学上,忽略分子本身体积及分子间的引力和斥力作用的气体叫做**理想气体**(ideal gas)。

实验指出,当温度不太低、压强不太大时,所有的气体都可以看作理想气体。

采用控制变量法

温度、体积、压强这三个参量之间有着密切的联系,当它们都发生变化时,情况比较复杂。为了便于研究,可以先保持其中一个参量不变,研究其他两个参量之间的关系,进而确定三个参量之间的变化规律,即理想气体在状态变化过程中所遵循的规律。

使一定质量的气体在温度保持不变的情况下发生的状态变化过程叫做**等温过程**(isothermal process)。相应地,还有**等容过程**(isochoric process)和**等压过程**(isobaric process)。

思考与讨论

实验中,怎样使得一定质量气体的温度、体积、压强分别保持不变呢?

有几位同学提出了下列各种实验方案:

使气体的压缩和膨胀缓慢地进行,就可以忽略气体的温度变化,这就是一种等温过程;

对密闭容器内的气体缓慢地加热,忽略容器的热膨胀,这就是一种等容过程;

让密闭气体始终在大气压下缓慢地膨胀或压缩,这就是一种等压过程。

你认为这些方案是否合理?请提出你的看法,并与同学交流。

作为气体状态参量之一的温度 T ,是指**热力学温度**(thermodynamic temperature)。在国际单位制中,热力学温度的单位是开尔文,简称开,符号是K。热力学温度 T 与摄氏温度 t 的关系是

$$T = t + 273.15 \text{ K} \approx t + 273 \text{ K}$$

在实际应用中,气体压强 p 的单位还有“标准大气压”(符号是atm)和“毫米汞柱”(符号是mmHg),但它们都不是国际单位制单位。

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= 76 \text{ cmHg} \\ &\approx 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} \\ 1 \text{ mmHg} &= 133.322 \text{ Pa} \\ &\approx 133 \text{ Pa} \end{aligned}$$

理想气体模型是由德国物理学家克劳修斯于1850年首先提出来的。建构理想气体,有助于在一定条件下应用理想气体模型分析和研究实际气体的问题,能用等温、等压、等容的理想过程正确认识和分析现实生活中的气体状态变化。

研究气体的状态变化,就是要找出温度、体积、压强这三个参量之间的变化关系。

案例分析

案例 已知地球的半径 $R = 6\,370\text{ km}$ ，请你设计一个简单的实验，估算出包围地球的大气的总质量。要求列出实验器材，说明实验方法，写出结果的表达式。

分析 大气压可以看成是由地球大气的重力产生的。如果把地球表面展成平面，那么整个大气的重力就等于大气压强跟地表总面积的乘积。

请根据上述思路完成对包围地球的大气总质量的估算。

家庭作业与活动

1. 关于热力学温度，下列说法中正确的是()。

- A. 热力学温度的零度是 $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，叫做绝对零度
- B. 气体温度趋近绝对零度时其体积为零
- C. 热力学温度的每度大小跟摄氏温度的每度大小相等
- D. 热力学温度的每度大小大于摄氏温度的每度大小

2. 如图 2-1-3 所示，上端开口的圆柱形汽缸竖直放置，横截面积为 $5 \times 10^{-3}\text{ m}^2$ ，用活塞封闭着一定质量的气体。若光滑活塞的质量为 2.0 kg ，则封闭气体的压强为多大？大气压强取 $1.01 \times 10^5\text{ Pa}$ ， g 取 10 m/s^2 。

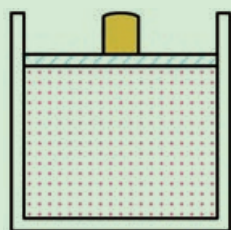


图 2-1-3

3. 著名的马德堡半球实验可简化成如图 2-1-4 的示意图。设两个半球壳拼成的球形容器的半径为 R ，大气压强为 p ，球壳内抽成真空，则要使这两个半球壳分离，施加的拉力 F 至少为()。

- A. $4\pi R^2 p$
- B. $2\pi R^2 p$
- C. $\pi R^2 p$
- D. $\frac{1}{2}\pi R^2 p$

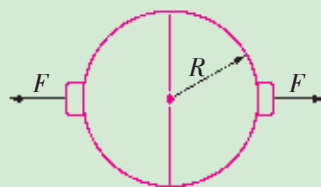


图 2-1-4

4. 如图 2-1-5 所示，在水银槽里竖立着一根充满水银的玻璃管，管顶距槽内水银面高 40 cm 。已知外界大气压强为 75 cmHg ，玻璃管的横截面积为 0.1 cm^2 ，则玻璃管的封闭端 A 的内表面受到的压力为多大？

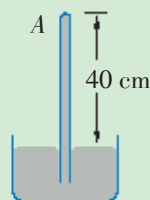


图 2-1-5

2.2 玻意耳定律

诘难中的发现

17世纪中叶，托里拆利真空的发现，引起了玻意耳研究空气性质的兴趣。他与助手胡克（R. Hooke）进行了一系列关于空气压力的实验。可是，玻意耳的工作受到当时教会中许多人的攻击，他们不相信空气有“重量”，更不相信这一“重量”能抵挡住托里拆利管中水银柱的压力。有人甚至说，管中水银柱的上升是因为水银被一根“无形的线”牵着。

为此，玻意耳设计了一个实验。他在一根一端封闭的U形管内灌入少量水银，先使左右两臂内的水银面等高，然后从较长的右臂（开端）向管内缓缓倒入一些水银，使较短的左臂（闭端）内的空气柱受压缩变短。玻意耳测出封闭端空气柱的长度和相应的两端水银面的高度差，然后再缓缓倒入一些水银，再测出空气柱的长度和相应的两端水银面的高度差，依次测出一系列数据（图2-2-1）。

玻意耳做实验时所用的U形管很长，他把U形管用绳子吊着做了约40次实验，终于得出了密闭气体在温度不变时其体积与压强的变化关系。1662年，玻意耳首次公布了他的发现。

在玻意耳的实验中，为什么可以认为封闭气体的温度保持不变？

玻意耳在实验中是怎样测出封闭端空气柱压强的？请猜测一下，玻意耳的实验会得出怎样的关系？



玻意耳（R. Boyle, 1627—1691），英国物理学家、化学家。1659年用实验阐明了气压升降的原理，并发现了关于气体的著名的玻意耳定律。

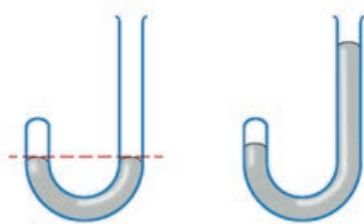


图2-2-1 玻意耳实验的示意图

探究等温过程

学生必做实验

探究等温情况下一定质量气体压强与体积的关系

设计实验

为了保证所研究的气体质量一定，必须封闭一段气体。为了便于改变气体的体积，不妨选用注射器封闭一定质量的气体。影响气体状态的参量有温度、压强和体积三个因素，为了研究压强与体积的关系，必须在等温情况下实验，为此，除保持室温恒定外，要缓慢推进注射器活塞。为知道气体的体积，可利用注射器上的刻度直接读出气体的体积。为知道气体的压强，

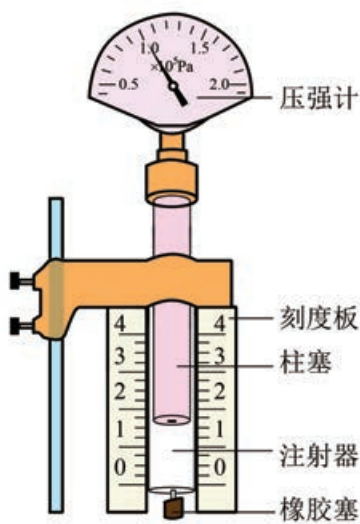


图 2-2-2 玻意耳定律实验仪示意图

需要一只压强计。

采用“玻意耳定律实验仪”进行探究，如图 2-2-2 所示，由压强计、注射器、柱塞、橡胶塞、刻度板、支架等组成。

实验操作

让注射器内封闭一定质量的气体，读出此时气体的体积和压强。通过移动柱塞，改变气体体积，记下改变后的气体体积和压强。重复多次，记下实验数据。

- 请思考：1. 实验操作过程中应该注意什么问题？
2. 压强和体积的单位怎样确定比较合理和方便？

收集证据

物理量	1	2	3	4	5	6
压强 p						
体积 V						

通过计算或描绘 $p - V$ 图像（也可先计算 $\frac{1}{V}$ 值，再描绘 $p - \frac{1}{V}$ 图像），进行数据处理。

想一想：各个小组实验中得到的 p 、 V 乘积的大小是否都应该相同？为什么？

实验结论

对于封闭在注射器内的一定质量的气体，在等温情况下，压强与体积成反比。

思考讨论

1. 描述一定质量气体的状态有温度(T)、体积(V)、压强(p)三个状态参量，上述实验过程采用了怎样的研究方法？
2. 通过上述实验得到数据后，可以采用哪些方法来处理这些实验数据，得出实验结论？

1676 年，法国物理学家马略特（E. Mariotte）也独立地总结出了温度不变时一定质量气体的压强跟体积成反比的规律。

实验表明，一定质量的理想气体，在温度不变的情况下，压强 p 与体积 V 成反比。这个结论叫做玻意耳定律（Boyle's law），是 17 世纪物理学上的一项重大发现。

玻意耳定律的公式与图像

如果用 p_1 、 V_1 和 p_2 、 V_2 分别表示一定质量气体在等温过程中任意两个状态的压强和体积，那么玻意耳定律可以用公式表示为

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad \text{或} \quad p_1 V_1 = p_2 V_2$$

在平面直角坐标系中，用纵坐标表示压强 p ，用横坐标表示体积 V ，则 $p-V$ 图像就是如图 2-2-3 所示的双曲线，这条双曲线叫做**等温线**（isotherm）。一定质量的气体，在不同的温度下，有着不同的等温线，但它们都是双曲线，如图 2-2-4 所示。

思考一下，在图 2-2-4 中，为什么温度越高，等温线就越往右上方移？

玻意耳定律的微观解释

分析与论证

玻意耳定律虽然是在实验基础上归纳出来的一条反映理想气体状态变化的宏观规律，但它在微观上有其本质的原因。

我们从前面研究气体压强的产生原因时已经知道，从微观上分析，气体压强的大小跟两个因素有关：一个是气体分子的平均动能，另一个是分子的密集程度。所以在宏观上，气体压强跟温度和体积有关。

一定质量的气体，温度保持不变时，分子的平均动能是一定的，压强的大小完全由分子密集程度决定。当体积减小为原来的一半时，分子密集程度增大为原来的 2 倍，因此压强也增大为原来的 2 倍，即气体的压强与体积的乘积保持不变。

案例分析

案例1 为适应太空环境，去太空旅行的航天员都要穿航天服。航天服是一种高科技产品，它有一套生命保障系统，这套系统为航天员提供了合适的温度、氧气和气压，让航天员在太空如同在地面上一样舒适。研究一下，航天服内为什么要有一套调节压力的系统？

分析 航天员在地球上正常生活和工作时受到的外部压强是一个大气压，身体内（如肺泡）气体产生的压强和身体外的大气压强处于平衡状态。当航天员进入太空时，体外的压强很

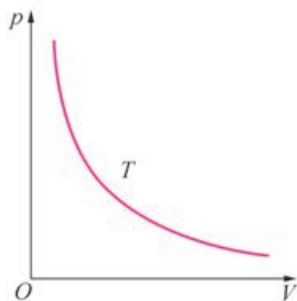


图 2-2-3 等温线

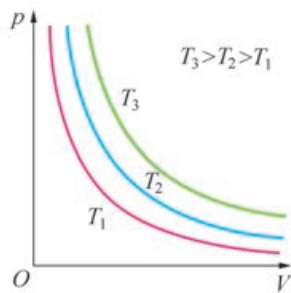


图 2-2-4 对应不同温度的几条等温线



图 2-2-5 穿上航天服的中国航天员杨利伟

快减小，根据玻意耳定律，这时肺泡内气体的体积会急剧增大，如果不采取一定措施的话，可能使肺泡膨胀破裂。当航天员返回地面时，体外的压强很快增大，同样根据玻意耳定律可知，肺泡内气体的体积会急剧减小，会使肺泡被压缩。

为了保障航天员在任何状况下体内外的压强平衡，因此航天服内需要有一套调节压力的系统。

案例2 用打气筒给一个自行车内胎打气。设每按一次打气筒，可打入压强为 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的空气 125 cm^3 。这个自行车内胎的容积是 2.0 L ，假设胎内原来没有空气，那么按了20次后，胎内空气的压强是多大？设打气过程中温度不变。

分析 以每次打入胎内的这部分气体为研究对象，它经历了一个等温过程，其状态参量如下：

打入前	打入后
压强 $p_1 = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$	压强 $p_2' = ?$
体积 $V_1 = 125 \text{ cm}^3$	体积 $V_2 = 2.0 \text{ L}$

根据玻意耳定律，可以算出打入胎内后气体的压强 p_2' 。打了20次后，胎内空气的压强 $p_2 = 20 p_2'$ 。

请根据上述分析，完成本题的解答。

思考与讨论

你认为案例2还可以怎样思考求解？请相互交流。

有一位同学通过这个案例归纳出用玻意耳定律求解气体问题的基本思路：明确研究对象→确定状态参量→列式算出结果。你认同他这个解题思路吗？

家庭作业与活动

- 用注射器和其他相关的器材，设计一个实验，粗略地验证玻意耳定律。要求说明实验的主要步骤和应测物理量，并列相关表达式。
- 一个气泡从水面下 40 m 深处缓缓上升到水面，假定水的温度均匀，水面上方的压强为 1 atm ，则气泡到达水面时的体积约为原来的 ()。
A. 3 倍 B. 4 倍
C. 5 倍 D. 6 倍
- 如图 2-2-6 所示，某种自动洗衣机进水时，与洗衣缸相连的细管中会封闭一定质量的空气，通过压力传感器可知管中的空气压力，从而控

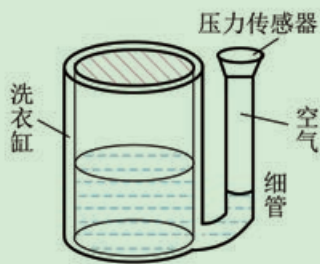


图 2-2-6

制进水量。假设洗衣缸的水位变化时，细管中的空气温度不变，那么当洗衣缸内水位升高时，细管中被封闭空气的体积和压强的变化情况是

- ()。
- A. 体积不变，压强变小
 - B. 体积变小，压强变大
 - C. 体积不变，压强变大
 - D. 体积变小，压强变小
4. 某地区空气污染较严重，一位学生从桶装纯净水得到启发，提出用桶装的净化压缩空气供气。设每人 1 min 内呼吸 16 次，每次需吸入 1 atm 的净化空气 500 mL，而每个桶能装 10 atm 的净化空气 20 L，假定这些空气可以全部被吸完。设温度保持不变，估算一下每人每天需吸多少桶净化空气，请对这位同学的提议作出评价。

课题研究

用传感器和计算机研究气体压强与体积的关系

实验主要仪器的示意图如图 2-2-7 所示。

操作步骤：

1. 将压强传感器接入数据采集器。点击软件主界面上的实验条目“气体压强与体积的关系”，打开软件。
2. 移动针筒的活塞，选定初始体积（如 12 mL），并把针筒通过软管与压强传感器的测试口紧密连接。

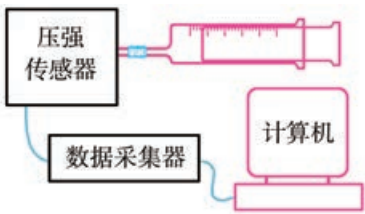


图 2-2-7 用传感器和计算机研究气体的压强与体积关系示意图

3. 输入当前体积 $V = 12\text{ mL}$ ，点击“数据记录”，记下气体体积为 12 mL 时所对应的压强数据。改变针筒内气体的体积，输入体积读数，同样点击“数据记录”，记录相应的压强数据。
4. 重复上述实验，记录几组数据，点击“绘图 V”，将得到与各组记录数据对应的压强与体积的一组描点，如图 2-2-8 所示。

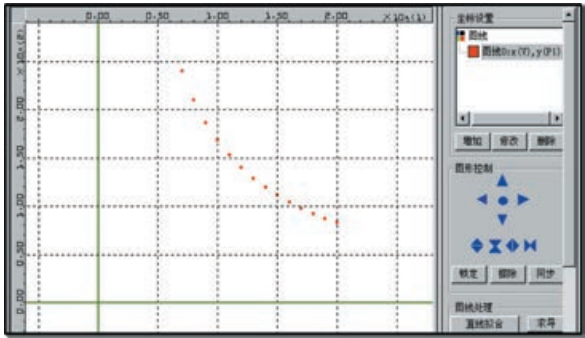


图 2-2-8 描绘 p-V 图像

2.3 查理定律和盖 - 吕萨克定律



图 2-3-1 探究等容过程的实验装置

在发现玻意耳定律 100 多年之后，两位法国科学家查理（J. Charles）和盖 - 吕萨克（J. Gay-Lussac）分别找到了一定质量气体在等容过程和等压过程中的状态变化规律。

探究等容过程

实验探究 探究等容过程的规律

实验装置如图 2-3-1 所示。在玻璃管内封闭着一定质量的空气。记下初始状态的室温 t_0 和压强 p_0 ，然后将玻璃管浸在盛有热水的烧杯中，并保持管内空气体积不变。过一会儿，估计管内气体温度与杯中热水温度相等时，测出温度 t 和管内气体压强 p 。改变杯中热水的温度（每次都保持空气体积不变），重复上面的测量。如此可得到相应的几组数据，如下表。

物理量	1	2	3	4	5
温度 $T(=273+t)/\text{K}$	301	331	352		
压强 $p/(\times 10^5 \text{ Pa})$	1.0	1.1	1.3		
$\frac{p}{T}$	0.0033	0.0033	0.0033		

实验表明，一定质量的理想气体，在体积不变的情况下，压强 p 与热力学温度 T 成正比。
这个结论叫做查理定律（Charles's law）。

查理定律的公式与图像

如果用 T_1 、 p_1 和 T_2 、 p_2 分别表示一定质量气体在等容变化过程中任意两个状态的热力学温度和压强，那么查理定律的公式可表示为

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

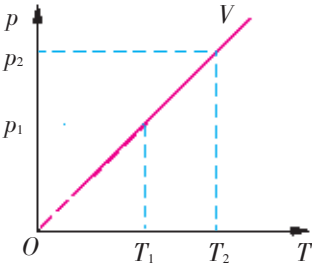


图 2-3-2 等容线

在平面直角坐标系中，用纵坐标表示压强 p ，用横坐标表示热力学温度 T ，那么 $p-T$ 图像如图 2-3-2 所示。这条倾斜直

线叫做**等容线** (isochore)。

一定质量的气体, 保持不同的体积, 改变其温度和压强, 可以作出一系列不同的等容线, 它们都是过原点的倾斜直线, 如图 2-3-3 所示。

试比较图 2-3-3 中体积 V_1 、 V_2 、 V_3 的大小, 你认为可以从哪些方面进行判断? 请相互交流。

根据分子动理论, 很容易对查理定律作出解释。一定质量的气体保持体积不变时, 分子的密集程度也保持不变。温度升高后, 分子的平均动能增加, 根据压强产生的微观机理可知, 气体的压强就会增大。

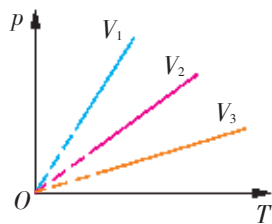


图 2-3-3 对应不同体积的几条等容线

案例分析

案例1 某登山运动员在一次攀登珠穆朗玛峰的过程中, 他手表的表面玻璃没有受到任何撞击, 却突然爆裂了。

查阅该手表出厂时给出的参数为: $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时表内气体压强为 $1 \times 10^5\text{ Pa}$, 当内外压强差超过 $6 \times 10^4\text{ Pa}$ 时, 手表表面玻璃可能爆裂。若已知当时气温是 $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$, 那么手表表面玻璃爆裂时表内气体压强为多大? 外界大气压强为多大?

分析 手表的表壳与表面玻璃组合可以看成是一个密闭容器, 出厂时表壳内封闭着一定质量的空气, 气压是一个大气压。手表出厂后随登山运动员上珠峰, 可以认为表壳内的气体经历了一个等容过程 (不考虑表壳的热胀冷缩)。

根据查理定律可算出表壳内气体在山上的压强, 结合表面玻璃爆裂条件, 即可求出当时的外界大气压。

解答 表壳内气体始、末两状态的状态参量如下:

初态	末态
$T_1 = (273 + 27)\text{ K}$ $p_1 = 1 \times 10^5\text{ Pa}$	$T_2 = (273 - 13)\text{ K}$ $p_2 = ?$

由查理定律得手表表面玻璃爆裂时, 表内气体的压强为

$$p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1 = \frac{260}{300} \times 1 \times 10^5\text{ Pa} = 8.7 \times 10^4\text{ Pa}$$

设此时外界大气压为 p_h , 则表壳内外气体压强差

$$\Delta p = p_2 - p_h$$

所以外界大气压为

$$p_h = p_2 - \Delta p = 8.7 \times 10^4\text{ Pa} - 6 \times 10^4\text{ Pa} = 2.7 \times 10^4\text{ Pa}$$

等压过程与盖-吕萨克定律

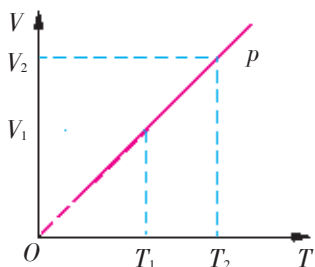


图 2-3-4 等压线

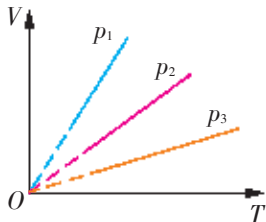


图 2-3-5 一族等压线

案例2 一定质量的理想气体，在压强不变的情况下，体积 V 与热力学温度 T 成正比，用公式可表示为 $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$ 。这个结论是法国科学家盖-吕萨克通过实验得到的，叫做盖-吕萨克定律（Gay-Lussac's law）。

请你仿照等温过程和等容过程，用图像表示出盖-吕萨克定律。

解答 在平面直角坐标系中，用纵坐标表示体积 V ，横坐标表示热力学温度 T ，根据盖-吕萨克定律，其 V - T 图像如图 2-3-4 所示，这条倾斜直线叫做等压线。

如果使一定质量的气体保持在不同压强下改变其温度和体积，就可以得到一族等压线，如图 2-3-5 所示。

你怎样判断图 2-3-5 中的压强 p_1 、 p_2 、 p_3 的大小关系？

根据分子动理论，同样可对盖-吕萨克定律作出微观解释。因为一定质量的气体温度升高时，分子的平均动能增加，为了保持其压强不变，必须相应地增大气体的体积，使分子的密集程度减小，这正是盖-吕萨克定律的结果。

多学一点

理想气体状态方程

如果一定质量理想气体的三个状态参量（ T 、 V 、 p ）同时发生变化，那么，变化前后的这些参量之间遵循什么规律呢？

设一定质量理想气体始、末两状态用 A 、 B 表示，对应的状态参量分别为 T_A 、 V_A 、 p_A 和 T_B 、 V_B 、 p_B 。为了找出这两组参量之间的关系，我们让这些气体先经历一个等温过程，变化到中间态 C ，其温度、压强、体积分别为 $T_C = T_A$ 、 p_C 、 $V_C = V_B$ 。由玻意耳定律知

$$p_A V_A = p_C V_C = p_C V_B \quad (1)$$

再让它经历一个等容过程（ $V_C = V_B$ ），变化到末状态 B ，由查理定律知

$$\frac{p_C}{T_C} = \frac{p_C}{T_A} = \frac{p_B}{T_B} \quad (2)$$

由 (1) 式得
$$p_C = \frac{p_A V_A}{V_B} \quad (3)$$

代入(2)式,整理得
$$\frac{p_A V_A}{T_A} = \frac{p_B V_B}{T_B} \quad (4)$$

上式表示,一定质量的理想气体在不同状态时,其压强和体积的乘积与热力学温度的比值是不变的。这个结论叫做一定质量的**理想气体状态方程**(state equation of ideal gas)。用公式可表示为

$$\frac{pV}{T} = C \quad (\text{恒量}) \quad (5)$$

或
$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (6)$$

家庭作业与活动

1. 冬天,剩有半瓶热水的保温瓶经过一个夜晚,第二天拔瓶口的软木塞时,觉得很紧,不易拔出来,其主要原因是()。
A. 软木塞受潮膨胀
B. 瓶口因温度降低而收缩变小
C. 白天气温升高,大气压强变大
D. 瓶内气体因温度降低而压强减小
2. 取一根两端开口的细玻璃管,一端通过橡皮塞与一个玻璃泡相连,另一端竖直插入水槽,并使管内吸入一段水柱。这就是一支伽利略验温器(图2-3-6)。一位同学认为,利用这个装置,也可以粗略地验证查理定律。
你认为上述看法是否合理,请说明你的理由。如认为合理,请提出实验方案。
3. 氧气瓶在车间里充好气,瓶内压强达到 $1.5 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。当把氧气瓶运送到工地上后,测得瓶内压强降为 $1.35 \times 10^7 \text{ Pa}$ 。已知车间里的温度为 27°C ,工地上的温度为 -3°C 。试判断氧气瓶在运输途中是否漏气。氧气瓶的热膨胀忽略不计。
4. 一户居民因家中厨房管道煤气泄漏发生爆炸事故。事后技术人员估计爆炸时厨房温度从常温迅速升高到 1800°C 。试估算此时产生的气体压强约为大气压的多少倍。
5. 一位同学提出一个粗略地验证盖-吕萨克定律的实验步骤。如图2-3-7所示,在一个大烧瓶中,插入一根带橡皮塞的弯成直角的玻璃管,管的水平部分留有一水滴。请你从物理原理上说明,用这个装置验证盖-吕萨克定律时,还需要添加哪些器材?写出实验的主要步骤。

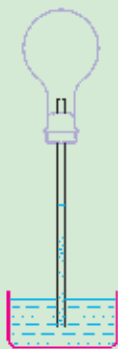


图 2-3-6 伽利略验温器

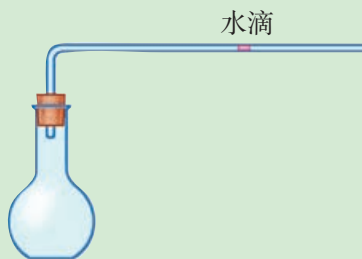


图 2-3-7 探究等压过程的实验装置

第 2 章 家庭作业与活动

A 组

1. 一个圆柱形汽缸，缸内有一个可以无摩擦滑动的活塞。已知活塞的横截面积为 S ，活塞所受重力为 G ，大气压强为 p_0 。当按图 2-A-1 中三种方式放置时，活塞均保持平衡，则缸内气体的压强分别为：

$p_a = \underline{\hspace{2cm}}$ ； $p_b = \underline{\hspace{2cm}}$ ；
 $p_c = \underline{\hspace{2cm}}$ 。

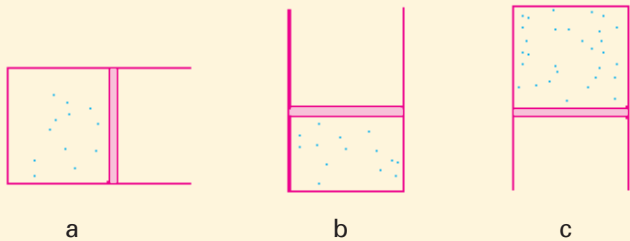


图 2-A-1

2. 一定质量的理想气体，当保持体积不变时，压强随温度升高而增大。请用分子动理论解释。
3. 将一定质量的空气装入气瓶内，并对它进行等温压缩。如果这些空气可以看成理想气体，那么图 2-A-2 中能正确表示压缩过程中空气的压强 p 和体积 V 关系的是（ ）。

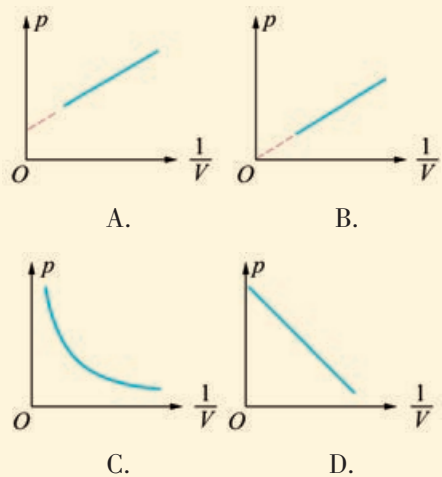


图 2-A-2

4. 设有一定质量的理想气体，处于某个初始状态。现使它经过状态变化后温度不变，则下列过程

- 中可能做到的是（ ）。
- A. 先保持压强不变，使它的体积膨胀，然后保持体积不变，减小压强
- B. 先保持压强不变，使它的体积缩小，然后保持体积不变，减小压强
- C. 先保持体积不变，增大压强，然后保持压强不变，使它的体积膨胀
- D. 先保持体积不变，减小压强，然后保持压强不变，使它的体积膨胀

5. 气压式保温瓶内封闭的空气体积为 V ，外界大气压为 p_0 ，瓶内水面低于出水口高度为 h ，水的密度为 ρ ，初始情况如图 2-A-3 所示，欲使水从瓶中流出，则瓶内气体体积的压缩量至少为多大？

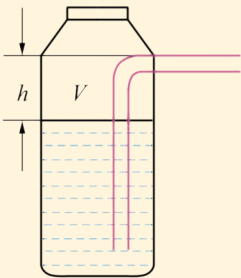


图 2-A-3

6. 一定质量的理想气体被轻质活塞封闭在可导热的汽缸内，活塞相对于底部的高度为 h ，如图 2-A-4 所示。可沿汽缸无摩擦地滑动，取一小盒沙子缓慢地倒在活塞的上表面上，沙子倒完

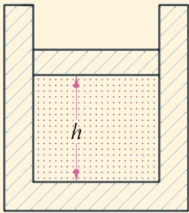


图 2-A-4

时, 活塞下降了 $\frac{h}{4}$ 。再取相同质量的一小盒沙子缓慢地倒在活塞的上表面上, 外界大气压强和温度始终不变, 求此次沙子倒完时活塞距汽缸底部的高度。

B 组

1. 如图 2-B-1 所示, 在一根一端封闭的粗细均匀的细玻璃管中有一小段水银柱, 封闭着一定质量的空气, 现在要用它测定大气压, 那么:

- (1) 还需要用什么器材?
- (2) 说明实验主要步骤;
- (3) 用实验中测量的物理量写出大气压强的表达式。



图 2-B-1

2. 医院里给病人打“吊针”(静脉滴注)的装置如图 2-B-2 所示。在讨论关于药液滴注速度快慢的原因时, 有两位同学产生了分歧。

一位同学说: 随着瓶中药液的逐渐减少,

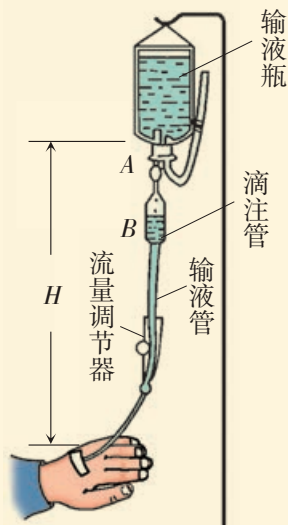


图 2-B-2

它产生的压强变小, 药液滴注的速度会变慢。

另一位同学说: 根据实际观察, 药液是均匀滴注的, 没有出现变慢的现象。

你同意哪一种说法? 请说明你的理由。

3. 1697 年法国物理学家帕平发明了高压锅。高压锅与普通铝锅不同, 锅盖与锅体嵌合旋紧, 加上锅盖与锅体之间有橡皮密封圈, 所以锅盖与锅体之间不会漏气。在锅盖中间有一排气孔, 上面再套上类似砝码的限压阀, 将排气孔堵住。当加热高压锅, 锅内气体压强增大到一定程度时, 气体就把限压阀顶起来, 这时水蒸气就从排气孔向外排出。由于高压锅内的压强大, 温度高, 食物容易煮熟。假设锅内气体可以看成理想气体, 已知排气孔的直径为 0.3 cm , 外界大气压为 $1.0 \times 10^5\text{ Pa}$, 温度为 20°C , 要使高压锅内的温度达到 120°C , 则限压阀的质量应为多少 (g 取 10 m/s^2)?

4. 图 2-B-3 是农村中常用来喷洒农药的小型压缩喷雾器结构示意图。其贮液筒 A 的容积为 7.5 L , 现装入 6 L 的药液。关闭阀门 K, 用打气筒 B 每次打入 $1 \times 10^5\text{ Pa}$ 的空气 300 cm^3 。设下列过程中温度都保持不变。

- (1) 要使药液上方气体的压强为 $4 \times 10^5\text{ Pa}$, 应按压几次打气筒?
- (2) 当贮液筒 A 中有压强为 $4 \times 10^5\text{ Pa}$ 的空气时, 打开 K 可喷射药液。当药液不能喷射时, 贮液筒内还剩余多少体积的药液?

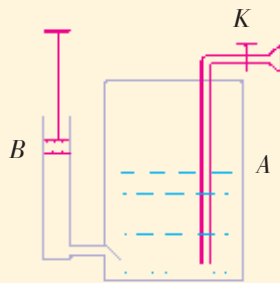


图 2-B-3



第 3 章 固体、液体与新材料

生活在地球上的人类，在自然界的基础上，营造了一个五彩缤纷的世界。从我们的生活、娱乐、交通上的设施，到生产、科研上的装备，千姿百态，琳琅满目。构筑这一切的物质基础就是材料。近几十年来，液晶材料、半导体材料、纳米材料等新材料层出不穷，材料科学方兴未艾。材料的研制与开发涉及固体和液体的许多性质。那么：

固体和液体有哪些性质？

半导体材料有什么特性和应用？

为什么液晶那么神奇？

为什么纳米材料有如此广阔的发展前景？

本章将以新材料对人类生活和社会发展的影响为线索，研究固体和液体的性质及它们的微观结构，进一步认识物质；探究液体的表面性质，了解液晶材料、半导体材料、纳米材料的主要性质及应用，体会材料科学技术对人类的影响。

3.1 固体的性质

怎样区分晶体和非晶体

我们知道，固体有**晶体**(crystal)和**非晶体**(noncrystal)之分。如果把石英、玻璃、云母、明矾、味精、食盐、砂糖、蜂蜡、松香这些固体放在你面前，你将怎样区分哪些是晶体，哪些是非晶体？

实验探究 1 从外形来区分晶体和非晶体

用放大镜观察砂糖颗粒和松香颗粒。观察时用镊子翻动颗粒，注意颗粒各个面的形状，并对它们的外形加以描述。

把砂糖颗粒和松香颗粒碾碎，再放在放大镜下观察。碾碎前后这些颗粒在外形上有什么变化？

可以发现：砂糖颗粒总是保持一种规则的几何形状（立方体）；而松香颗粒则不是这样，不论颗粒大小还是外形都是不规则的。研究得出，外形规则是晶体的一个本质特征。因此，砂糖是晶体，松香是非晶体。

除了形状是否规则外，晶体和非晶体在物理性质上也有差异。

图 3-1-2 所示为一些常见的晶体。这些晶体在物理性质上有些什么特征呢？让我们通过实验进行研究。



a 用放大镜观察颗粒



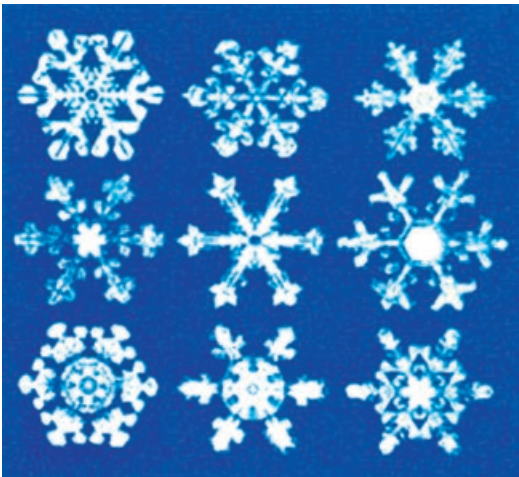
b 观察用镊子翻动的颗粒

图 3-1-1 观察固体的外形

物理性质（如导热性、导电性、导光性、抗压性等）中与方向有关的特性叫做**各向异性**；与方向无关的特性叫做**各向同性**。



a 石英晶体



b 雪花晶体图案



c 世界上最大的石膏晶体

图 3-1-2 常见的一些晶体

实验探究 2 从物理性质来区分晶体和非晶体

从初中物理学习已经知道，萘、硫代硫酸钠（海波）、冰等晶体，具有确定的熔点；而松香、石蜡等非晶体，没有确定的熔点。因此我们可以从有没有确定的熔点来区分晶体和非晶体。

取一张云母薄片，在上面涂一层很薄的石蜡，然后用烧热的钢针去接触云母片。观察接触点周围的石蜡熔化后所成的形状。再在玻璃片上做同样的实验，观察石蜡熔化后所成的形状。

比较观察的结果（图 3-1-3）。你能得出什么结论？

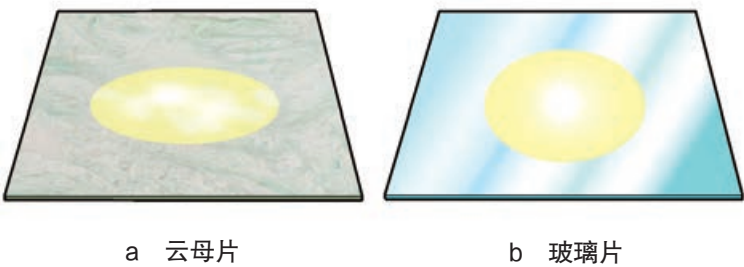


图 3-1-3 比较晶体和非晶体的导热性

实验表明：像云母这样的晶体，在各个方向上的导热性能不同，即显示各向异性（anisotropy）；而像玻璃这样的非晶体，在各个方向上的导热性能相同，即显示各向同性（isotropy）。

通过上面的实验探究，请总结一下，能利用固体的哪些特性来区分晶体和非晶体？

怎样区分单晶体和多晶体

如果一块具有规则形状的晶体，把它碾成小颗粒后，这些小颗粒仍然保持与原来整块晶体形状相似的规则外形，这样的晶体叫做单晶体（single crystal）。雪花、食盐小颗粒就是单晶体。

如果一块晶体，它是由许多取向不同的单晶体颗粒（晶粒）组成的，这样的晶体叫做多晶体（polycrystal）。食盐受潮粘成的大“疙瘩”，就是多晶体。

金属在通常条件下都是多晶体，用金相显微镜（图 3-1-4）观察磨光了的铜、铝等金属的表面，可以发现它们都是由大量微细的晶粒构成的，而且这些晶粒的取向也各不相同。

多晶体有确定的熔点，但由于它是由许多单晶体杂乱无章地组合成的，因而没有一定的几何形状，也不显示各向异性。在技术上，可以采用一定的工艺把多晶体制成单晶体，如半导体材料单晶硅、单晶锗等。



图 3-1-4 金相显微镜

怎样区分单晶体和多晶体？平时见到的各种金属材料，如铁、铜等，它们是单晶体还是多晶体？

固体性质的微观解释

为什么晶体和非晶体在外形和物理性质上有那样大的差异呢？

科学家发现，组成晶体的微观粒子（分子或原子、离子）依照一定的规则在空间排成整齐的行列，这种有规则的行列叫做晶体的空间格点（space lattice），也称晶体点阵（晶格）。在晶体中，微观粒子之间的相互作用很强，粒子的热运动不足以克服这种相互作用而破坏空间格点结构，它只能使粒子在一定的平衡位置附近不停地做微小振动。图 3-1-5 是食盐晶体的空间格点示意图。

如图 3-1-6 所示是一个平面上晶体内部微粒的排列情况，在沿不同方向所画的等长直线 AB、AC、AD 上，微观粒子的数目不同。直线 AB 上粒子较多，直线 AD 上较少，直线 AC 上更少。由于在不同方向上物质微粒的排列情况不同，才引起晶体的不同方向上物理性质的不同。

同样的原子，由于所组成的空间格点不同，会形成形状和性质都不同的晶体。例如，石墨晶体的空间格点中碳原子为层状结构（图 3-1-7），在每层上，原子排列成六角形蜂巢状，层与层之间距离较大，各层之间相互作用力很弱。因而石墨质地松软，可以用来制作粉状润滑剂、铅笔芯等。金刚石晶体的空间格点中碳原子排列成立方单元型结构（图 3-1-8），原子间的作用力很强。因而金刚石具有很强的硬度，可以用来切割玻璃，钻入坚硬的岩石。

磷原子也能形成不同的晶体。白磷和红磷都是单质磷晶体，但白磷是立方体结构，而红磷是像石墨那样的层状结构。

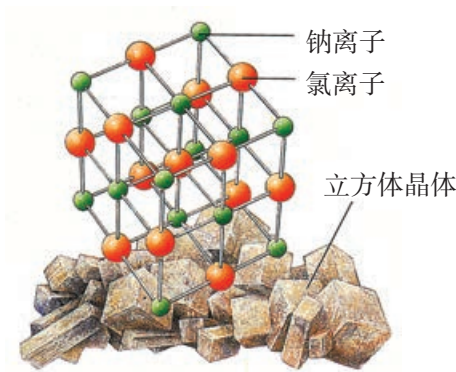


图 3-1-5 食盐晶体的空间格点示意图

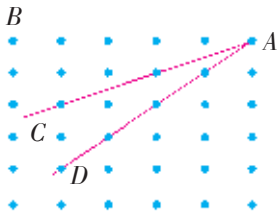


图 3-1-6 晶体各向异性的微观解释

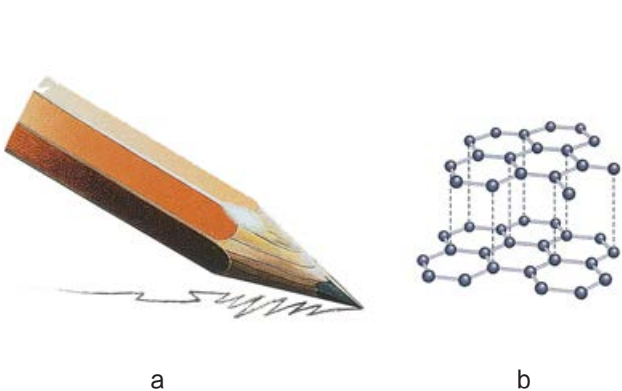


图 3-1-7 石墨晶体的空间格点示意图

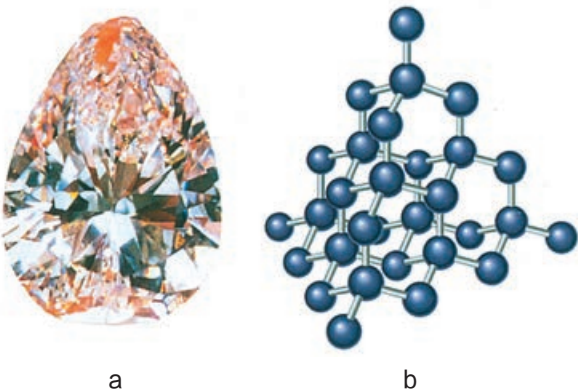


图 3-1-8 金刚石晶体的空间格点示意图

晶体和非晶体的相互转化

物质的状态取决于内因（物质结构）和外因（如温度等），而物质状态的变化是一个由量变到质变的过程，如达到一定的温度时晶体可变为非晶体。

晶体和非晶体可以相互转化。例如，天然水晶是晶体，而经熔化后再凝结的水晶（即石英玻璃）是非晶体。非晶体的玻璃经过相当长的时间会生成微小的晶体，形成透明性减弱的模糊斑点，因此古建筑的窗玻璃常出现局部结晶。实验表明，在冷却得足够快且冷却到足够低的温度时，几乎所有的材料都能成为非晶体。例如，熔化晶体硫，并使它的温度超过 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，然后把它倒入冷水，就能得到柔软的非晶体硫。在适当情况下，非晶体硫又可变成晶体硫。

家庭作业与活动

1. 下列物质中，哪些是单晶体？哪些是多晶体？哪些是非晶体？

石英、雪花、铁、沥青、食盐、橡胶、硅、单晶锗、玻璃、明矾、松香、石墨、硫酸铜、金刚石

2. 图 3-1-9a、b 所示是两种不同物质的熔化曲线，根据曲线，你认为在下列说法中正确的是（ ）。

- A. a 是一种晶体的熔化曲线
B. b 是一种晶体的熔化曲线
C. a 是一种非晶体的熔化曲线
D. b 是一种非晶体的熔化曲线

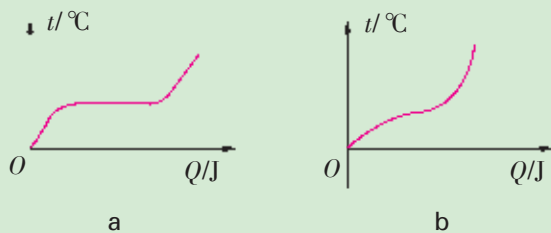


图 3-1-9

3. 下列说法中正确的是（ ）。

- A. 显示各向异性的固体必定是晶体
B. 不显示各向异性的固体必定是非晶体
C. 具有确定熔点的固体必定是晶体
D. 不具有确定熔点的固体必定是非晶体

4. 下列说法中正确的是（ ）。

- A. 有规则的几何外形的固体一定是晶体
B. 晶体的各向异性是由于组成它的微观粒子具有空间格点的结构
C. 晶体一定显示各向异性
D. 某些物质的微观粒子能够形成几种不同的空间格点

5. 关于晶体和非晶体，下列说法中正确的是（ ）。

- A. 具有各向同性的物体一定没有确定的熔点
B. 晶体熔化时，温度不变，则内能也不变
C. 通常的金属材料在各个方向上的物理性质都相同，所以这些金属都是非晶体
D. 晶体和非晶体在适当条件下可互相转化

3.2 液体的表面性质

为什么荷叶上的露珠是那样晶莹剔透？为什么有的昆虫能在水面上“亭亭玉立”？为什么五彩缤纷的肥皂泡都是球形的？这些现象（如图 3-2-1 所示）都涉及液体的表面性质。



a 露珠晶莹剔透



b 大黽蟾在水面上“亭亭玉立”

图 3-2-1 液体的几种表面现象

探究液体表面张力现象

实验探究

观察液体表面张力现象

1. 在杯子内装满水，试着把若干枚小硬币轻轻地平放在水面上。观察水面形状有什么变化？小硬币为什么不沉下去呢？

2. 用金属丝制成如图 3-2-2 所示各种形状的框架, 分别把它们浸入肥皂液内, 轻轻取出后观察框架上皂膜的形状。

如图 3-2-3 a 所示，用针捅破金属圆环棉线上边的皂膜，棉线的形状有什么变化？如图 3-2-3 b 所示，为什么金属框上的皂膜把细金属丝向左拉？对图 3-2-3 c 和图 3-2-3 d 所形成的皂膜形状，你有什么猜测？

3. 如图 3-2-4 所示, 把橄榄油滴入水和酒精的混合液中, 橄榄油滴呈什么形状?

这些实验表明，液体的表面就像紧绷着的橡皮膜，它有着一种收缩的趋势。使液体表面具有收缩趋势的力叫做**表面张力**（surface tension）。

那么，表面张力是怎样产生的呢？

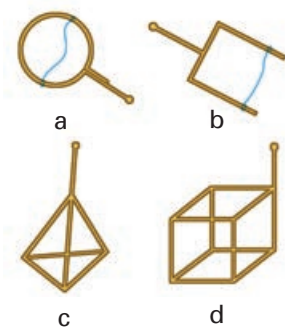


图 3-2-2 观察表面张力现象用的金属框架

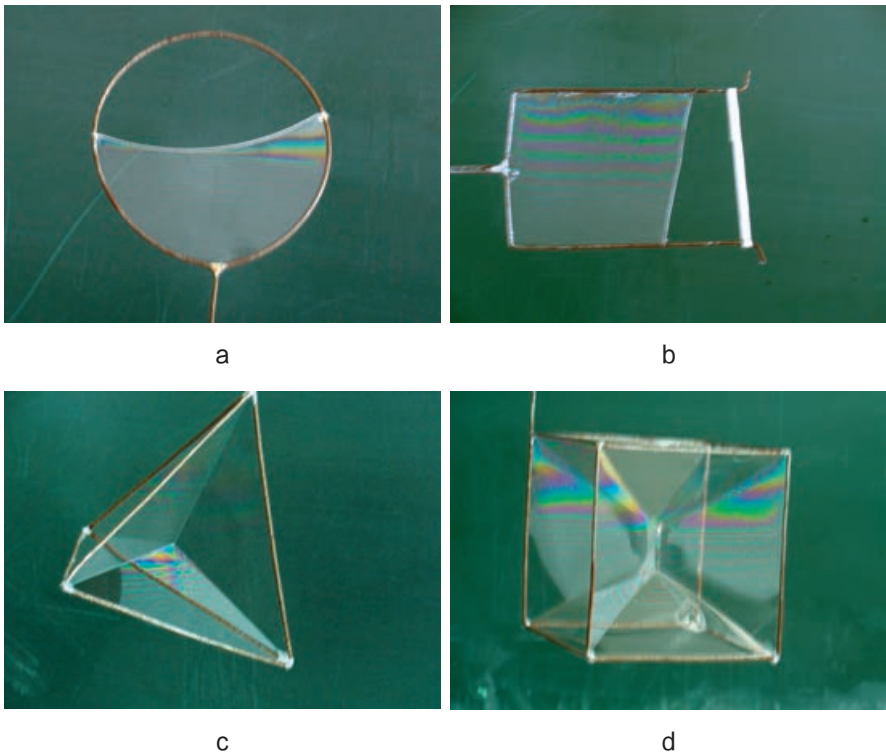


图 3-2-3 观察表面张力现象

液体表面张力的产生原因

分析与论证

图 3-2-5 所示的是液体表面层附近分子的大致分布情况。液体跟气体接触的表面存在着一个薄层叫做表面层。表面层的分子要比液体内部稀疏些，即分子间距要比在液体内部的大一些，分子间的相互作用表现为引力。

如图 3-2-6 所示，在液体内部，液体分子所受到的分子力是平衡的，而在表面层里，液体分子受到来自液体内部分子的引力要大于来自液体表面附近气体分子的引力，因此它们有着

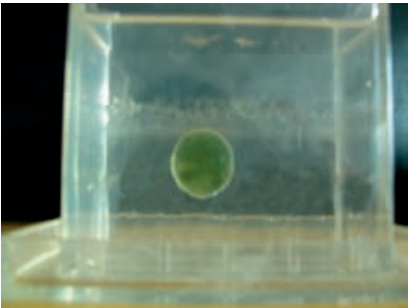


图 3-2-4 橄榄油滴呈球形

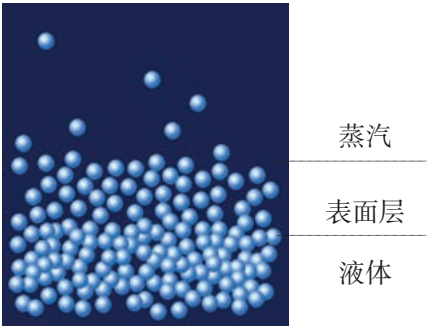


图 3-2-5 液体表面层附近的分子分布

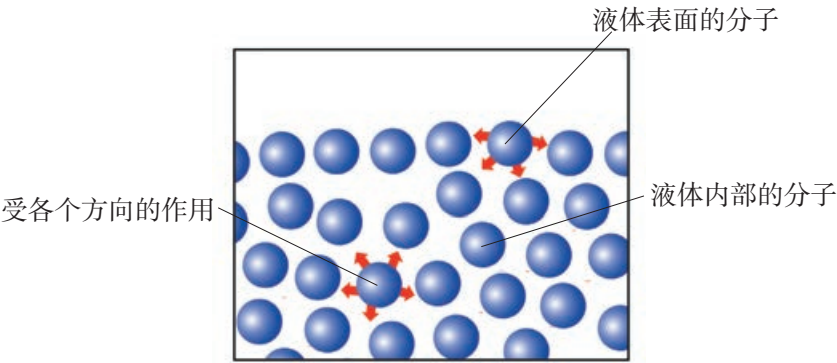


图 3-2-6 液体表面张力的成因

进入液体内部的趋势,这就是液体表面有收缩趋势的微观本质。

如果在液面上画一条分界线 MN , 把液面分为 A 和 B 两个部分 (图 3-2-7), 那么, 由于表面层中分子间的引力, 液面 A 对液面 B 有引力 F_1 , 液面 B 对液面 A 有引力 F_2 。由于 MN 处于静止状态, 所以 F_1 和 F_2 大小相等, 方向相反, 这个力的作用是使液体表面像一张绷紧的膜, 故称为表面张力。表面张力的方向总是沿着与液面相切的方向。作用在液面一条分界线上的表面张力, 总是跟这条分界线垂直。

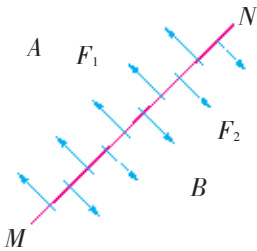


图 3-2-7 液体表面张力的方向

请你用表面张力解释本节开始时提到的几个现象。

多学一点

液体表面张力的大小

实验表明, 作用在液面一条分界线上的表面张力 f , 其大小与这条分界线的长度 L 成正比, 即

$$f = \alpha L$$

式中, α 是表面张力系数, 在数值上等于作用在液面单位长度分界线上的表面张力的大小。实验表明, 表面张力系数随温度的上升而变小。有的杂质可使液体的表面张力系数增大, 有的则相反。能使表面张力系数减小的物质叫做表面活性物质。液态金属的表面张力系数很大, 水的表面张力系数较小。

几种常见液体的表面张力系数

物质	$t / ^\circ\text{C}$	$\alpha / (\times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1})$
水	10	74.2
	18	73.0
	30	71.2
酒精	20	22
甘油	20	65
水银	20	540

液体表面张力的应用实例

在自然界、日常生活和科学研究中, 常能看到表面张力现象, 请你选择一些现象并作出解释。

案例分析

案例1 在培养皿内注入清水, 让泡沫塑料块浮在水面上。在泡沫塑料块旁边轻轻地滴入几滴酒精, 泡沫塑料块就会“自己”运动起来。请你解释这一现象。

解答 漂浮在水面上的泡沫塑料块, 原来处于平衡状态。滴入酒精后, 泡沫塑料块旁边的这部分液体的表面张力较另一侧的迅速减小, 使得泡沫塑料块两侧所受的表面张力不再平衡, 从而使泡沫塑料块运动起来。

案例2 让我们来做一个实验: 先用铁丝弯成一个圆环, 并系上用细棉线围成的小线圈。再把这个圆环浸在肥皂水中, 然后提出液面, 环上便蒙了一层肥皂膜。这时我们发现, 圆环中的小线圈可以在肥皂膜中自由地移动 (图3-2-8a); 用一根针轻轻地将小线圈中的肥皂膜捅破, 这时可看到小线圈立

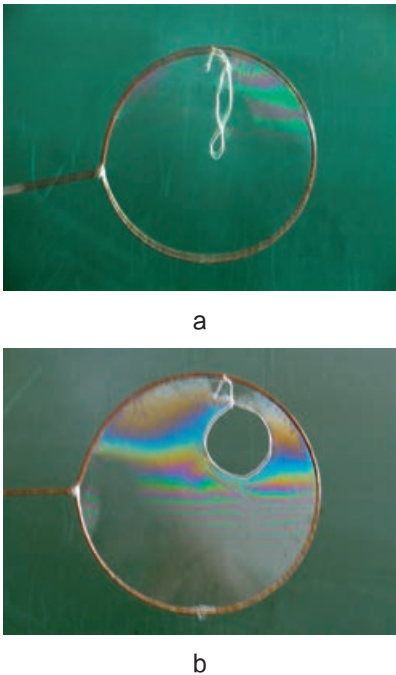


图 3-2-8 关于肥皂膜的实验

刻被拉成一个圆环（图3-2-8 b）。这是什么原因呢？

■ 分析 从肥皂膜具有表面张力这个角度出发，分为小线圈中肥皂膜被捅破前后两种情况考虑，再分析小线圈被拉成一个圆环的原因。

请同学们自己讨论，并用简洁的语言作出解释。

毛细现象

将一滴水和一滴水银分别滴在水平放置的干净玻璃板上，你观察到什么现象？

水会附着在玻璃上形成薄层，这种现象叫做浸润。水银在玻璃板上成为球形，不附着在玻璃板上，这种现象叫做不浸润。

同一种液体，对于一些固体是浸润的，对另一些固体可能是不浸润的。例如，水能浸润玻璃，但不能浸润石蜡。水银不能浸润玻璃，但能浸润锌。

如图 3-2-9 所示，把几根内径不同的细玻璃管插入水中，可以看到管里的水面比容器里的水面高。管的内径越小，管里的水面就越高。如果把这些细玻璃管插入水银中，结果正好相反，管里的水银面比容器里的水银面低。管的内径越小，管里的水银面就越低。

液体与固体接触时，形成的液体薄层（称为附着层）中，如果液体分子受到固体分子的吸引相当强（弱），则薄层中的液体分子比液体内部更密（疏），从而出现液体相互排斥（吸引）的力，致使液体有扩展（收缩）的趋势，形成浸润（不浸润）现象。如水浸润（水银不浸润）玻璃。

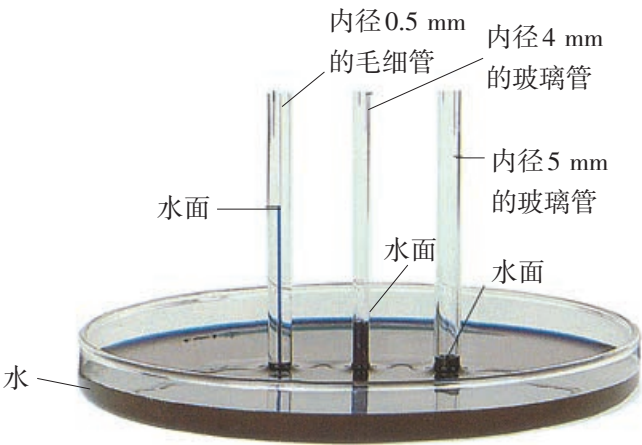
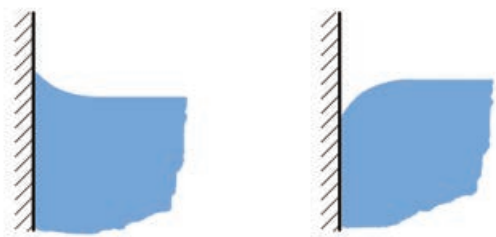


图 3-2-9 毛细现象

浸润液体在细管里上升的现象和不浸润液体在细管里下降的现象，叫做毛细现象（capillarity）。能够发生毛细现象的管子叫做毛细管（capillary tube）。

浸润液体为什么能在毛细管中上升呢？原来，浸润液体与毛细管内壁接触时，由于附着层内液体具有扩展趋势，引起液面沿管壁向上延展而呈凹形（图 3-2-10 a），而表面张力是沿着液面切向作用的，所以沿着管壁作用的表面张力形成一个向



a 浸润液体液面呈凹形 b 不浸润液体液面呈凸形

图 3-2-10 浸润和不浸润现象

上的合力，使得管内液体上升，直到表面张力的向上拉引作用和管内升高的液柱重量相等为止。同样的道理，对不浸润液体，液面呈凸形（图 3-2-10 b），毛细管壁的表面张力的合力方向向下，使管内液体下降。因此，毛细现象是由于浸润或不浸润现象和液体表面张力共同作用引起的。

在日常生产和生活中，毛细现象相当普遍。你可曾想过，当实验室的酒精灯点燃时，我们看到摇曳的火光，灯座里的酒精是如何自动流入灯芯的呢？当运动后汗流浹背，我们用纸巾擦拭额头的汗水时，汗水是如何吸入纸巾里而不留在纸面上呢？其实这些现象都可用毛细现象来说明。

信息浏览

为什么肥皂水容易起泡沫

日常生活中用肥皂（或洗衣粉）洗衣服时，稍稍搅动一下肥皂水，就会产生较多的泡沫。那么，肥皂水为什么很容易起泡沫呢？

液体起泡沫的过程比较复杂。简单地说，密度较小的液体经搅动，总会与空气混合而形成由液膜包覆的气泡。如果液体的表面张力较大，液膜便很快收缩，使泡内气体体积缩小，压强增大，把液膜胀破，气泡迅速消失。如果表面张力较小，液膜的收缩趋势也较小，可与泡内气体的压强达到平衡，气泡就能存在一段时间。

肥皂水的表面张力系数仅是水的三分之一，因此它容易起泡沫。

一般来说，当水中溶有一些溶质（如肥皂、洗衣粉）后，其表面张力系数会发生变化。根据变化的情况，可把溶质分为以下三类。

一般无机物如氯化钠、硝酸钾、盐酸、氢氧化钠等，溶于水后会使得溶液的表面张力系数随着溶液浓度的增加而缓慢增大。因此纯水较难“托”住硬币，而一些富含矿物质的矿泉水却能“托”住硬币。

乙醇、丁醇、乙酸等，溶于水后会使得溶液的表面张力系数随着溶液浓度的增加而降低，开始时降低得快些，后来则慢些。这些水溶液可以作为乳化剂、润湿剂和矿物浮选剂。

肥皂、油酸钠和各种洗涤剂，溶于水后会使得溶液的表面张力系数先随浓度增加而急剧下降，至一定浓度后几乎不再变化，再达到一定浓度后可缔合形成胶团，从而具有润湿或抗粘、乳化或破乳、起泡或消泡等一系列物理化学作用，在加溶、分散、洗涤、防腐蚀、抗静电等方面有相应的实际应用。这类物质称为表面活性剂。

家庭作业与活动

1.

下雨天我们常用布伞遮雨，抬头望去，能看见伞面纱线间的缝隙，但伞面却不漏雨。这是为什么？
2.

如图 3-2-11 所示，一根竖直滴管的出口处附着一个小液滴，许久也不掉落，它好像被一个看不见的“弹性橡皮袋”兜住了，并且，还好像有着固定的形状。这是为什么呢？
4.

如果你去外地度假，而家中有一盆心爱的花需要及时浇水，否则花会枯萎，你该怎么办？
5.

请你课后动手做一做这个实验：如图 3-2-12 所示，将靠得很近的两根木质筷子竖直插入盛水的碗中，你会发现两根筷子之间的水面会沿着筷子上升。试解释这一现象。改变两根筷子之间的距离，你又会有什么发现？



图 3-2-11

3.

表面张力的方向为什么总是跟液面上的分界线垂直？



图 3-2-12

课题研究

肥皂水与清水的表面张力比较研究

请你设计一个实验，比较肥皂水与清水的表面张力，并粗略地研究表面张力与哪些因素

有关。做一下这个实验，并写出课题研究报告，在同学间相互交流评价。

3.3 液晶与显示器

液晶的发现和应用，越来越显著地影响着人类生活。用液晶做的显示屏，使计算器、手机等许多电子产品的性能稳定、轻巧耐用。用液晶做成的平面电视屏幕和巨大的彩色动画广告屏，画面栩栩如生，使人们产生身临其境的空间效果。

请看看你的周围，还有哪些地方用到了液晶？

那么，液晶是什么？它为什么会有显示功能？它的微观结构是怎样的？液晶有哪些性质？它还有哪些应用？

液晶的微观结构

液晶，顾名思义，既像液体又像晶体。通常，人们把介于晶体和液体之间的中间态叫做液晶态，处于液晶态的物质叫做**液晶**（liquid crystal）。

分析与论证

液晶既像液体那样具有流动性，又像晶体那样具有各向异性。这是为什么呢？

这是由液晶的微观结构决定的。某物质的固态、液晶态和液态的分子排列如图 3-3-2 所示。我们看到，当该物质处于固态时，其分子排列相当整齐；当处于液态时，其分子排列较凌乱；液晶态则介于其间，其分子排列较松散（因此液晶具有流动性），但又排列得有一定取向（因此液晶具有各向异性）。

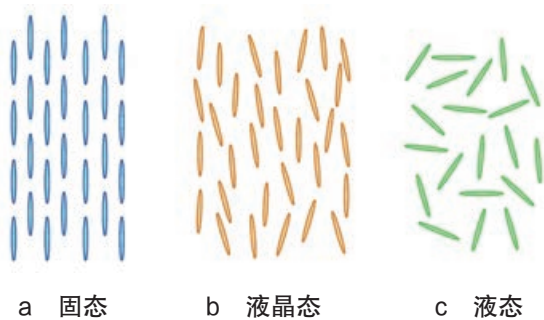


图 3-3-2 固态、液晶态以及液态的分子排列示意图

不是所有物质都具有液晶态。天然存在的液晶不多，大多数的液晶是人工合成的。现已发现几千种有机化合物具有液晶态。通常棒状分子、碟状分子和平板状分子的物质容易具有液晶态。

不同的液晶具有不同的分子排列，有丝状相（又称向列相）、



图 3-3-1 手机的液晶显示屏

螺状相(又称胆甾相)和层状相(又称近晶相)等。例如,图3-3-3所示的是向列相液晶及其分子排列,这种液晶的分子为细长棒形,沿一定方向排列。图3-3-4所示的是近晶相液晶及其分子排列,这种液晶的分子也是细长棒形,但它们往往会相互平行,且排成层状,分子只能在它所在的那一层上运动,无法移动到邻近的一层上去。

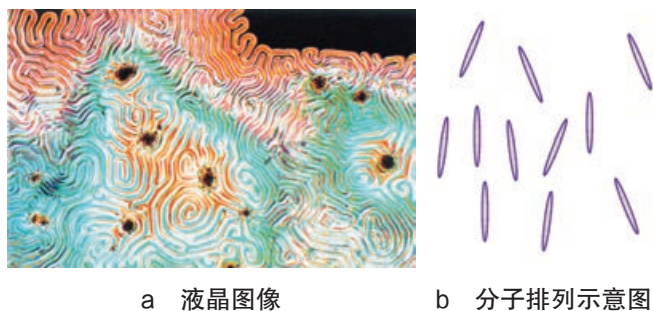


图 3-3-3 向列相液晶

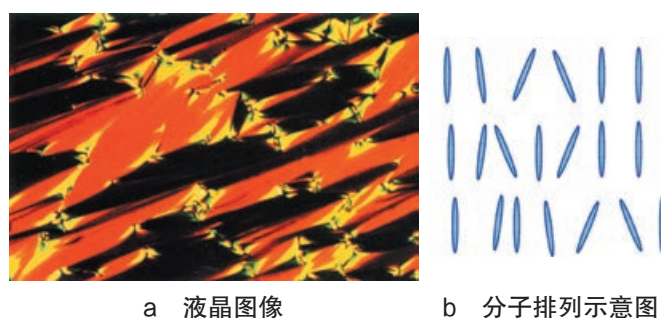


图 3-3-4 近晶相液晶

液晶的奇特效应

液晶具有两个熔点。将液晶加热,液晶先是变得混浊,然后达到第一个熔点时,会变得完全不透明,但继续加热达到第二个熔点时,又变得透明了。如胆甾醇在 145.5°C (第一个熔点)时会熔化成混浊的液体,在 178.5°C (第二个熔点)时又变成了清澈透明的液体。

液晶分子的排列是不稳定的,外界条件的微小变动都会引起液晶分子排列的变化,从而改变液晶的某些性质。例如,温度、压力、摩擦作用、电磁作用、化学作用、容器表面的差异等,都可以改变液晶的光学性质。

有的液晶具有电光效应。在一般情况下,由于分子呈有序排列,这种液晶看上去非常透明。加上电场后,其分子排列被扰乱,透射光或反射光的强度和方向都发生了变化,液晶就变得混浊了。但如果去掉电场,液晶又会呈透明状态。

有的液晶具有温度效应。在不同的温度下，这种液晶能显示出不同的颜色。当温度逐渐升高时，这种液晶就会按红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫的顺序改变颜色；当温度降低时，又按相反顺序改变颜色。如图 3-3-5 所示的温谱图，就以不同的颜色反映了人体各部分的不同温度。

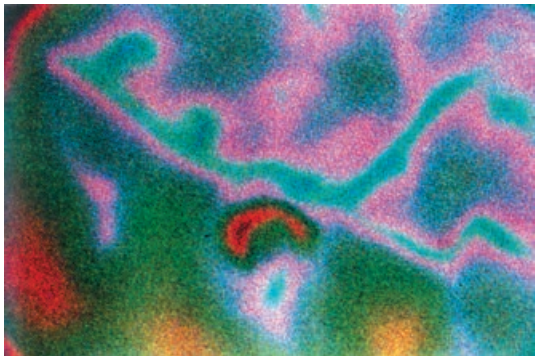


图 3-3-5 温谱图

有的液晶具有压电效应。当对这种液晶施加压力或撞击时，其两端会产生电压。

有的液晶具有化学效应。这种液晶遇到某些化合物的蒸汽时会变色，而且灵敏度极高。

有的液晶具有辐射效应。这种液晶受到放射性射线照射时会变色。

液晶的广泛应用

液晶的这些奇特效应，使其得到了广泛的应用。利用液晶的电光效应，可以制成液晶显示器。液晶显示器具有分辨率高、易彩色化、画面稳定、环保节能、体积超薄、功耗低、寿命长等优点。

下面以计算器的液晶显示屏（图 3-3-6）为例，说明液晶的显示原理。

液晶既有液体的属性，也有晶体各向异性的属性。特别是在一般情况下，偏振光经过液晶时，其偏振方向会旋转 90°。这种性质叫做液晶的旋光性。计算器的显示屏是在偏振片和反光板当中插进一个液晶盒，盒内液晶层的上下是透明的电极板。外界的自然光通过偏振片后，成了偏振光。这束光在通过液晶时，如果上下两极板间没有电压，其偏振方向会旋转 90°，下面的反光板将光线反射回来。由于偏振方向被液晶再次旋转 90°，因此又能通过偏振片，这时液晶盒看起来是透明的，但在上下两个电极间有一定大小的电压时，液晶的性质改变了，旋光性消失，于是反射光线通不过偏振片，这个电极下的区域变暗。

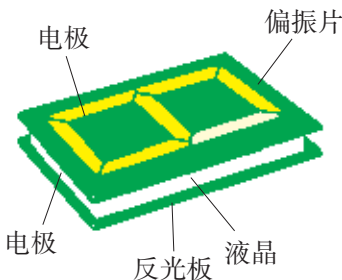


图 3-3-6 计算器液晶显示屏的构造



图 3-3-7 红外线测温仪的液晶显示屏

如果电极刻成了数字笔画的形状,用这种方法就可以显示数字。这就是液晶反射模式的工作原理。

电视机、计算机等则是利用透射模式工作的。透射模式要把反光板换成一片偏振片,要求其偏振方向与液晶另一表面上的偏振片的偏振方向垂直。这样,当光从液晶一侧入射后,利用不同条件旋光性消失与否的特点,在液晶另一侧就可以显示图形或数字符号。

彩色液晶显示器则是在某些液晶中掺入少量多色性的染料,染料分子会与液晶分子结合而定向排列,表现出光学各向异性。随着电压的变化,会对不同颜色的光表现出不同的吸收能力,从而显示出各种颜色。

利用液晶的温度效应,可以探测温度。检修电子线路时,可以利用这种效应确定电路中的短路点,方法是把液晶涂在印刷线路板上,由于短路处温度升高,液晶显示的颜色就会与其他地方不同。

在高能物理的研究中,可用具有辐射效应的液晶显示某些微观粒子的径迹,或者用来测量放射性射线的剂量。

目前,液晶已经广泛应用于电子工业、航空航天工业、生物、医学等众多领域。液晶的基础理论研究已成为凝聚态物理学的一个重要分支。随着科学技术的发展,液晶的理论和技术应用将有更广阔的前景。

信息浏览

液晶的发现

1888年,奥地利植物学家赖尼策尔(F. Reinitzer)观察到胆甾醇苯酸酯的双熔点现象。更重要的是,在这两个熔点之间,他观察到了双折射和彩虹色谱。赖尼策尔无法确定这些现象的原因,于是给德国物理学家莱曼(O. Lehmann)写了一封信请教,并送去了两种材料的样品。

莱曼通过实验,确认了赖尼策尔的结论:在 145.5°C 时材料熔化成混浊的液体,在 178.5°C 时材料变成清澈透明的液体;降温时,材料先变成蓝色,然后变混浊,继续降温则变成紫色,最后变成白色固体。莱曼论证,物质只有处在晶体状态,才可能出现双折射现象。他写信给赖尼策尔说:“这种晶体那么柔软,几乎能把它叫做液体,这对于物理学家来说,是极其有趣的。”在一份

报告中,他附了一张图,这张图非常类似于如图3-3-8所示的手征丝状相液晶。莱曼称它们为软晶体,因为它们几乎是流体,后来他又使用了流动晶体这个名词,此后又用晶态流体代替。他渐渐开始确信:这种混浊液体的流动性使它类似于液体,而其光学性质又使它类似于固体。这两种特征同时出现于一种物质,因而莱曼把这种物质称为“液晶”。不久,莱曼向一家学术刊物投寄了一篇题为《论液晶》的论文。至此,经过两位不同学科、不同国家科学家的合作研究,液晶走进了科学的殿堂,走进了人类的生活。

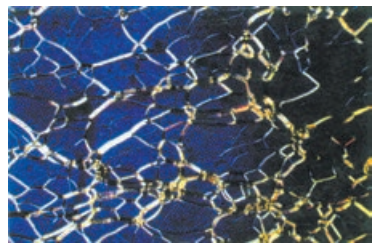


图 3-3-8 手征丝状相液晶

家庭作业与活动

1. 液晶有哪些主要的奇特效应？请归纳液晶显示器的主要优点。通过查找资料，进一步了解液晶的广泛应用。
2. 关于液晶是不是光源，甲、乙两同学各执己见。甲同学认为液晶是光源，因为液晶能够显示数字和图像；乙同学则认为液晶不是光源，液晶本身是不发光的。对此你有什么看法？
3. 下列有关液晶的说法中正确的是（ ）。
 - A. 液晶具有流动性
 - B. 液晶具有各向异性
 - C. 液晶具有稳定的空间排列规律
 - D. 液晶就是液态的晶体
4. 液晶能够显示数码和图像，其原因是（ ）。
 - A. 液晶在温度、压力、摩擦、电磁的作用下，其分子排列发生变化，改变了液晶的光学性质
 - B. 有的液晶在电压的作用下能由透明状态变浑浊，可用来显示文字和数码
 - C. 有的液晶可以随温度的变化而改变颜色
 - D. 有的液晶既可以探测温度又可以显示数码
5. 调查你家用过的和你见过的电子产品，哪些使用了液晶显示器？通过查阅资料，结合你了解的液晶相关知识，就液晶的种类及应用情况整理一份材料，在班上与同学交流。

3.4 半导体材料和纳米材料

20 世纪中叶，半导体单晶硅材料、半导体晶体管的发明及硅集成电路的研制成功，导致了电子工业革命，深刻地影响着人们的生活和生产方式。20 世纪 80 年代，人类又吹响了向纳米世界进军的号角，一个纳米技术的新时代已经到来。

半导体材料

晶体管是现代化电子设备的基本元件，而半导体则是制造晶体管的基本材料。那么，什么是半导体？它是怎样使晶体管具有人们所需要的导电性能的？

分析与论证

半导体（semiconductor）就是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，如硅、锗、氧化亚铜、砷化镓等。半导体的导电性能会随着一些物理因素的改变而改变：在极低的温度下，纯净的半导体像绝缘体一样不导电；在较高的温度下，或者有光照射时，或者掺入一定杂质后，半导体的导电性能就大大增强，甚至可以接近金属的导电性能。

用半导体制成的**晶体二极管**（crystal diode）具有单向导电性。这是为什么呢？

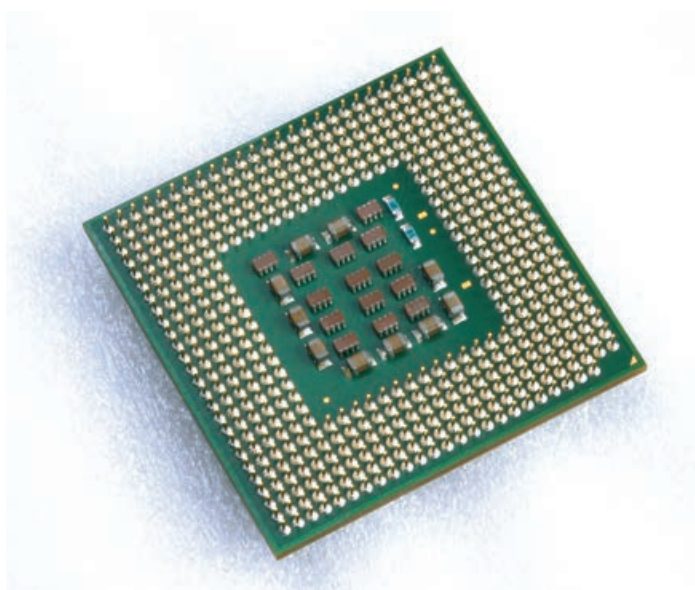


图 3-4-1 在发明半导体材料之后，如图所示的微处理器代替了庞大的电子管计算机的功能

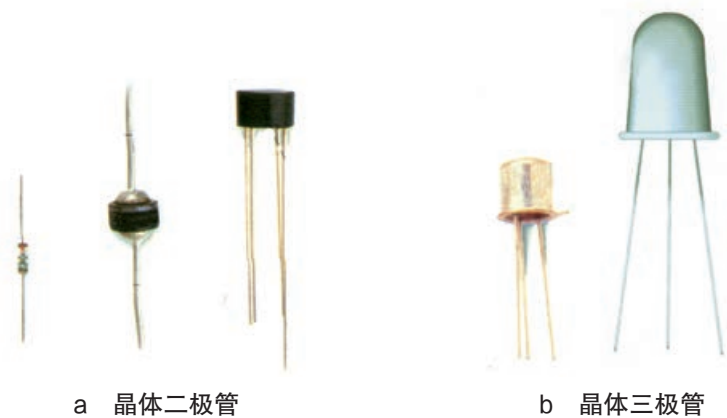


图 3-4-2 几种晶体管

半导体有两种类型：n 型半导体和 p 型半导体。我们以半导体硅为例来说明单向导电性的微观机理。

半导体材料硅是一种单晶体，在它的晶体结构中，每个硅原子通过其 4 个价电子分别与周围的 4 个硅原子形成共价键而结合在一起。如果在硅中掺入少量的磷（或砷），这些磷原子就会取代少数硅原子与周围的 4 个硅原子结合。但磷是五价元素，有 5 个价电子，这样就多出了一个电子，这个电子就成为自由电子。以自由电子参与的导电叫半导体的电子导电。经掺杂后形成电子导电的半导体叫 n 型半导体（n-type semiconductor），如图 3-4-3 所示。

如果在硅中掺入的是三价元素硼（或钢），那就会缺少一个电子，多出一个带正电的空穴。以空穴参与的导电叫半导体的空穴导电。经掺杂后形成空穴导电的半导体叫 p 型半导体（p-type semiconductor），如图 3-4-4 所示。

将 n 型半导体和 p 型半导体紧密接触，在两种半导体接触面上会形成一个特殊的薄层，叫做 pn 结。再加上引出线和管壳，就组成了一个晶体二极管。当给晶体二极管加上正向电压时，即把 p 型半导体接电源正极，n 型半导体接电源负极时，n 型半导体的电子受电场力而越过 pn 结，形成电流，二极管导通（图 3-4-5a）。当给晶体二极管加上反向电压时，电子在电场力作用下很难越过 pn 结，因而几乎没有电流产生，二极管截止（图 3-4-5b）。这就是晶体二极管具有单向导电性的微观机理。

二极管截止时，实际上还会有很小的电流，通常把它叫做漂移电流。

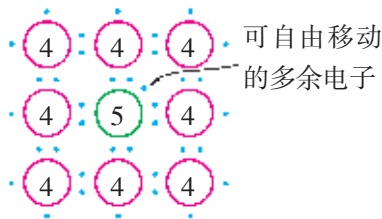


图 3-4-3 n 型半导体晶体结构图

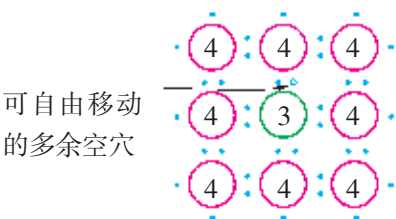


图 3-4-4 p 型半导体晶体结构图

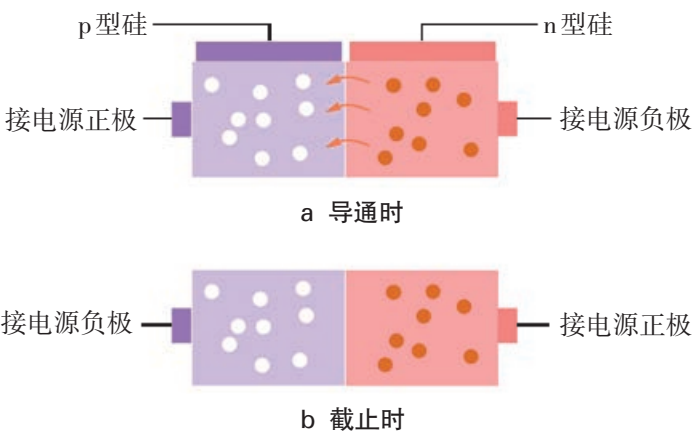


图 3-4-5 晶体二极管单向导电性的微观机理

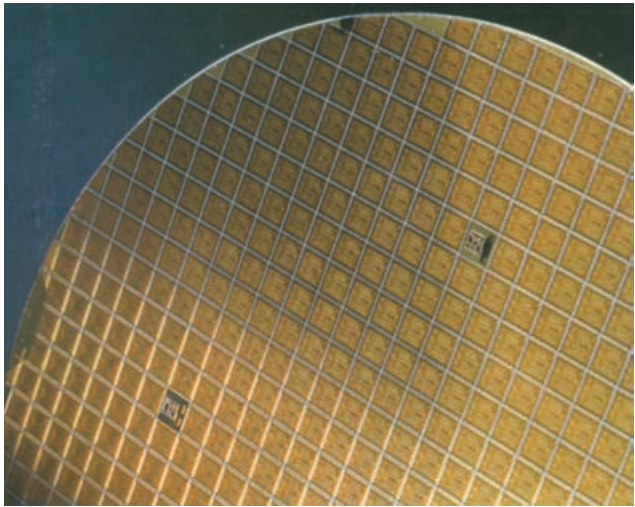


图 3-4-6 硅晶片

早期的电子产品中，电阻器、电容器、电感器、二极管、三极管等电子元件都是一个个分立地安装在印制电路板上的。用这种分立的方式做成的产品体积大，电能消耗也多，而且容易出故障。后来，人们利用氧化、刻蚀、扩散等工艺方法，把一个电子电路的所有元件按电路连接要求制作成一小块半导体硅片，这就是集成电路（integrated circuit，简称 IC），也称芯片。图 3-4-6 所示是在光源照射下观察到的硅晶片，在硅晶片上，可以分切出许多的单元芯片，在各单元芯片表面，蚀刻着极为复杂的电子电路。图 3-4-7 所示就是一块集成电路。现代的集成电路技术，已经可以把包括上亿个晶体管等电子元件的复杂电路制作在仅约 1 cm^2 的芯片上，使得电子器件越来越小，效率越来越高，使用起来越来越方便。图 3-4-8 是微处理器，这么小小的一块芯片，却是控制整台计算机的“司令部”。

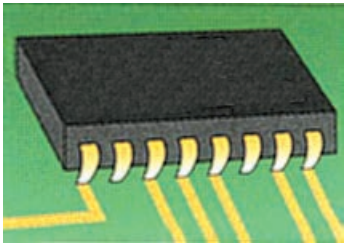


图 3-4-7 集成电路

思考与讨论

半导体技术在社会生产中的应用越来越广泛，走进我们生活的半导体电子产品也越来越多，如计算机、彩色电视机、数码相机、半导体照明（LED）、全自动洗衣机、手机、光碟机（CD、VCD 和 DVD）等，而且它们的外形越来越精巧，智能化程度也越来越高。

请你通过调查研究，说明半导体技术给我们生活和生产所带来的深刻影响。

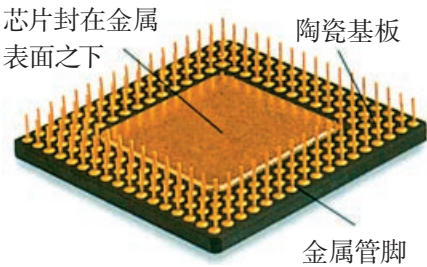


图 3-4-8 微处理器

信息浏览

半导体照明

LED (light emitting diode) 即发光二极管，是一种半导体固体发光器件。它是利用固体半导体芯片作为发光材料，在半导体中通过载流子发生复合放出过剩的能量而引起光子发射，直接发出红、黄、蓝、绿、青、橙、紫、白色的光。LED 照明产品就是利用 LED 作为光源制造出来的照明器具。

LED 与普通二极管一样，是由一个 pn 结组成的，也具有单向导电性。但与普通二极管不同，LED 中由 p 型半导体和 n 型半导体组成的晶片具有电致发光特性。当给发光二极管加上正向电压

后，从 p 区注入到 n 区的空穴和由 n 区注入到 p 区的电子，在 pn 结附近数微米内分别与 n 区的电子和 p 区的空穴复合，产生自发辐射的荧光。不同的半导体材料中电子和空穴所处的能量状态不同。当电子和空穴复合时释放出的能量越多，则发出的光的波长越短，光的波长决定光的颜色，所以发光二极管发光的颜色是由形成 pn 结的材料决定的。

在全球能源短缺的忧虑再度升高的背景下，节约能源是我们未来面临的重要问题。LED 作为一种新型的绿色光源产品，正吸引着世人的目光，未来将进入以 LED 为代表的新型照明光源时代。



图 3-4-9 半导体 LED 光源

纳米材料

纳米 (nanometer, 简写为 nm) 是一个长度单位, $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$, 1 nm 大约是一根头发丝直径的八万分之一。

纳米技术是在纳米尺度 (0.1~100 nm) 范围内研究材料的性质和应用的技术。可用原子或分子来构造具有特定功能的产品, 如纳米颗粒、纳米管线、纳米薄膜等纳米材料和纳米器件。纳米材料的制备和研究是纳米科学技术的基础。

纳米材料有纳米金属材料、纳米磁性材料、纳米陶瓷材料、有机-无机纳米复合材料、纳米传感材料、纳米医用材料等多种。

纳米材料有许多奇特效应, 如在一定条件下, 显示小尺寸效应 (由超导状态变为正常物态)、表面和界面效应 (很容易与其他原子结合)、量子尺寸效应 (由导体变为绝缘体)、宏

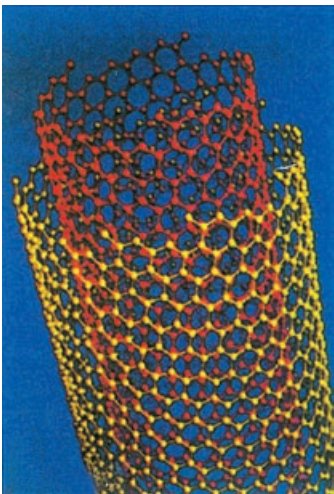


图 3-4-10 一种碳纳米管

科学巨匠爱因斯坦早就预言：“未来科学的发展无非是继续向宏观世界和微观世界进军。”

我国著名科学家钱学森曾预言：“我认为纳米左右和纳米以下的结构是下一阶段科技发展的重点，会是一次技术革命。”

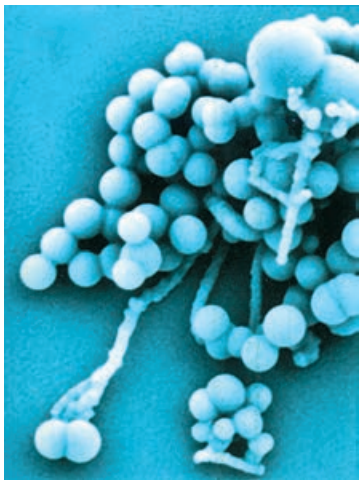


图 3-4-11 放大后的纳米材料超细微粒



图 3-4-12 “纳米医生”
将肉眼都难以觉察的纳米传感器植入人体，让它自由游弋，它就成为医生的“生物眼”，故称为“纳米医生”。

观量子隧穿效应（微观粒子的运动速度几乎与温度无关）等。

纳米材料的奇特效应使纳米材料表现出不同于传统材料的良好性能。例如，在力学性能方面，纳米材料具有高强、高硬和良好的塑性；在热学性能方面，纳米超细微粒的熔点比常规粉体低得多；在电学性能方面，纳米金属在低温时会呈现电绝缘性；在磁学性能方面，当超细微粒的尺寸小到临界尺寸时，常规的铁磁性材料会转变为处于顺磁性甚至超顺磁状态的纳米材料；在光学性能方面，纳米半导体材料在室温下具有光致发光特性、光电转换特性、介电特性和压电特性；在化学性能方面，纳米材料具有相当高的化学活性。

纳米材料在能源、环保、通信、航空航天、医疗以及日常生活等方面应用前景广阔。纳米制造技术的发展，促进了光电技术的进步。光电器件在平板显示、照明、传感、光伏器件等领域的广泛应用，促使纳米制造技术在可弯折性、可扩展性、稳定性、加工速率等方面不断突破，柔性纳米结构在透明导电膜、有机发光二极管、太阳能电池等器件中的应用有新的进展。

材料科学技术发展前景

人类社会的文明和进步总是与材料密切相关。从石器时代、铜器时代、铁器时代人们采用的天然材料和人造材料，到现在的新材料，无不对人类的生产和生活产生重大的影响。

至今，已发现的材料有 30 万种之多，并且还以每年 5% 的比例递增，主要包括金属材料、高分子合成材料、无机非金属材料、复合材料、光电子材料等。

金属材料有铝合金、镁合金、钛合金以及稀有金属等。铝合金密度小，导电性能好，可代替铜用作导电材料。镁合金既轻又强，是制造直升机某些零件的理想材料。钛合金被誉为“未来的钢铁”，可用来制造超音速飞机和宇宙飞船。稀有金属能改善合金性能，用于制造光电材料、磁性材料、化工材料及原子能反应堆零件。

课题研究

做一个关于纳米材料研究和应用的调查

随着纳米科学技术的发展，纳米新材料层出不穷，纳米制造技术方兴未艾，纳米材料应

用前景广阔。请你就关于纳米材料研究和应用及其可能存在的问题作一调查，写成调查报告，在班上相互交流评价。

高分子合成材料是 20 世纪用化学方法制造的一种新型材料，有合成橡胶、塑料和化学纤维等几类。合成橡胶耐高温、耐低温、耐油、耐腐蚀的性能好，一般用于制造火箭、导弹、飞机的某些零件。塑料的综合性能好，原料丰富，工艺简便，用作建筑材料、包装材料、医用材料，用于交通运输、电器、家具、仪表零件。化学纤维耐用廉价，稳定性高，强度大，褶皱性好，一般用作服装原料，在工业、农业、国防上有广泛用途。

无机非金属材料有工业陶瓷、光导纤维、半导体材料。新型工业陶瓷具有良好的耐高温性、抗氧化性、耐腐蚀性和抗热冲击性，它强度高，耐磨损，可制造燃气轮机、磁流体发电机的电极、高温燃料电池。光导纤维重量轻，通信容量大，传输性能好，广泛用于通信、医疗、航空航天、舰艇等工业和科学研究领域。半导体材料如砷化镓，处理信息能力比半导体硅快 10 倍，用于制作晶体管、集成电路和固态激光器。

复合材料由有机高分子、无机非金属和金属等材料复合而成，可分为结构复合材料和功能复合材料。结构复合材料可根据受力要求进行选材设计及复合结构设计，用于航空航天、电子电工、建筑、船舶、车辆、化工容器、管道、生活用品等。功能复合材料性能优于一般功能性材料，目前已研发出有压电、吸波、屏蔽、隐身、导电等功能的复合材料，广泛应用于新能源技术、信息技术、航天技术及海洋工程等方面。

光电子材料有光电子半导体材料、光纤和薄膜材料、液晶显示材料。它具有方向性、相干性、单色性和储能性等突出的优点，可用于制造高性能、小型化、集成化的光电子器件，并用于光通信、光计算、激光医疗、激光印刷、激光影视、激光受控热核反应、激光制导等。

随着科学技术的发展，各种新材料层出不穷，琳琅满目，

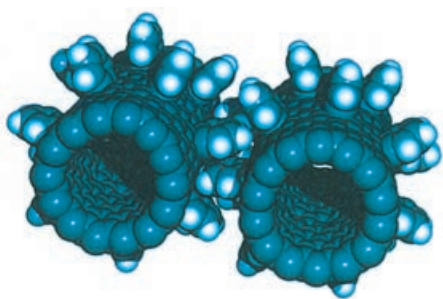


图 3-4-13 纳米齿轮

材料是人类生存和发展的物质基础，也是人类社会现代文明的重要支柱，材料的变化直接影响社会的变革。材料是技术进步的关键要素之一。

能源、信息和材料被称为现代文明的三大支柱。



图 3-4-14 用碳纤维加固的塑料（此为显微镜照片）的质量是钢的 1/4，但强度是钢的 2 倍



图 3-4-15 用弹性合金材料制成的眼镜架，被扭曲后仍会恢复原状



图 3-4-16 固定人体骨折用的形状记忆夹板，能依靠人的体温在恢复自己形状的过程中产生压缩力，迫使断骨尽早愈合

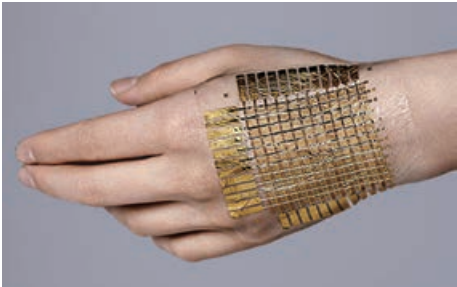


图 3-4-17 用导电纳米材料做的柔性仿生皮肤，可用于监测人体健康指标

如超导材料、先进陶瓷材料、形状记忆合金材料等。图 3-4-14 至图 3-4-17 就是一些新材料应用的例子。

请你走向社会，调查了解更多新材料的应用情况，在班上作一次交流评价。

家庭作业与活动

1. 什么是半导体？半导体有哪些特点？半导体是怎样导电的？半导体技术在生活和生产中有哪些应用？

2. 关于半导体的导电性，下列说法中正确的是（ ）。

A. 半导体的导电性不会因外界条件的变化而改变

B. 在极低的温度下，纯净的半导体不导电

C. 在有光照射时，有的半导体可以导电

D. 掺入一定杂质后，半导体的导电性能可以变好
3. 什么是纳米材料？纳米材料有哪些主要特性？纳米材料有哪些应用？

4. 关于纳米和纳米技术，下列说法中正确的是（ ）。

A. 纳米是长度单位， $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$

B. 用纳米技术只能重新排列微小的颗粒

C. 用纳米技术可以重新排列原子

D. 纳米技术是微观领域中的一种先进技术

5. 目前，市场上主要有哪些新材料？它们有哪些主要特点及应用？

第 3 章家庭作业与活动

A 组

1. 利用扫描隧穿显微镜（STM）可以得到物质表面原子排列的图像，从而可以研究物质的结构。图 3-A-1 所示的照片是一些晶体材料表面的 STM 图像，通过观察、比较，可以看到这些材料表面的原子排列有着共同的特点，这些共同的特点是：

(1) _____；

(2) _____。
2. 关于晶体和非晶体，下列说法中正确的是（ ）。

A. 可以根据各向同性或各向异性来鉴别晶体和非晶体

B. 一块均匀薄片，沿各个方向对它施加拉力，发

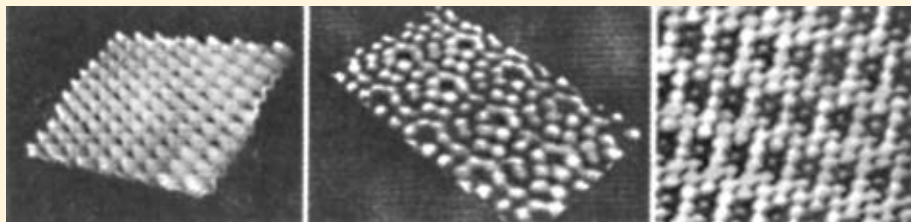


图 3-A-1

- 现其强度一样,则此薄片一定是非晶体
- C. 一个固体球,如果沿其各条直径方向的导电性不同,则该球一定是单晶体
- D. 一块晶体,若其各个方向的导热性相同,则这块晶体一定是多晶体
3. 对下列几种固体物质的认识,正确的有()。
- A. 食盐熔化过程中,温度保持不变,说明食盐是晶体
- B. 烧热的针尖接触涂有蜂蜡薄层的云母片背面,熔化的蜂蜡呈椭圆形,说明蜂蜡是晶体
- C. 天然石英表现为各向异性,是由于该物质的微粒在空间的排列不规则
- D. 石墨和金刚石的物理性质不同,是由于组成它们的物质微粒排列结构不同
4. 关于草、树叶上的露珠呈球形的原因,下列说法中正确的是()。
- A. 露珠呈球形只是因为重力的作用
- B. 露珠受到重力的影响比表面张力小得多,露珠呈球形只能是因为表面张力的作用
- C. 重力和表面张力互相平衡,露珠呈球形是因为水的黏合力
- D. 露珠呈球形是因为重力和表面张力同时作用的结果
5. 水的密度比沙的密度小,为什么沙漠中的风能刮起大量沙子,而海洋上的风却只带有少量的水沫?
6. 在地球上,较小的水银滴呈球形,较大的水银滴因所受重力的影响不能忽略而呈扁平形状。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?为什么?

B 组

1. 依图 3-B-1 所示,做下面的实验,并对结果加以解释。

- (1) 把张有皂膜的铁丝圆环置于水龙头之下,让一束细流穿膜而过,观察皂液是否仍完好无损。
- (2) 用被水浸湿的细铁丝轻轻捅穿皂膜,观察皂膜是否破碎。
- (3) 往皂膜上滴一小滴酒精(或用烧热的铁丝戳皂膜),观察皂膜是否顷刻四分五裂。

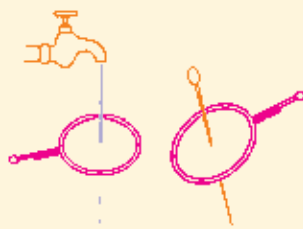
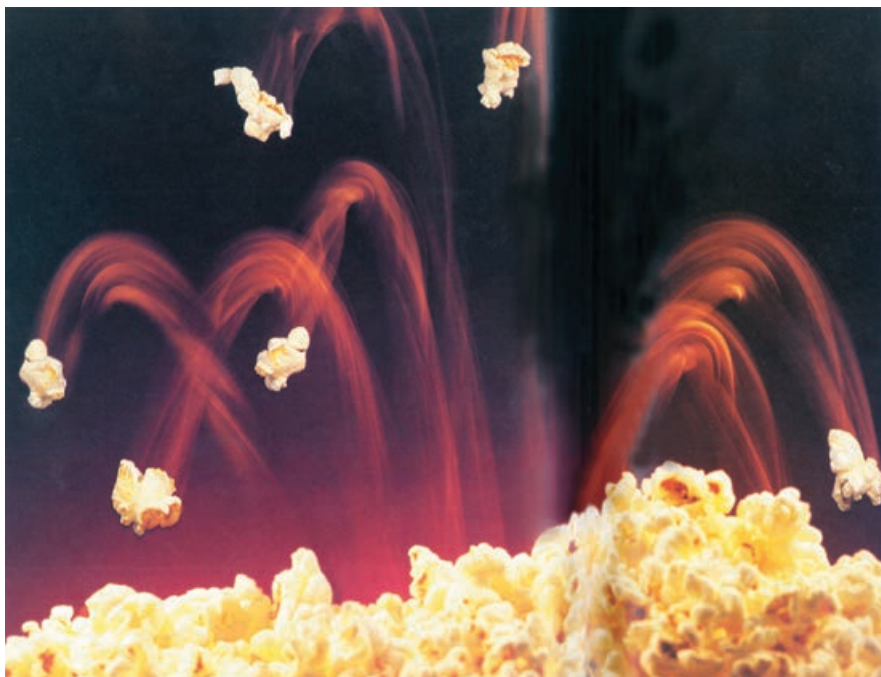


图 3-B-1

2. 据报道,科学家目前正加紧研制一种不需雨刷的挡风玻璃,雨滴落到这种挡风玻璃上仍然保持圆珠状,并自行滑走。这种产品在原理上借鉴了郁金香花瓣的特点:一些水和灰尘落到郁金香花瓣上后会逐渐滑走,而不会附着在上面。其中原因在于,郁金香花瓣表面有许多类似人体汗毛的物质,一层层地不断把水滴推走,使其无法摊开。水滴因此仍然保持圆珠形,并像在气垫上一样滑走。科学家把这种原理运用到玻璃上,在玻璃上大量移植只有几个纳米长的塑料“绒毛”,结果取得了与郁金香花瓣一样的效果。请你分析解释这种挡风玻璃不用雨刷的道理。
3. 生活中的物理现象无处不在,仔细观察日常生活,就能发现毛细现象遍布我们生活的每个角落。请你收集这方面的相关资料,谈谈毛细现象在生活和生产中的应用及危害。



第4章 热力学定律

物质世界在不断地运动变化着。自然界发生的任何运动变化过程都遵循着一条最基本、最普遍的规律——能量守恒定律。

你知道人们是怎样发现能量守恒定律的吗？

自然界的能量不会消失,那么它可以被人们反复利用吗？

能量可以相互转化,那么燃料的内能是否可以全部用来做功呢？

自然界宏观过程的方向性蕴含着怎样的物理原理？

本章将以能量为主线,研究改变内能的方式与规律——热力学第一定律,理解能量守恒定律及其应用;由自然界中宏观过程的方向性,了解热力学第二定律;回顾热力学第一定律和能量守恒定律的发现过程,体会科学探索中的挫折和失败对科学发现的意义。

4.1 热力学第一定律

我们从分子动理论出发对系统内能已作了微观定义，知道了决定系统内能大小的微观因素。根据决定系统内能大小的因素可知，一个确定的热力学系统，它的内能可以由它的温度和体积等宏观量来决定。一个热力学系统在一个确定的状态，对应着某一确定的内能。系统的状态发生了变化，其内能随之变化。

那么，怎样改变系统的内能？系统的内能变化过程遵循什么规律呢？

做功和内能的改变

在现实生活中经常可以看到，通过做功改变系统的内能。例如：用打气筒给自行车胎打气，若时间较长，气筒会明显发热；汽车在高速行驶中紧急制动时，制动片的温度升高很多，轮胎也会出现软化；内燃机在压缩冲程中，对汽缸内的气体做功，气体的温度升高；在做功冲程中，高温高压的气体膨胀推动活塞对外做功，气体的温度降低。在这些事例中，做功都引起了物体内能的变化。

假设在这些事例的做功过程中，系统跟外界之间不发生热交换，这时系统经历的过程叫做绝热过程（adiabatic process）。研究表明，系统在绝热过程中由状态1变化到状态2时内能的增量，等于外界对系统所做的功。可表示为

$$\Delta U = U_2 - U_1 = W$$

由此可见，做功是热力学系统跟外界相互作用的一种方式，功是在绝热过程中系统能量变化的量度。

实验探究 通过做功来改变物体的内能

如图 4-1-2 所示，在一个厚壁玻璃筒里放一小块硝化棉，用力迅速地压下活塞，对气体做功，使气体的内能增加，温度升高，硝化棉在瞬间燃烧，产生明亮的火焰。

除了通过机械运动对系统做功外，还可以通过什么方式对系统做功，从而改变系统的内能？请你举几个例子。

从能量转化的意义上来说，通过做功改变系统内能的物理实质是什么？

可决定系统状态的物理量叫做状态量。内能是一个状态量。



图 4-1-1 飞船返回舱返回地球通过大气层时，与空气剧烈摩擦，使其表面温度高达 2000℃

1852 年，英国物理学家焦耳和威廉·汤姆孙（William Thomson，即开尔文勋爵）在实验中发现，让充分预冷的空气迅速膨胀做功，由于内能减少，空气温度会降低，这为制冷技术开辟了一条新的道路。

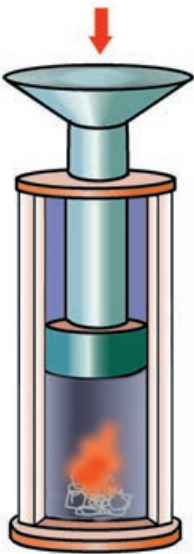


图 4-1-2 压缩气体使硝化棉燃烧

由于做功的多少跟具体过程有关，因此功是一个过程量。不能说“系统的功是多少”，而只能说“系统通过某一过程做了多少功”。

热传递也跟它所经历的过程有关，因此热量也是一个过程量，同样不能说“系统在某状态时具有多少热量”。

热传递和内能的改变

热传递有传导、对流、辐射三种方式。通过热传递改变系统的内能也十分普遍。

发生热传递时，能量的形式没有变化，仅是从一个系统转移到另一个系统，或从系统的一部分转移到另一部分。

如果一个热力学系统仅通过热传递改变了内能，外界并没有对系统做功，那么系统由状态 1 变化到状态 2 的过程中，系统内能的增量就等于它所吸收的热量，可以表示为

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q$$

根据上述表达式，请你给热量下一个定义。

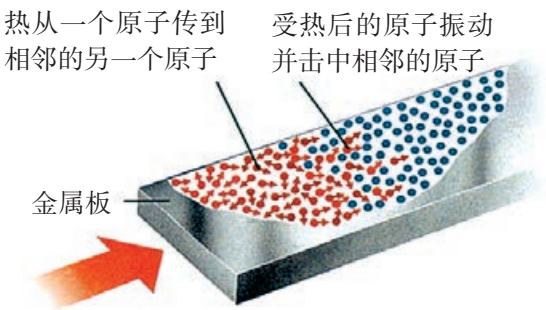


图 4-1-3 热传递的微观机制示意图

计算机、电视机等电子设备，其电路板上常装有冷却扇或散热器，它们可使电路板释放出来的热量尽快散发。

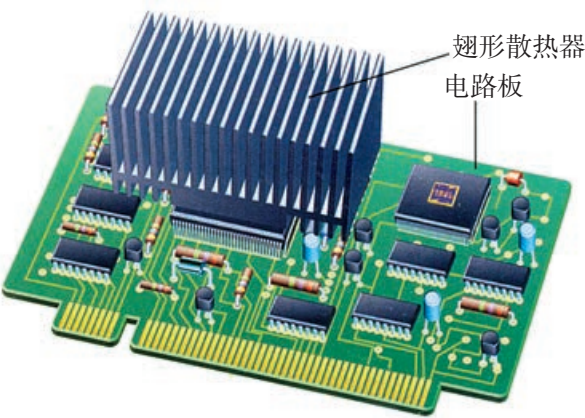


图 4-1-4 电路板上的散热器

思考与讨论

一根金属棒的温度升高了，也就是说它的内能增加了，你能判断出它是通过哪种方式增加内能的吗？为什么？

热力学第一定律

分析与论证

综合上面的研究可以知道,使热力学系统从一个状态变化到另一个状态,既可以通过做功也可以通过热传递的方式。实验表明,这两种方式的物理过程虽然不同,对于系统内能的改变却是等效的。系统内能的改变过程可用能流图(图4-1-5)形象地表示。

应该指出,“做功”和“热传递”虽有其等效的一面,但在物理本质上仍然存在着区别。“做功”(机械功)伴随着一定的宏观位移,它是系统外的有序运动的能量与系统内分子无规则运动能量之间的转化,从而改变系统的内能。“热传递”是通过分子之间的相互作用,是系统外的物质分子无规则运动的能量向系统内物质分子无规则运动能量之间完成的一种转移,从而改变系统的内能。

一般情况下,当系统发生状态变化时,做功和热传递往往同时存在。如果有一个系统,外界对系统做功 W ,同时向系统传递热量 Q ,则该系统内能的增加应为两者之和。

1853年,开尔文在焦耳等人研究的基础上,对上述关系给出了精确的表述,并用公式表示为

$$\Delta U = U_2 - U_1 = W + Q$$

一个热力学系统的内能增量等于外界对它所做的功与外界向它传递的热量之和。这就是热力学第一定律(first law of thermodynamics)。

上式中的各个量都可以有正负,其意义如下:

系统的内能增加, $\Delta U > 0$; 系统的内能减少, $\Delta U < 0$ 。

系统吸热, $Q > 0$; 系统放热, $Q < 0$ 。

外界对系统做功, $W > 0$; 系统对外界做功, $W < 0$ 。

热力学第一定律指出了内能、热量、功三者之间的定量关系,它适用于自然界中在平衡态间发生的任何过程,且不论此过程所经历的各种状态是否为平衡态。热力学第一定律实质上就是能量守恒定律在一切涉及热现象的宏观过程中的具体表现。它仅考虑做功和热传递这两种方式对系统内能变化的作用,并不考虑对系统整体的动能和势能的影响。

应用热力学第一定律时,必须明确初态、终态和中间所经历的过程,通过画出能流图,从能量守恒定律的物理实质上把

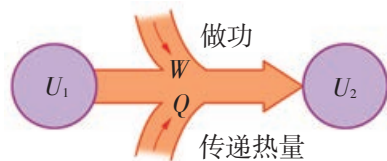


图4-1-5 能流图

如果把系统的内能变化看成是所有形式的能量(机械的、热的、电磁的、化学的、原子核的、场的能量)的变化,所做的功包含各种形式的功,那么热力学第一定律就推广为能量守恒定律。

握各物理量之间的关系。

案例分析

案例1 阳光烤暖了大地，地面辐射又对地面附近的空气加热，形成暖气团升往高空。于是有人认为高山顶上的气温要比地面的高，但实际情况正好相反。你怎么解释这个现象？

解答 产生这个现象有多种因素，如果仅从上升的气团来说，这种大气现象可以用热力学第一定律来解释。

把地面附近温度、压强相同的一大团空气作为研究对象，这团空气最初在地面附近受热膨胀，密度变小，因而逐渐上升。在上升的过程中，其边缘部分和外界空气的热交换对整个气团没有明显的影响，可以认为气团与外界之间传递的热量 $Q = 0$ ，因此气团内能的变化仅与做功有关，即 $\Delta U = W$ 。

气团上升时，不断膨胀，挤推周围的空气，对外做功($W < 0$)，内能减少 ($\Delta U < 0$)，温度降低，所以越高的地方，空气的温度越低。

根据气象学家的考察与科学分析，对于干燥的空气，大约每升高 1 km，温度降低 6 °C 左右。

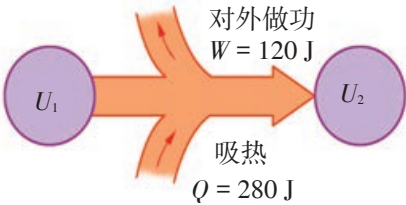


图 4-1-6 从状态 1 到状态 2 的能流图

案例2 一定量的气体，从一个状态变化到另一个状态的过程中，吸收热量 280 J，并对外做功 120 J，试问：

- (1) 这些气体的内能发生了怎样的变化？
- (2) 如果这些气体又返回原来的状态，并放出热量 240 J，那么在返回的过程中是气体对外界做功，还是外界对气体做功？做功多少？

分析 这些气体在发生状态变化前后的两个状态用 1、2 表示，对应的内能分别用 U_1 和 U_2 表示。

(1) 当气体从状态 1 变化到状态 2 时，能流图如图 4-1-6 所示。

(2) 由于气体的内能仅与状态有关，因此它从状态 1 变化到状态 2 时的内能变化，与从状态 2 返回状态 1 时内能变化的大小相等，其能流图如图 4-1-7 所示。

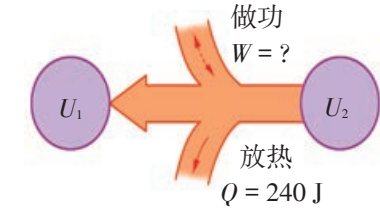


图 4-1-7 从状态 2 返回状态 1 的能流图

根据能量守恒定律，结合能流图，可以不必拘泥于热力学第一定律的公式以及有关正负号的规定。请自己完成解答。

信息浏览

“第一类永动机” 梦想的破灭

在历史上，有人曾梦想制造出一种不需要任何燃料和动力，一旦启动后就能不停地运转并对外做功的机器，这种机器叫做“第一类永动机”。

图 4-1-8 所示的是 17 世纪英国人马尔基斯设计的“永动机”。这是一个转轮，直径达 4.3 m，用了 40 个质量为 43 kg 的重球，它们可沿转轮的辐条运动。马尔基斯设想，当一个辐条间隔在这一侧要转动到下方时，这个间隔中的重球就会向转轮边缘滚动；而当一个间隔在另一侧要转动到上方时，间隔中的重球就会向转轮的轴心滚动。这样，只要给转轮一个初始的转动速度，这个转轮就会永远地转动下去。当然，这种“永动机”

是不会成功的。

“第一类永动机”的不能成功，最根本的原因是它不符合热力学第一定律，因此热力学第一定律也可表达为：“第一类永动机是不可能制成的。”

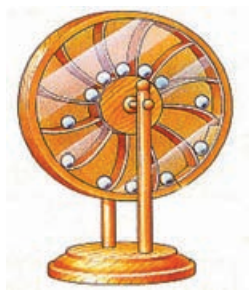


图 4-1-8 马尔基斯的永动机

家庭作业与活动

- 给你一小段细铁丝、一盒火柴和一小块粗糙的布片，请你用两种不同的方式使铁丝的温度升高。体验它们的效果，说出其中的道理。
- 一个系统不从外界吸收热量，也不减少内能，它能否对外做功？为什么？
- 如何理解热量的概念？如果用 Q 表示系统吸收的热量，用 W 表示系统对外界所做的功，把热力学第一定律表示为 $Q = \Delta U + W$ 。你认为应该怎样理解它的物理意义？
- 一定量的气体，从外界吸收 $4.7 \times 10^5 \text{ J}$ 的热量，内能增加了 $2.5 \times 10^5 \text{ J}$ 。那么，是气体对外界做功，还是外界对气体做功？做了多少功？
- 空气压缩机在一次压缩中，活塞对空气做了 $2 \times 10^5 \text{ J}$ 的功，同时空气的内能增加了 $1.5 \times 10^5 \text{ J}$ 。那么，是空气从外界吸收了热量，还是向外界放出了热量？吸收或放出的热量是多少？

4.2 能量守恒定律

漫长的发现之路

探索世界万千变化的共同规律，是哲学家、科学家感兴趣的课题。

从公元1 ~ 2世纪的古希腊至18世纪，人们对力、热、电、光等各种物理现象进行了分门别类的研究，但没有注意到它们之间的相互联系。到18世纪末19世纪初，一系列自然科学的重大发现，日益揭示出各自然现象之间的普遍联系。

1798年，英籍物理学家伦福德〔原名本杰明·汤普森（Benjamin Thompson）〕做了用钻头在炮筒内钻孔并使水发热的实验。1799年，英国化学家戴维（H. Davy）利用钟摆装置使放在真空中的金属轮子和盘子发生摩擦，在0℃的条件下，将蜡熔化。伦福德和戴维所做的摩擦生热实验表明了机械运动向热的转化。同时，热机的发明和改进又表明热能可以转化为机械能。

进入19世纪以后，相继出现了一系列关于不同运动形式之间联系与转化的新发现。

1800年，意大利科学家伏打（A. Volta）发明“伏打电堆”，实现了化学运动与电运动之间的转化。

1820年，丹麦物理学家奥斯特（H. Oersted）发现了电流的磁效应，揭示了电与磁的联系。1821年，法拉第（M. Faraday）制成了“电磁旋转器”，实现了电运动和机械运动之间的转化。

1821年，德国物理学家塞贝克（T. Seebeck）首先发现了“温差电”现象。13年后，法国物理学家珀耳帖（J. Peltier）发现了它的逆效应——当有电流通过两种金属的结点处时，会发生温度变化。

1831年法拉第发现了电磁感应现象。1834年法拉第得出了电解定律。1840年和1842年，焦耳和楞次先后发现了电流的热效应。

此外，进入19世纪后，紫外线化学作用的发现（1801年）、用光照射稀酸液中的金属板能够改变电池电动势现象的发现（1839年），等等，都从不同侧面反映了各种自然现象之间的联系与转化。

1807年科学家提出了“能量”的概念；1820年起，“功”

温差电现象，就是在两种不同金属的一个接点处加热，就会产生电动势；如果电路是闭合的，就会有电流通过。

的概念首先在工程技术论著中被确定；1829年，提出了机械过程中的能量守恒原理（后来演变为动能定理）……

到19世纪40年代前后，科学界普遍认为应该以一种相互联系与转化的观点去认识自然。能量守恒定律，已犹如一轮红日，喷薄欲出。

共同的发现

在发现能量守恒定律的历程中，众多科学家尤其是迈尔、焦耳、亥姆霍兹做了卓有成效的工作。

德国青年医生迈尔，从生理学开始对能量进行研究。1840年，他观察到生活在热带的人普遍比生活在温带的人静脉血颜色更红，由此想到了食物中含有的化学能，可以像机械能一样转化为热。在热带高温的情况下，人的肌体只需要吸收较少食物中的热量，所以肌体中食物的氧化过程减弱了，静脉血中留有较多的氧，因而静脉血颜色更红。1842年，迈尔发表论文《论无机界的力》（他当时所说的“力”就是“能量”的意思），成为第一个提出能量转化和守恒定律的人。迈尔第一个得出了热的机械当量，即物体从365 m高处下落，相当于把同等重量的水从0℃加热到1℃。1845年，迈尔出版《论有机运动和新陈代谢》一书，分析了25种不同形式能量之间的转化现象，指出“力”的转化与守恒是支配宇宙的普遍规律。

英国物理学家焦耳以研究机械运动和热运动的联系为突破口，从19世纪40年代起，历经40年，设计了各种不同的方案，先后做了400多次实验，呕心沥血，矢志不渝，测定了热功当量，奠定了各种形式能量之间互相转化和守恒的实验基础。

作为一个伟大的定律，最终还必须给出数学论证。德国物理学家亥姆霍兹第一次给出了能量守恒定律的数学表达式，进而证明自然界的各种过程都遵从这个基本定律。亥姆霍兹的工作被认为是对能量守恒定律的第一个最严谨、最全面的论证。

能量守恒定律

大量事实证明：能量既不能凭空产生，也不能凭空消失，它只能从一种形式转化为其他形式，或者从一个系统（物体）转移到其他系统（物体），在转化和转移的过程中其总量不变。这就是能量守恒定律（law of conservation of energy）。能量守恒定律是自然界的一条普适的客观规律。

“能量”的概念最早是由英国物理学家托马斯·杨（Thomas Young）于1807年提出的，直到1853年才被开尔文所采用。

美国科学哲学家托马斯·库恩（Thomas Kuhn）指出：“能量守恒正是科学家们在19世纪前40年间在实验室里先后发现的各种能量转化过程的理论概括。”所有物理结论都必须接受实践的检验。



迈尔（J. Mayer, 1814—1878），德国物理学家。能量守恒定律的发现者之一。



焦耳（J. Joule，1818—1889），英国物理学家。测定了热功当量，为建立能量守恒定律作出了贡献。



亥姆霍兹（H. von Helmholtz，1821—1894），德国物理学家、生理学家。1847年发表关于能量守恒定律的重要论著《论力的守恒》，他对眼睛的光学结构等也有研究。

恩格斯把能量守恒定律、细胞学说、达尔文的生物进化论，称为19世纪中叶自然科学的“三个伟大发现”。

案例分析

案例1 根据考察，科学家比较一致地认为6 500万年前地球上发生的那次生物大灭绝（包括恐龙在内的占地球一半左右的生物在一瞬间消失了）是由一颗直径大约10 km、质量为 1×10^{12} t 的小行星以20~30 km/s的速度砸到地球上而导致的。这次碰撞所释放的能量相当于 6×10^{13} t 的TNT炸药爆炸所放出的能量。

现假设有一颗直径1 km的小行星撞上了地球，请估算所释放的能量，并讨论会给地球所造成的危害。

不妨认定这颗小行星的密度与6 500万年前与地球相撞的那颗小行星的密度一样，运动速度也一样。根据体积与质量的关系，就可利用案例中的信息加以估算。

分析 质量巨大的小行星一般以几十千米每秒的巨大速度运动，具有极大的动能。它在穿越地球大气层的过程中，由于与空气摩擦，相当一部分动能转化为小行星以及周围空气的内能。炽热的小行星燃烧、爆炸，分裂成许多碎片，继续以巨大的速度向地球飞来。小行星在燃烧中把各种矿物的化学能转化为各种形式的能量，向地球释放出大量的热量、冲击波、电磁波及其他各种射线。小行星撞击地球所释放的能量，不仅来自它的动能，更主要的是来自它所蕴含的化学能。

解答 由球体积公式 $V = \frac{4}{3} \pi R^3$ 知，球的直径缩小为原来



图 4-2-1 小行星撞击地球示意图

的 $\frac{1}{10}$ 时，其体积减为原来的 $\frac{1}{1000}$ 。当小行星的密度和撞击速度不变时，其质量和动能都减为原来的 $\frac{1}{1000}$ ，则它与地球撞击所释放的总能量相当于 $6 \times 10^{10} \text{ t}$ 的 TNT 炸药爆炸所放出的能量。这相当于 6 万个八级大地震所释放的能量，其破坏力会给地球及居住在地球上的人类和各种生物带来毁灭性的打击。

案例2 某班课题研究小组的同学为了测定夏季中午单位面积上、单位时间内获得的太阳能，制作了一个太阳能集热装置。实验器材有：（a）内壁涂黑的泡沫塑料箱一个，底面积为 1 m^2 ；（b）盛水塑料袋一个；（c）温度计一支；（d）玻璃板一块（约 1 m^2 ）。如图4-2-2所示。

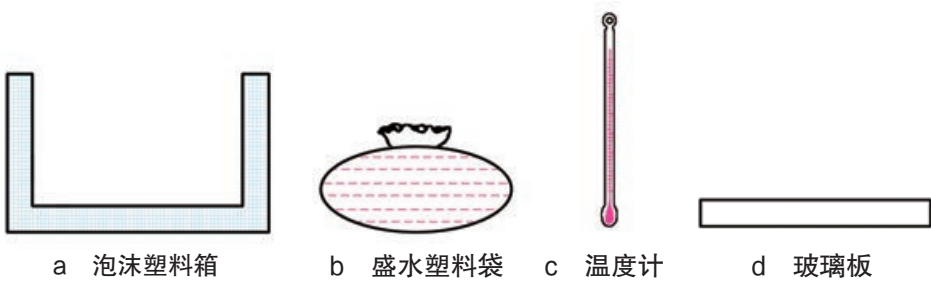


图 4-2-2 太阳能集热装置实验器材

有一块斜坡草地，太阳光垂直照射到草地表面，请将上述实验器材按实验设计要求画在图 4-2-3 中。

已知水的比热容 c ，被水吸收的热量 Q 与水的质量 m 、水温升高量 Δt 间的关系是 $Q = cm \Delta t$ ，则为了测定中午单位面积上、单位时间内获得的太阳能，除了需要测量 m 、 Δt 外，还应测量什么物理量？本实验会有一定误差，试写出产生误差的主要原因。

分析 这是一个研究太阳能转化为内能的问题。本案例要求测定单位面积上、单位时间内获得的太阳能（ E ），实际上就是测定太阳的辐射功率（ P ）。根据 $P = \frac{W}{t} = \frac{E}{t}$ 知，还需测量太阳照射的时间，即水温升高 Δt 所用的时间 t 。

由于太阳照射过程中，受大气层等外界的影响和采热装置散热的缘故，照射到玻璃板上的太阳能没有全部被水吸收，造成一定误差。

解答 装置图如图 4-2-4 所示。

还应该测量的物理量是水温升高 Δt 所用的时间 t 。

产生误差的主要原因是照射到玻璃板上的太阳能没有全部被水吸收。

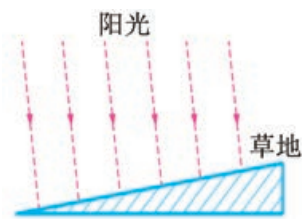


图 4-2-3

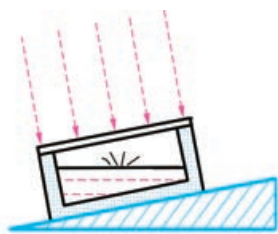


图 4-2-4

家庭作业与活动

- 1. 考察你的家庭与学校，说出你在生活和学习中必须用到哪些形式的能量，它们是通过何种设备由什么形式的能量转化来的。
- 2. 称出自己的质量，量出两层楼梯的垂直高度，手拿计时器，以正常速度匀速地向上跑完这两层楼梯，记下所用的时间。
 - (1) 求出你在跑楼梯时体内输出的有用能量，这中间发生了什么样的能量转化？
 - (2) 求出以瓦为单位的输出功率。如果这些

能量转化为电能，可同时点亮几盏 100 W 的灯泡？

- 3. 如何从能量守恒定律的角度去认识闭合电路欧姆定律和法拉第电磁感应定律？
- 4. 观察手电筒的结构，画出它工作时的能流图。
- 5. 图 4-2-5 是一个现代的燃煤蒸汽发电厂的运行流程图，请从能量的角度分析各生产部门（燃烧室、锅炉、涡轮机、发电机、冷凝器）之间能量转化或转移的情况。

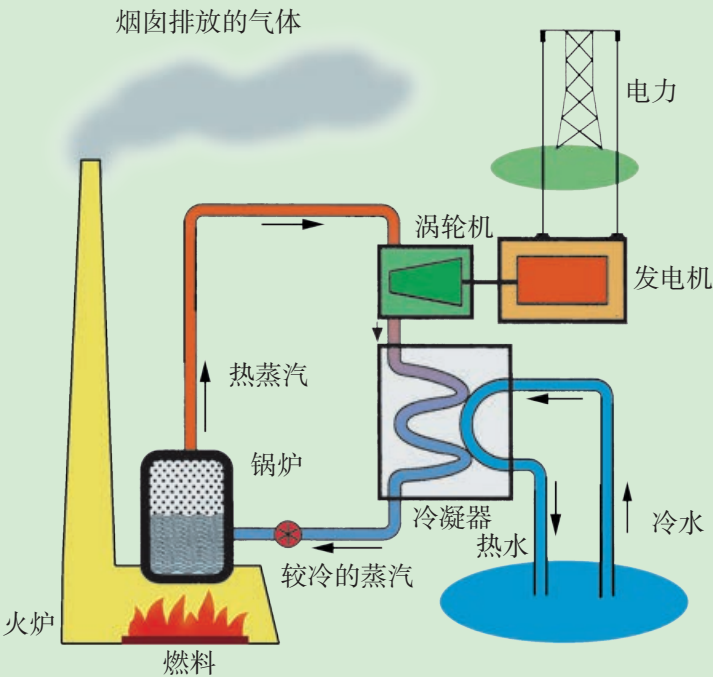


图 4-2-5 燃煤蒸汽发电厂运行流程示意图

4.3 热力学第二定律

前面学习的热力学第一定律，揭示了物体系统在内能变化过程中的规律，其间内能的转移或与其他形式能量的转化，遵循能量守恒定律。因此，热力学第一定律实质上反映了能量在转化和转移过程中的守恒性，是能量守恒定律在热力学现象中的具体反映。

你有否想过：虽然能量的总量保持不变，但能量可以被人们不断地反复利用吗？符合能量守恒定律的过程是否都会发生？如何判断过程演化的方向？热力学第一定律和能量守恒定律对这些都没有回答。自然界中一定还隐藏着另外的奥秘！

自然界宏观过程的方向性

生活经验告诉我们，河水只能从高处流向低处，“奔流到海不复回”，不会自动地从低处流向高处。水流具有方向性。

“时间老人”总是匆匆前行，时光不会倒流。时间的流逝具有方向性。

热量能够自发地从高温物体传到低温物体，却不能自发地从低温物体传到高温物体。热传递（内能的转移）具有方向性。

寒冷的冬天，人们围着篝火取暖，木柴的生物能转化为内能。用于篝火的木柴燃烧后，不可能将已散发的热量重新积聚成木柴。能量的转化具有方向性。

“自发”是指高温物体向低温物体传递热量时，没有任何第三者的介入，没有对任何第三者产生任何影响。



图 4-3-1 奔腾的黄河(壶口瀑布)



图 4-3-2 用于篝火的木柴燃烧后,不可能将已散发的热量重新积聚成木柴

在自然界中,一切自发的宏观过程都是有方向性的,是不可逆的。

过程的方向性具有普遍的意义,请再列举一些事例,并与同学相互交流。

1850年,德国物理学家克劳修斯根据热传递的方向性,总结出—条规律:不可能使热量从低温物体传到高温物体,而不引起其他变化。这就是热力学第二定律(second law of thermodynamics)的一种表述,称为克劳修斯表述。

有人说,用电冰箱冷藏食品,用空调机制冷,电冰箱和空调机能够源源不断地把热量从温度较低的地方传递到温度较高的地方,似乎并不遵循热力学第二定律。你的看法怎样?



克劳修斯 (R. Clausius, 1822—1888), 德国物理学家,近代分子动理论的创始人之一。他提出了统计概念,并推导出气体压强公式。1865年提出“熵”的概念,以定量形式表示出热力学第二定律,该定律的影响和作用遍布很多方面。

理想热机的启示

面对能源危机,有人提出了一个十分诱人的设想:地球上的海水储量丰富,总质量约 $1.4 \times 10^{18} \text{ t}$,如果能够设计制造出一种机器,它从海水里吸热做功,则由计算可知,只要使海水的温度降低 0.01 K ,它所做的功就达 $5.8 \times 10^{22} \text{ J}$,这些功可让全世界所有的工厂运转 1 000 多年!这个设想完全符合能量守恒定律,但至今没有研制出这种机器。这是怎么回事呢?

让我们先回顾初中学过的四冲程内燃机的工作过程。内燃机的工作物质是空气与燃料的混合气。工作物质推动活塞做功后,过程中产生的废气必须排出后才能进行下一个循环,也就

是说,一个循环完成后,一定会放掉一些热量。

1824年,法国物理学家卡诺分析了各种热机的工作过程后,运用理想模型的研究方法,对具体的热机进行简化抽象,建构了一部理想热机(图4-3-3),它概括了各种热机的工作原理。

从理想热机的工作原理可以得到重要的启示:任何一种热机必须联系着两个热源,分别称为高温热源和低温热源(冷凝器),工作物质从高温热源吸收热量后,除了对外做功,还必须向低温热源放热,不可能实现只有单一热源的热机。也就是说,从高温热源吸收的热量不可能全部用来对外做功。

设工作物质在一个循环内从高温热源吸收热量 Q_1 , 对外做功 W , 向低温热源放出热量 Q_2 , 则

$$Q_1 = W + Q_2 \quad \text{或} \quad W = Q_1 - Q_2$$

所以理想热机的效率为

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < 1$$

1851年,开尔文从热机的工作特点出发,总结出热力学第二定律的另一种表述:不可能从单一热源吸收热量并把它全部用来做功,而不引起其他变化。这种表述称为开尔文表述。

当能量守恒定律对“第一类永动机”作出“不可能制成”的判定后,历史上曾有许多人精心构思,想设计出一种从单一热源吸热,并把所吸热量除用于克服摩擦做功外全部用来对外做功的机器,即一种效率达到100%的热机。这种机器被称为“第二类永动机”。“第二类永动机”并不违背能量守恒定律,但根据热力学第二定律的开尔文表述,同样可以做出判定:“第二类永动机”是不可能制成的。这是热力学第二定律的另一种表述。

从上面的分析不难看出,在自然界的一切自发过程中,能量的转化或转移都是有方向性的,但都不违反能量守恒定律。热力学第二定律的实质就是揭示了自然界的一切自发过程都具有方向性。

案例分析

案例 炎炎夏日,两位同学在凉爽的空调室内,就空调机的工作过程是否遵循热力学第二定律的问题发生了争论。

一位同学说:空调机工作时,不断地把热量从室内传到室外,即从低温物体传到高温物体,可见它并不遵循热力学第二定律。

另一位同学说:热力学第二定律是热力学系统的普遍规

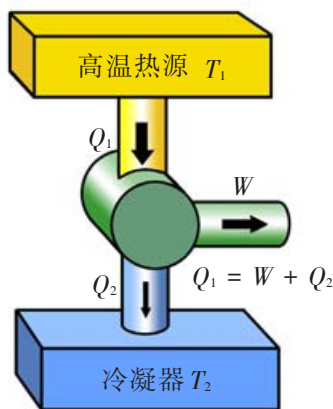


图4-3-3 理想热机的工作原理

研究指出,理想热机的效率完全由两个热源的温度决定,即

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$



卡诺 (S. Carnot, 1796—1832), 法国物理学家、工程师。1824年提出了关于热机的卡诺循环和卡诺定理。

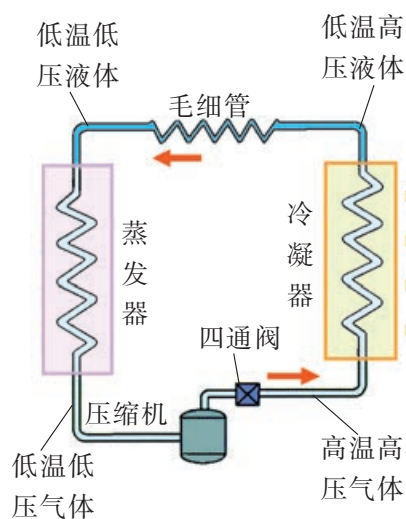


图 4-3-4 电冰箱的制冷循环回路

在热力学中，对所研究的热力学系统能够发生相互作用的其他物体，都称为外界或环境。跟外界没有任何相互作用的热力学系统，叫做孤立系统。

在物理学上，熵（entropy）描述一个系统的无序程度。系统的熵高，表示无序程度大，显得“混乱”和“分散”；系统的熵低，表示无序程度小，显得有序、“整齐”和“集中”。

在希腊语中，熵（ $\epsilon\nu\tau\rho\omicron\pi\alpha$ ）表示“转变”的意思，克劳修斯首先把它引入物理学，定义为热量与温度之比。我国物理学家胡刚复根据其定义，新造了一字“熵”。

律，空调机的工作过程不可能违反它。

两人各执一词，都无法使对方信服。请你对他们的论点作出评价。

■ 分析 单冷空调机和电冰箱都是制冷机，它们的工作原理基本相同。为了便于分析，我们以电冰箱为研究对象，认识它的基本结构和工作过程。从图 4-3-4 可以知道，电冰箱由压缩机、冷凝器、毛细管（节流阀）、蒸发器四个部分组成。这四个部分由管道连接，组成一个密闭的连通器系统，制冷剂作为工作物质，由管道输送流经这四个部分，完成工作循环。

压缩机是电冰箱的“心脏”。压缩机消耗电能，对来自蒸发器的制冷剂蒸汽做功，使它变成高温高压的蒸汽（如 $p \approx 9.1 \text{ atm}$, $t \approx 46^\circ\text{C}$ ）。

然后，这些高温高压的蒸汽来到冷凝器，向低温的环境（空气）放热，同时自身被冷却而凝成低温高压的液体（如 $p \approx 8.9 \text{ atm}$, $t \approx 37.4^\circ\text{C}$ ）。

这些低温高压的液态制冷剂进入毛细管后，经节流阀膨胀，变为低压的液体（如 $p \approx 1.5 \text{ atm}$ ），随后进入电冰箱的蒸发器。在那里，这些低温低压的液态制冷剂在低压条件下迅速汽化，从外界（电冰箱内）吸收大量的热量，使那儿的温度降低。这样就完成了一个制冷循环。

请仔细考察图 4-3-4 中电冰箱的工作过程，分析其中的热量流向，对这两位同学的争论作出正确的评价。

系统的无序程度

一碗沙子和一碗米，本来各自处于有序状态，当两者混合在一起，乱糟糟不可收拾，我们可以说系统混合后的无序程度比混合前增加了。

两种气体扩散前后，高温物体与低温物体发生热传递前后，它们的无序程度变大了。

根据大量分子运动对系统无序程度的影响，热力学第二定律又有一种表述：由大量分子组成的一个孤立系统自发变化时，总是向着无序程度增加的方向进行，至少无序程度不会减少。

通过做功改变内能的过程是一个不可逆的过程，这个过程中无序程度增加。

大量事实证明，每一个不可逆过程，都是导致无序程度增加的根源。平时常见的热传递、扩散、煤的燃烧、铁在空气中

的氧化等一切自发的过程都是不可逆的,都会使无序程度增加。马路上的摩托车疾驶而过,喷出阵阵黑烟,严重污染了环境,同样导致了无序程度的增加。

能量守恒定律和无序程度的增加是自然界中两条普遍的规律。

案例分析

案例 热力学第二定律的开尔文表述指出:内能与机械能的转化具有方向性。请结合无序程度的变化加以解释。

解答 机械运动是宏观情况下物体在空间位置上的变化,物体运动状态的变化完全遵循牛顿运动定律所反映的因果关系,这是一种有序的运动。热运动是大量分子的无规则运动,系统的一个宏观状态包含着大量的微观状态,这是一种无序的运动。机械运动向热运动的转化,属于从有序向无序的转化,会导致无序程度的增加,符合热力学的规律,因此机械能可以全部转化为内能。反之,热运动向机械运动的转化,属于从无序向有序的转化,不符合无序程度增加的原理,因此内能向机械能的转化不能全部实现。

家庭作业与活动

1. 有人把热力学第二定律的克劳修斯表述简化为“热量不能由低温物体传到高温物体”,这种说法是否正确?为什么?
2. 下列说法中正确的是()。
 - A. 热量能够从高温物体传到低温物体
 - B. 机械能可以全部转化为内能而不引起其他变化
 - C. 不可能从单一热源吸收热量并把它全部用来做功,而不引起其他变化
 - D. 凡是不违背能量守恒定律的过程一定都能实现
3. 设一台蒸汽机中,1 kg 煤完全燃烧后,产生 2.9×10^7 J 的热量,其分配情况如下:锅炉损失 5.9

$\times 10^6$ J, 传送蒸汽损失 1.2×10^6 J, 蒸汽冷凝损失 4.0×10^6 J, 废气带走损失 1.4×10^7 J, 机械磨损损失 0.7×10^6 J。试画出其能流图。这台蒸汽机输出的机械能是多少?热机的效率是多少?

4. 横截面积为 3 dm^2 的圆筒,内装有 0.6 kg 的水,太阳光垂直照射 2 min ,水温升高了 1°C ,设大气层顶的太阳光只有 45% 到达地面,试估算太阳的全部辐射功率。太阳到地球的距离 $R = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$,保留两位有效数字,水的比热容 $c = 4.18 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

第4章 家庭作业与活动

A 组

1. 下列关于内能变化的说法中正确的是 ()。

- A. 电流通过电阻, 电阻会发热, 其内能增加是通过热传递方式实现的
- B. 一定量气体经加热, 其内能一定增加
- C. 气体膨胀, 它的内能一定减少
- D. 橡皮筋被拉长时, 内能增加

2. 关于系统的内能及其变化, 下列说法中正确的是 ()。

- A. 系统的温度改变时, 其内能必定改变
- B. 系统对外做功, 其内能不一定改变; 向系统传递热量, 其内能不一定改变
- C. 对系统做功, 系统内能必定改变; 系统向外传出一定热量, 其内能必定改变
- D. 若系统与外界不发生热交换, 则系统的内能必定不改变

3. 关于系统的内能变化, 下列说法中正确的是 ()。

- A. 系统吸收热量, 内能一定增加
- B. 系统对外做功, 内能一定减少
- C. 系统吸收热量, 同时对外做功, 内能可能不变
- D. 系统放出热量, 同时对外做功, 内能可能不变

4. 汽车关闭发动机后恰能沿斜坡匀速下滑, 在这个过程中 ()。

- A. 汽车的机械能守恒
- B. 汽车的机械能逐渐减少, 内能增加, 汽车的总能量逐渐减少
- C. 汽车的机械能逐渐减少, 内能增加, 汽车的总能量不变
- D. 汽车的机械能和总能量都不变

5. 如图 4-A-1 所示, 直立容器内有一薄层隔板, 把容器分成体积相等的两部分 A 和 B, A 中气体的密度较小, B 中气体的密度较大。若抽去隔板, 加热容器, 使 A、B 两部分气体均匀混合, 设在此过程中气体共吸热 Q , 气体内能增量为

ΔU , 不考虑散热损失, 则 ()。

- A. $\Delta U = Q$
- B. $\Delta U < Q$
- C. $\Delta U > Q$
- D. 无法比较 ΔU 与 Q 的大小关系



图 4-A-1

6. 请整理热力学第二定律的不同表述, 并说明它们分别对应着怎样的物理事实。

7. 关于热力学第二定律, 下列表述中正确的是 ()。

- A. 物体可以从单一热源吸收热量并把它全部用来做功, 而不引起其他变化
- B. 热传递是有方向性的
- C. 不可能使热量从低温物体传到高温物体
- D. 第二类永动机是可以制成的

8. 在一间隔热很好的房间中, 把正在工作的电冰箱门打开, 室内空气温度将____ (选填“升高”“不变”或“降低”), 其原因是_____。

9. 如图 4-A-2 所示, 将一滴红墨水滴入一杯清水中, 红墨水会逐渐扩散到整杯水中。试说明这个过程中无序程度的变化。



图 4-A-2 红墨水的扩散

10. 一只铁球从高处落下, 撞到地面上, 最后处于

静止状态。试分析这个过程中无序程度的变化。

B 组

1. 三峡工程的主要数据如下表所示。

大坝	坝高/m	185
	坝长/m	2335
	最高蓄水位/m	175
水库	总库容/m ³	3.930 × 10 ¹⁰
	防洪库容量/m ³	2.215 × 10 ¹⁰
	平均年流量/m ³	4.510 × 10 ¹¹
电站	总装机数/台	26
	总装机容量/kW	1.820 × 10 ⁷
	平均年发电量/(kW·h)	8.468 × 10 ¹⁰

请根据表中有关数据完成下列问题。

- (1) 年平均消耗水能 $E =$ _____ J, 转化为电能的百分比 $\eta =$ _____。
- (2) 若 26 台发电机组全部建成并同时发电, 则按设计要求年发电时间为_____d。

2. 热力学第二定律常见的表述有两种:

第一种表述: 不可能使热量由低温物体传递到高温物体, 而不引起其他变化;
第二种表述: 不可能从单一热源吸收热量并把它全部用来做功, 而不引起其他变化。
图4-B-1a是根据热力学第二定律的第一种表述

画出的示意图: 外界对制冷机做功, 使热量从低温物体传递到高温物体。请你根据第二种表述完成示意图 4-B-1 b。根据你的理解, 热力学第二定律的实质是_____。

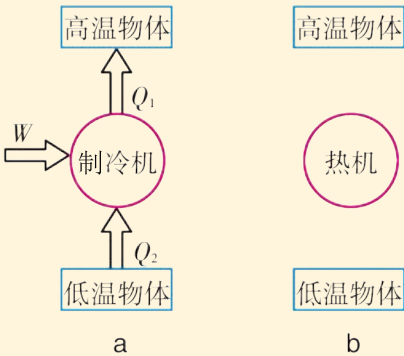


图 4-B-1

3. 现代典型的燃煤蒸汽发电厂总效率一般为 40%。有一座大型燃煤发电厂, 如果发出 $1.0 \times 10^9 \text{ W}$ 的电力, 可供一个大城市使用。图4-B-2表示这座发电厂的能量流向。请回答:
- (1) 燃煤提供的能量应等于哪几项能量之和?
- (2) 图中烟囱废气所带走的能量没有标出, 请你算出来, 在图中补上。
- (3) 算出这座发电厂的总效率。
- (4) 根据图 4-B-2 所示的电厂能量流向, 你认为在哪些地方作些改进, 可以提高发电厂的总效率?

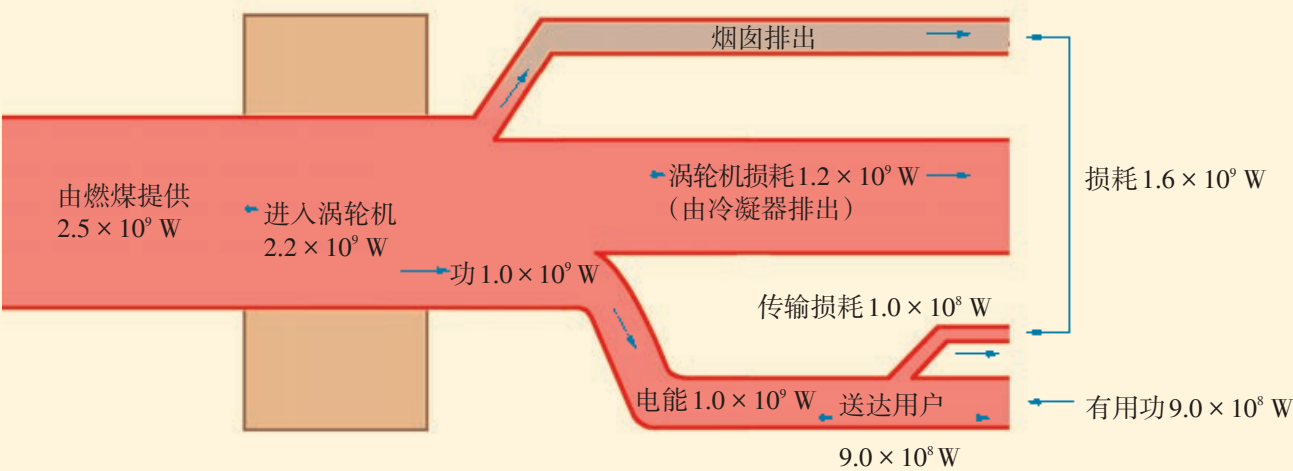


图 4-B-2



第 5 章 原子世界探秘

我们已经知道，物质是由原子组成的。那么，原子是构成物质的最小微粒吗？原子有内部结构吗？如有内部结构，则它是什么样的？这些问题促使科学家们试图敲开原子的大门。为此他们在实验观察的基础上进行了一系列对原子结构的描述、解释和预测，面对这些激动人心的探索活动，我们不禁会问：

人类是怎样发现原子内部有复杂结构的？

探索原子的结构经历了怎样的漫长过程？

绚丽多彩的光是怎样产生的？

迄今人们对原子结构的认识进入到一个什么样的层次？

.....

本章以人类探索原子结构的历史为线索，展示科学家探索原子结构的过程及有关的经典实验，让你体会人类在探究微观世界过程中的研究方法及其在现代科学发展中的价值；通过对氢原子光谱的分析，在量子论视野下了解原子的能级结构。

5.1 电子的发现

1808 年，英国化学家道尔顿（J. Dalton）根据化学实验的结果，提出了近代“原子论”，认为物体是由原子组成的，同时他又断定：原子就像一个实心球，是不能再分割的。

原子真的不能再分了吗？19 世纪末，电子的发现揭开了探索原子内部结构的序幕。

那么，电子是怎样发现的呢？电子的发现对人类探索原子结构有何重大意义呢？

阴极射线的发现

19 世纪中期，物理学家在研究稀薄气体放电现象中发现：将充有足够稀薄气体的放电管的阴极和阳极接上高压电源后，阴极正对面的玻璃壁上会出现绿色的荧光（图 5-1-1），这个绿色荧光是哪里来的？科学家研究认为，是阴极发出的一种射线打到玻璃壁上产生的。

从阴极发射出来的射线叫阴极射线，气体放电管也被称为阴极射线管。那么阴极射线究竟是什么？是光，还是粒子？它带电吗？

物理学家对阴极射线的研究，引发了 19 世纪末的三大发现：1895 年伦琴（W. Röntgen）发现了 X 射线；1896 年贝可勒尔（A. Becquerel）发现了放射性；1897 年 J. J. 汤姆孙发现了电子。

你能设计一个实验，来探究阴极射线的性质吗？



图 5-1-1 阴极射线管

实验探究

研究阴极射线的带电性质

我们已经学过用阴极射线管来研究洛伦兹力了。

如图 5-1-2 所示，给阴极射线管加上高电压，将磁铁靠近阴极射线管，你观察到什么现象？

请思考：根据观察到的现象，你认为阴极射线是中性的，还是带电的？如果是带电的，则是带了哪种电？

汤姆孙发现电子

阴极射线的发现引起了英国物理学家 J. J. 汤姆孙的极大关注，他认为阴极射线是一种动能很大的带电粒子流。

为了研究阴极射线的带电性质，他设计了如图 5-1-3 所示的装置。从阴极发出的阴极射线，经过阳极上的小孔，射到管

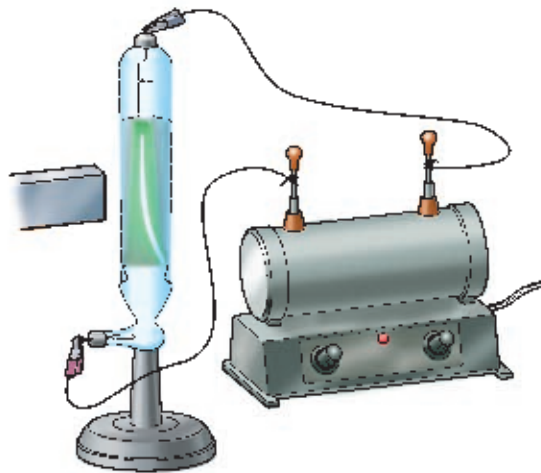


图 5-1-2 研究阴极射线的装置

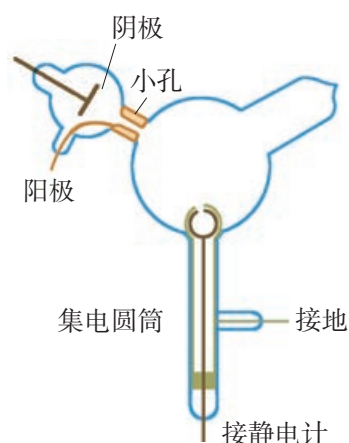


图 5-1-3 检测阴极射线带电性质的装置



J. J. 汤姆孙 (J. J. Thomson, 1856—1940), 英国物理学家。1897 年发现电子, 于 1906 年获诺贝尔物理学奖。

比荷是粒子所带电荷 q 跟粒子质量 m 的比 $\frac{q}{m}$ 。

现在测得的电子比荷为

$$\frac{e}{m_e} = 1.758\,80 \times 10^{11} \text{ C/kg}$$

电子的电荷量为

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

从而算出电子的质量

$$m_e = 9.109\,53 \times 10^{-31} \text{ kg}。$$

电子质量约为氢原子质量的

$$\frac{1}{1837}。$$

壁上, 产生荧光斑点; 用磁铁使射线偏转, 进入集电圆筒; 用静电计检测的结果表明, 收集到的是负电荷。

为了进一步弄清这种带负电粒子的性质, 必须设法测出阴极射线中一个带电粒子的质量。汤姆孙采用的是测比荷的方法, 这种方法是通过实验测出粒子的比荷 $\frac{e}{m}$ 和电荷量 e , 从而求得粒子的质量 m 。

汤姆孙用如图 5-1-4 所示的装置测定了这种粒子的比荷。

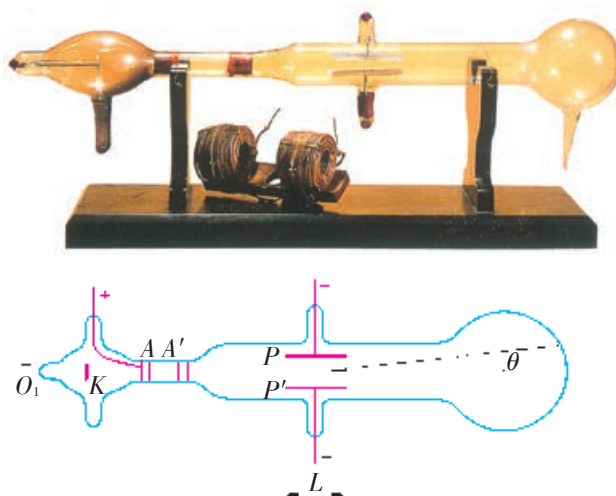


图 5-1-4 测定阴极射线粒子比荷的装置

从阴极 K 发出的阴极射线, 通过一对平行金属板 P 、 P' 间的匀强电场时发生偏转, 偏转角 θ 与电场强度 E 、极板长度 L 以及带电粒子的速度 v 的关系为

$$\tan \theta = \frac{EeL}{mv^2} \quad (1)$$

请你用学过的知识证明上式。

然后再加一垂直于电场方向的匀强磁场, 使粒子所受到的电场力与磁场力平衡, 不发生偏转, 由此可得

$$v = \frac{E}{B} \quad (2)$$

将 (2) 式代入 (1) 式, 并代入实验数据, 求得这种粒子的比荷为

$$\frac{e}{m} \approx 10^{11} \text{ C/kg}$$

汤姆孙通过进一步的实验, 发现当改变阴极材料时, 测得的比荷都相同, 表明这种粒子是各种材料的共有成分。1898 年, 汤姆孙测出这种粒子所带电荷量与氢离子的电荷量接近, 从而证明这种粒子的质量小于氢原子质量的千分之一。至此, 这种粒子的“身份”已经明确: 它是一种带负电的质量很小的粒子。物理学家把这种粒子叫做**电子** (electron)。

实验探究

用洛伦兹力实验仪测定阴极射线的比荷

图 5-1-5 所示是洛伦兹力实验仪。

你能用这个仪器测出阴极射线中电子的比荷吗？

实验中需测量哪些物理量？

怎样测量这些物理量？

怎样根据测量结果计算电子的比荷？

请进行实验，并将测量结果与同学们交流。



图 5-1-5 洛伦兹力实验仪

电子发现的重大意义

电子是人类发现的第一个比原子小的粒子。电子的发现，打破了原子不可再分的传统观念，使人们认识到原子不是组成物质的最小微粒，原子本身也有内部结构。从此，原子物理学飞速发展，人们对物质结构的认识进入了一个新时代。

家庭作业与活动

1. J. J. 汤姆孙是通过怎样的实验和推理过程发现电子的？
2. 你认为电子的发现，对人类探索微观世界有什么重大意义？
3. 当阴极射线通过匀强电场 E 或匀强磁场 B 时，图 5-1-6 中射线形状中正确的是（ ）。
4. 图 5-1-7 所示为汤姆孙用来测定电子比荷的装置。当极板 P 和 P' 间不加偏转电压时，电子束打在荧光屏的中心 O 点处，形成一个亮点；

加上偏转电压 U 后，亮点偏离到 O' 点， O' 点到 O 点的竖直距离为 d ，水平距离可忽略不计。此时在 P 与 P' 之间的区域再加上一个方向垂直于纸面向里的匀强磁场，调节磁感应强度，当其大小为 B 时，亮点重新回到 O 点。已知极板水平方向长度为 L_1 ，极板间距为 b ，极板右端到荧光屏的距离为 L_2 。

- (1) 求打在荧光屏 O 点的电子速度的大小。
- (2) 推导出电子比荷的表达式。

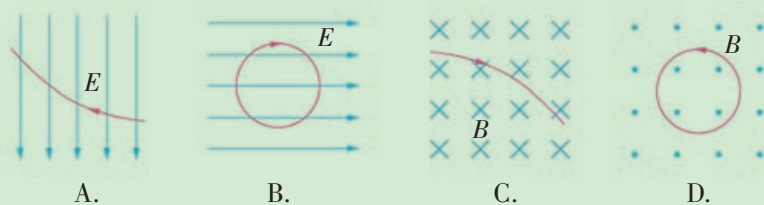


图 5-1-6

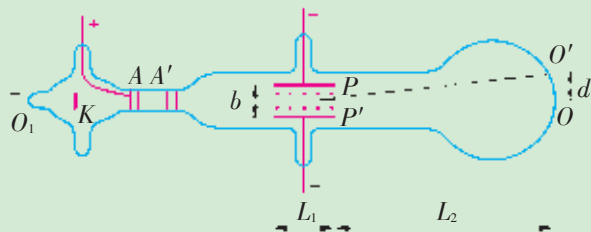


图 5-1-7

人类追求科学真理和探索自然奥秘的强烈欲望，始终是科学发展的永恒动力。



图 5-2-1 汤姆孙的原子“枣糕”模型



卢瑟福（E. Rutherford, 1871—1937），英国物理学家，20 世纪最著名的实验物理学家之一。他在研究放射性现象和原子结构等方面都作出了重大的贡献。1908 年获诺贝尔化学奖。

5.2 原子模型的提出

原子内部除了电子外，还有什么？原子内部的结构又是怎样的？

在 19 世纪末和 20 世纪初，科学家还无法通过实验手段来直接揭示原子的内部结构，于是利用假设的方法，构思出一个个原子结构的模型，再通过实验验证和理论分析，一步步接近原子结构的真实图景。

汤姆孙的原子“枣糕”模型

20 世纪初，科学家们提出了几种原子模型，其中最有影响的是 J. J. 汤姆孙于 1904 年提出来的原子模型。汤姆孙在发现电子后，便投入了对原子内部结构的探索，他通过丰富的想象，提出了原子的“枣糕”模型（图 5-2-1）。在这个模型里，汤姆孙把原子看作一个球体，正电荷均匀地分布在整個球内，电子像枣糕上的枣子一样嵌在球中，被正电荷吸引着。原子内正、负电荷相等，因此原子的整体呈中性。汤姆孙的原子“枣糕”模型是第一个有一定科学依据的原子结构模型。

汤姆孙的原子“枣糕”模型在一段较长的时间内得到科学家们的普遍接受。在此期间，人们对原子结构的探索空前活跃，一些科学家还提出了其他的一些原子结构模型。

一位科学家要提出科学的原子模型，你认为他必须具备一些什么条件？

α 粒子散射实验

1909 年，英国物理学家卢瑟福为了检验汤姆孙模型的正确性，指导他的助手盖革（H. Geiger）和马斯登（E. Marsden）设计了一个引人注目的实验。

实验装置如图 5-2-2 所示。在一个小铅盒里放有少量的放射性元素钋，钋发出的 α 粒子从铅盒的小孔射出，形成很细的一束射线射到金箔上。 α 粒子穿过金箔后，打到荧光屏上产生一个个闪光点。整个装置放在一个抽成真空的容器里。荧光屏和观察闪光的显微镜能够围绕金箔在一个圆周上运动。

实验表明，绝大多数 α 粒子穿过金箔后仍沿原来的方向前进，但是有少数 α 粒子却发生了较大的偏转，有的 α 粒子偏转角超过 90° ，极少数 α 粒子甚至被反弹回来。

α 粒子的散射现象是出人意料的。卢瑟福对实验的结果感到十分惊奇，他说：“这是我一生中从未有的最难以置信的事，它好比你对一张纸发射一发炮弹，结果被反弹回来而打到自己身上……”。

思考与讨论

1. 如果汤姆孙的原子模型是正确的，那么上述实验中， α 粒子穿过金箔后的方向和分布应是怎样的？
2. 你对卢瑟福的上述说法是怎样理解的？

卢瑟福的原子核式结构模型

卢瑟福对他的实验结果进行了分析和计算，得出的结论是：除非原子的几乎全部质量和正电荷都集中在原子中心的一个很小的核上，否则， α 粒子的大角度散射是不可能的。卢瑟福在这个实验的基础上，于 1911 年提出了他的原子核式结构模型。

在原子的中心有一个很小的核，叫做**原子核**（atomic nucleus），原子的全部正电荷和几乎全部质量都集中在原子核上，带负电的电子在核外空间里绕着核旋转。

按照这个模型，原子内大部分的空间是空的， α 粒子很容易穿过。当 α 粒子离原子核较远时，受到的库仑斥力很小，运动方向改变很小；只有当 α 粒子与原子核十分接近时，才会受到很大的库仑斥力，发生大角度的偏转。由于原子核很小，所以只有极少数 α 粒子发生大角度的偏转（图 5-2-3）。

卢瑟福的原子核式结构模型能很好地解释 α 粒子散射实验的结果，自然就取代了 J. J. 汤姆孙的原子“枣糕”模型。

思考与讨论

1. 卢瑟福说：“我知道了！原子到底是什么样的……可以将它想象成一个小的太阳系。”你是怎样理解这段话的？
2. 卢瑟福的原子核式结构模型与汤姆孙的原子“枣糕”模型相比较，有什么不同？这个模型的建立，你认为在人类探索原子结构的进程中有怎样的重大意义？

原子核的电荷和尺度

根据卢瑟福的原子核式结构模型，可以推导出 α 粒子的散射公式，利用这个公式和对不同元素进行 α 粒子散射实验所得的数据，就可以计算出各种元素原子核的电荷量。当时得到碳

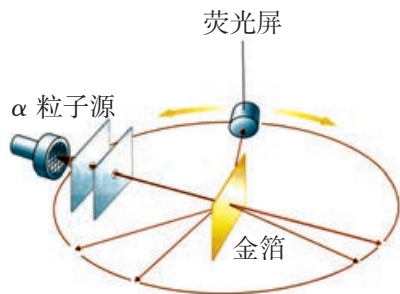


图 5-2-2 α 粒子散射实验示意图

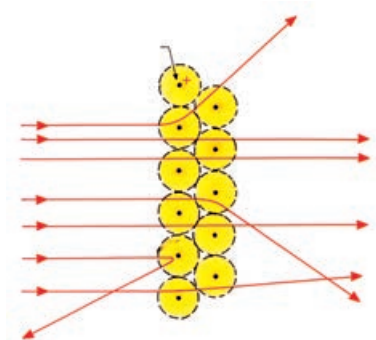


图 5-2-3 用原子核式结构模型解释 α 粒子散射实验

1911 年，卢瑟福引起了自德谟克里特时代以来，我们物质观念上的最大变化。

——爱丁顿

原子核的电荷量是研究原子的重要数据。原子是电中性的，知道了某种元素的原子核电荷数，就可以推算出这种原子内含有的电子数。

核的电荷量为 $6e$ ，铝核为 $13e$ 或 $14e$ ，金核为 $78e$ 或 $79e$ ，其中 e 是电子的电荷量。这些元素的原子核电荷数非常接近于它们的原子序数，这为理解元素周期表提供了重要的线索，它说明元素周期表是按原子核外电子数来排列的。

由 α 粒子散射实验的数据，还可以估算出原子核的尺度。原子核半径的数量级为 10^{-15} m ，而原子半径的数量级为 10^{-10} m ，两者相差达十万倍之多，可见原子内部非常“空旷”。

思考与讨论

1. 你从原子模型的提出与演进过程中得到了哪些启示？
2. 在科学家探索原子结构奥秘的过程中，哪些事例最使你感动？为什么？

家庭作业与活动

1. J. J. 汤姆孙发现了电子，从而证明原子内部有带负电的电子。但原子是中性的，所以必定还有带正电的部分，这些正电荷具有什么性质？它们是怎样分布的？正、负电荷之间如何相互作用？原子内究竟有多少电子？电子的数目如何决定？怎样才能保持原子的稳定状态？面对这些问题，物理学家们根据自己的实践和见解，从不同的角度提出了各种不同的模型。经过实践的检验，有的成功，有的失败。

请你查阅文献，选取一些有代表性的例子来说明原子模型的历史演变过程。

2. 卢瑟福是怎样提出原子核式结构模型的？

3. 原子的直径约为 10^{-10} m ，氢原子核的直径约为 $3 \times 10^{-15} \text{ m}$ ，若把氢原子放大，使核的直径为 1 mm ，则电子离核的距离为多大？

4. α 粒子散射实验是让 α 粒子射向金箔去碰撞金原子，结果发现：大部分 α 粒子穿过金箔后不发生偏转，少数 α 粒子发生偏转，有的偏转角很大。

(1) 为什么有的 α 粒子会发生大角度的偏转？

(2) 已知金的原子序数为 79，当 α 粒子距金原子中心为 $1.0 \times 10^{-13} \text{ m}$ 时受到的库仑力多大？

5.3 量子论视野下的原子模型

科学家在探索原子结构时，还有一条线索很重要，就是在原子的核式结构模型提出之前，科学家就已经知道每种元素的原子发出的光都有自己的特征，于是，光又成为探索原子结构的一个突破口。

氢原子光谱

早在17世纪，牛顿就发现了日光通过三棱镜后的色散现象，并把实验中得到的彩色光带叫做光谱。1814年，德国物理学家夫琅禾费（J. von Fraunhofer）展示了太阳光谱内的多条黑线，其后，光谱的研究受到了重视，科学家认为光谱与光源所含元素的原子有关。

稀薄气体在强电场的作用下，气体分子会电离成能自由移动的正负带电离子，气体变成了导体，导电时还会发光。把稀薄气体封闭在两端有电极的细玻璃管中，就制成了气体放电管，也叫光谱管（如图5-3-1所示）。不同的气体发出光的颜色不同，你在大街上见到绚丽多彩的霓虹灯广告，其发光原理与气体放电管是相同的。

通过分光镜（如图5-3-2所示）可以看到稀薄气体的光谱是由一些不连续的亮线组成，这些亮线叫谱线，呈分立特征。不同的气体，谱线的分布也不同。由于氢是最简单的元素，它的光谱也是最简单的，所以科学家们就试图从氢光谱上寻找一个突破口。

可以通过分光镜观察到氢气光谱管放电时氢气的四条谱线：红、绿、蓝和紫，如图5-3-3所示。1885年，巴耳末（J. Balmer）对可见光区的这四条谱线做了分析，并计算出了四条谱线的波长。当时，科学界已经有了一个共识，就是任何用来解释原子结构的理论，都必须能对这些谱线的波长作出合理的诠释。



图 5-3-1 光谱管

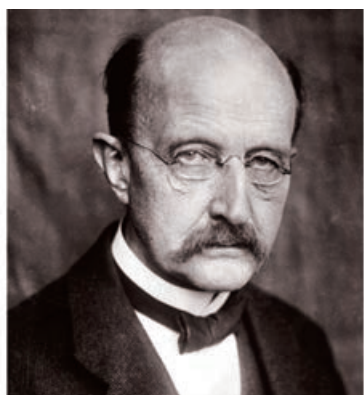


图 5-3-2 分光镜



图 5-3-3 氢原子的光谱

如果一个物体能完全吸收投射到其表面的电磁波而不产生反射,我们称之为**绝对黑体**(absolute black body),简称**黑体**。



普朗克 (M. Planck, 1858—1947), 德国物理学家。因发现量子而对物理学发展做出的杰出贡献,于1918年荣获诺贝尔物理学奖。

这个发现将人类的观念,不仅是有关经典科学的观念,而且是有关通常思维方式的观念的基础砸得粉碎。

——玻尔

普朗克的量子假设

德国物理学家普朗克对黑体辐射问题进行了系统的理论研究,他结合有关实验证据,于1900年10月推导出了普朗克公式。

1900年12月14日普朗克在德国物理学会会议上宣读了论文《关于正常光谱的能量分布定律的理论》,提出了革命性的量子假设。这一天便成了量子论的誕生日。

普朗克设想,黑体由大量振子组成,这些振子能够和周围的电磁场交换能量;这些振子的能量 E 只能是某一最小能量值 $h\nu$ 的整数倍,即

$$E = nh\nu \quad (n = 1, 2, 3, \dots),$$

式中 ν 为振子的频率, h 是一个常量,叫做**普朗克常量** (Planck constant), 实验测得

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

普朗克指出:只有认为振子辐射或吸收的能量是不连续的,理论计算的结果才能与实验事实相符。这样的一份最小能量 $h\nu$ 叫做**量子** (quantum of energy)。在微观世界中,能量取分立值的现象叫做**能量的量子化** (quantization of energy)。

案例分析

案例 某红光的波长为 $6.35 \times 10^{-7} \text{ m}$, 求其量子的值。

分析

根据公式 $\nu = \frac{c}{\lambda}$ 和 $E = h\nu$, 可求得量子的值

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = 6.63 \times 10^{-34} \times \frac{3.0 \times 10^8}{6.35 \times 10^{-7}} \text{ J} = 3.13 \times 10^{-19} \text{ J}$$

量子的值非常小,在宏观世界里一般观测不到量子的效应,可认为能量是连续的,因此经典物理学能很好地解释宏观世界的运动规律。但当人们的视野深入到原子以下的微观世界时,就必须考虑能量的量子化。

普朗克的量子假设,使人类对微观世界的本质有了全新的认识,对现代物理学的发展产生了革命性的影响。普朗克常量 h 是自然界最基本的常量之一,它体现了微观世界的基本特征。

玻尔的原子模型

卢瑟福的原子核式结构模型很好地解释了 α 粒子散射实验，初步建立了原子核式结构的图景。但是这个模型有一定的局限性。按照经典电磁理论，电子在围绕原子核高速运转时，必然要向外辐射电磁波。辐射能量后的电子，将因原子核的引力作用而沿螺旋线运动，最终落到原子核上。这样，原子也将“塌方”，不再成为原子了。但事实上，原子的结构相当稳定。

另外，电子在绕原子核转动过程中，向外辐射电磁波，其频率等于电子绕核旋转的频率。电子离核越近，转动越快（频率变大），能量越小，其变化是连续的，即原子辐射光的光谱是连续的。但原子（如氢原子）光谱却是一些分立的不连续的谱线。

显然，卢瑟福的原子核式结构模型无法解释氢原子光谱。这是怎么回事？怎样解决这个矛盾？

1913年，丹麦物理学家玻尔为了解决上述矛盾，在卢瑟福的原子核式结构模型的基础上，把量子概念引入了原子系统，提出了玻尔理论。玻尔理论的主要假设是：

（1）原子只能处于一系列不连续的能量状态中，在这些状态中的原子是稳定的，这些状态叫做**定态**（stationary state）。处于定态的原子并不对外辐射能量，只有当原子在两个定态之间跃迁时，才产生电磁辐射。

（2）原子从能量为 E_m 的定态跃迁到能量为 E_n 的定态时，辐射（或吸收）一定频率的光子，光子的能量由两个定态的能量差决定，即

$$h\nu = E_m - E_n$$

式中 h 为普朗克常量， ν 为光子的频率。

（3）原子的不同能量状态对应于电子的不同运行轨道。由于原子的能量状态是不连续的，因此电子不能在任意半径的轨道上运动。

玻尔在上述假设的基础上，还计算出氢原子的电子轨道半径（叫做玻尔半径）与电子在各条轨道上运动时氢原子的能量

$$r_n = n^2 r_1, \quad E_n = \frac{1}{n^2} E_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

式中， r_1 表示第一条（即离核最近的）可能轨道的玻尔半径， E_1 表示电子在这一轨道上运动时氢原子的能量， r_n 表示第 n 条可能轨道的玻尔半径， E_n 表示电子在这一轨道上运动时氢原子



玻尔（N. Bohr, 1885—1962），丹麦物理学家。于1913年把量子论与原子结构模型结合起来，提出了原子能级结构假说，因而获1922年的诺贝尔物理学奖。

的能量。由此可见，电子围绕原子核运动的轨道半径是不连续的，只能是一些分立的数值。

玻尔计算出了 r_1 和 E_1 的数值：

$$r_1 = 0.53 \times 10^{-10} \text{ m}, \quad E_1 = -13.6 \text{ eV}.$$

思考与讨论

玻尔的观点与经典物理学的观点有很大的不同：

1. 玻尔认为，处于定态的原子并不对外辐射能量。经典物理学的观点是怎样的？

2. 玻尔认为，电子只能在一些半径取分立值的轨道上运动，如氢原子中电子运动轨道的最小半径是 $0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$ ，其他的玻尔半径只能是 $2.12 \times 10^{-10} \text{ m}$ 、 $4.77 \times 10^{-10} \text{ m}$ 等，玻尔半径不可能是介于这些数值之间的中间值。经典物理学的观点是怎样的？

能级和原子光谱

在玻尔的原子模型中，原子的能量状态是不连续的，因而各定态的能量只能取一些分立值，我们把原子在各定态的能量值叫做原子的能级(energy level)。图 5-3-4 是氢原子的能级图。

在正常状态下，原子处于能量最低的状态，这时电子在离核最近的轨道上运动，这一定态叫做基态(ground state)。电子在其他轨道上运动时的定态叫做激发态(excited state)。基态和各激发态的能量分别用 E_1 、 E_2 、 E_3 、 $\cdots$ 表示。

原子处于基态时最稳定，处于较高能级的激发态时会自发地向较低能级的激发态或基态跃迁，这一过程是辐射能量的过

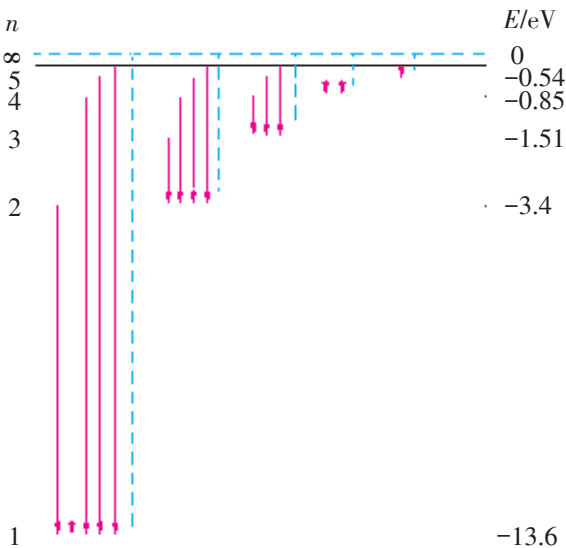


图 5-3-4 氢原子的能级

程, 能量以光子的形式辐射出去。原子从基态或较低能级的激发态向较高能级的激发态跃迁的过程是吸收能量的过程。给物体加热或有光照射物体时, 物体中某些原子能够从相互碰撞或从入射光子中吸收一定的能量, 从基态或较低能级的激发态跃迁到较高能级的激发态。原子吸收或辐射的能量, 等于发生相应跃迁的两个能级的能量差。

各种物质的原子结构不同, 能级分布也就各不相同。它们可能发射的光的频率也不同, 每种元素的原子发出的光都有自己的特征, 因而具有自己的原子光谱, 图 5-3-3 显示了氢原子光谱的几条谱线。

玻尔理论很好地解释了氢原子的光谱。由于原子的能级是不连续的, 所以辐射的光子的能量也是不连续的。从光谱上看, 原子辐射光波的频率只有若干分立的值。按照玻尔理论计算得到的氢原子光谱跟实验观察的结果符合得很好, 而且还预言了一些新的谱线。

案例分析

案例 计算氢原子从 $n = 4$ 能级跃迁到基态时, 辐射的光波波长。

解答 根据玻尔理论, 由 $h\nu = E_m - E_n$ 得到氢原子跃迁时辐射的光波频率为

$$\nu = \frac{E_4 - E_1}{h}$$

代入图 5-3-4 中的数据, 再根据 $c = \lambda\nu$, 即可计算出辐射的光波波长

$$\lambda = 9.75 \times 10^{-8} \text{ m}$$

玻尔理论的成就和局限

卢瑟福的原子核式结构模型发表后, 几乎没有引起多少反响。玻尔将量子论引入原子能级结构理论后, 科学界才予以重视, 并将卢瑟福和玻尔的原子模型称为“卢瑟福 - 玻尔模型”。

玻尔理论在解释氢原子光谱上获得了很大成功, 但在解释比较复杂的原子光谱时遇到了困难。例如, 有两个外层电子的氦原子光谱, 用理论推导出来的结果跟实验事实出入很大。后来玻尔和其他物理学家研究了这些问题, 终于明白这个理论成功之处在于它引入了量子观念, 不足之处在于它没有彻底摆脱经典物理学的束缚, 保留了电子有确定的位置和动量、绕原子核在圆周轨道上运行的概念, 并用经典力学原理加以计算, 是“普

朗克的量子观念与经典力学的混合模型”。但正是这种“混合”，打破了经典物理学一统天下的局面，为建立描述微观世界运动规律的量子力学奠定了基础。

多学一点

激光的产生机理

原子从较高的激发态向较低的激发态或基态跃迁的过程，是以光子的形式辐射能量的过程，这就是原子发光现象。

原子发光有两种情形，一种是自发辐射，即处于不稳定的激发态的原子，自发地跃迁到较低能级，辐射出一个光子。各个原子发出的光是向四面八方辐射的，它们的频率和振动情况互不相同，我们看到的只是大量光产生的平均效果，这种光就是自然光，就是普通光源的发光的情形。

另一种是受激辐射，当原子处于激发态 E_2 时，如果恰好有能量 $h\nu = E_2 - E_1$ 的光子从附近通过，在入射光的电磁场的影响下，原子会发出一个同样的光子而跃迁到低能级 E_1 去，这种辐射叫做受激辐射。原子发生受激辐射时，发出的光子的频率和振动情况，都跟入射光子完全一样。如此，一个入射光子由于受激辐射就变成了两个同样的光子。如果这两个光子在介质中传播时再引起其他原子发生受激辐射，就会产生越来越多的相同光子，使光得到加强。由于受激辐射而得到加强的光被称为激光。

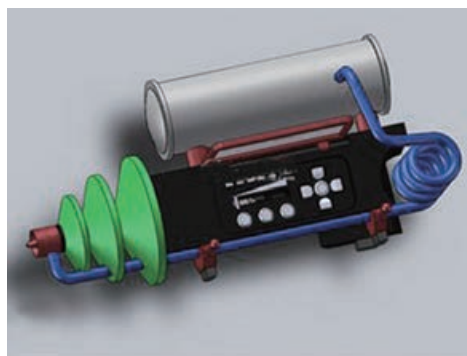


图 5-3-5 激光发射器

家庭作业与活动

- 根据玻尔理论，某原子的电子从能量为 E 的激发态跃迁到能量为 E' 的激发态，辐射出波长为 λ 的光，以 h 表示普朗克常量， c 表示真空中的光速，那么 E' 等于（ ）。
 - $E - h \frac{\lambda}{c}$
 - $E + h \frac{\lambda}{c}$
 - $E - h \frac{c}{\lambda}$
 - $E + h \frac{c}{\lambda}$
- 关于氢原子在不同能级间的跃迁，下列叙述中正确的是（ ）。
 - 用波长为 60 nm 的 X 射线照射，可使处于基态的氢原子电离出自由电子
 - 用能量为 10.2 eV 的光子照射，可使处于基态的原子跃迁到激发态
 - 用能量为 11.0 eV 的光子照射，可使处于基态的氢原子跃迁到激发态
 - 用能量为 12.5 eV 的光子照射，可使处于基态的氢原子跃迁到激发态
- 要使处于基态的氢原子电离，它所吸收的光子的频率至少是多大？

第5章家庭作业与活动

A 组

- 在 α 粒子散射实验中，没有考虑 α 粒子跟电子的碰撞，其原因是（ ）。
 - α 粒子不跟电子发生相互作用
 - α 粒子跟电子相碰时，损失的能量极少，可忽略
 - 电子的体积很小， α 粒子不会跟电子相碰
 - 由于电子是均匀分布的， α 粒子所受电子作用的合力为零
- 在 α 粒子散射实验中，如果两个具有相同能量的 α 粒子以不同的角度散射出来，则散射角度大的这个 α 粒子（ ）。
 - 更接近原子核
 - 更远离原子核
 - 受到一个以上的原子核作用
 - 受到原子核较大的冲量作用
- 处于基态的氢原子在某单色光照射下，只能发出频率分别为 ν_1 、 ν_2 、 ν_3 的三种光，且 $\nu_1 < \nu_2 < \nu_3$ ，则该照射光的光子能量为（ ）。
 - $h\nu_1$
 - $h\nu_2$
 - $h\nu_3$
 - $h(\nu_1 + \nu_2 + \nu_3)$
- 用分光镜观察洒有食盐的酒精灯火焰的光谱，会看到什么现象？
- 氢原子的部分能级如图 5-A-1 所示。已知可见光的光子能量在 1.62 eV 到 3.11 eV 之间。由此可推知，氢原子（ ）。
 - 从高能级向 $n = 1$ 能级跃迁时发出的光的波长比可见光的短
 - 从高能级向 $n = 2$ 能级跃迁时发出的光均为可见光
 - 从高能级向 $n = 3$ 能级跃迁时发出的光的频

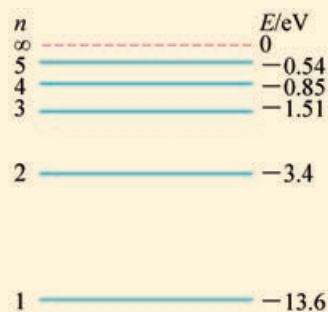
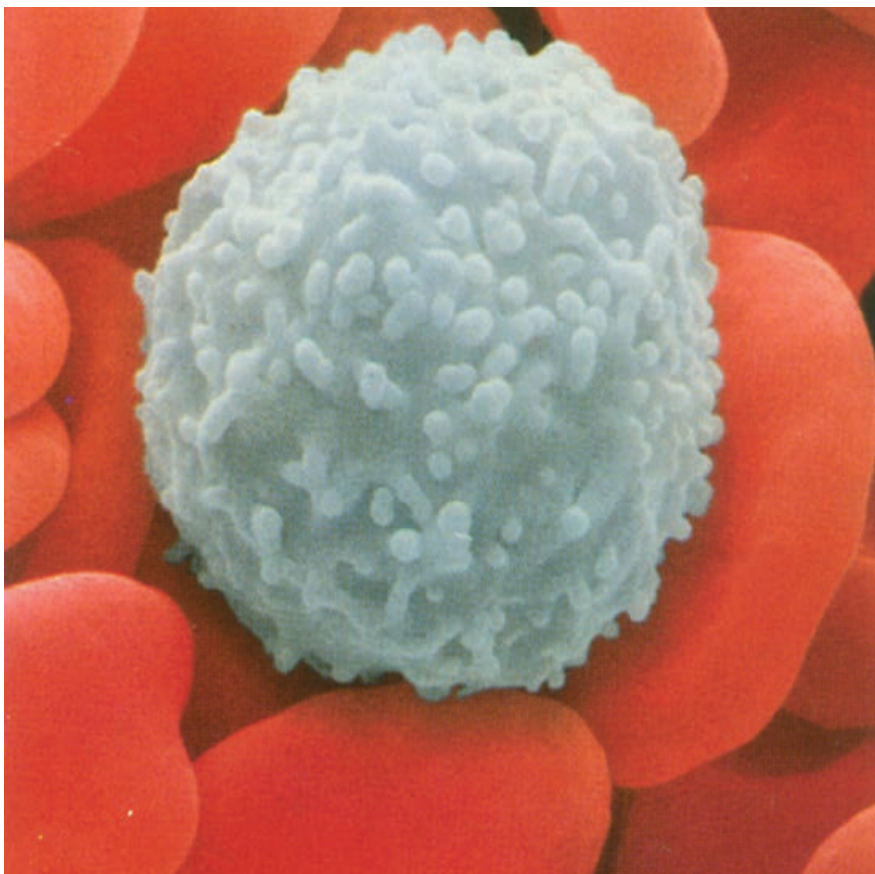


图 5-A-1

- 率比可见光的高
 - 从 $n = 3$ 能级向 $n = 2$ 能级跃迁时发出的光为可见光
 - 要使处于 $n = 2$ 的激发态的氢原子电离，它需吸收的能量为多大？
 - 氢原子处于 $n = 3$ 的激发态时，可能放出几种能量的光子？它们分别是什么类型的光？
- B 组**
- 你能采用什么方法来判定太阳大气中有没有氧元素？
 - 现有一群处于 $n = 4$ 能级上的氢原子，已知氢原子的基态能量 $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ ，氢原子处于基态时电子绕核运动的轨道半径为 r ，静电力常量为 k ，普朗克常量 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。
 - 电子在 $n = 4$ 轨道上运动的动能是多少？
 - 这群氢原子发光的光谱共有几条谱线？
 - 这群氢原子所发出的光子的最大频率是多少？
 - 去图书馆或上网查阅资料，了解人类探索原子结构的历史及有关经典实验，写出报告，与同学们交流。



第 6 章 波粒二象性

扫描电子显微镜可生成极其详细生动的三维图像，在上图所示的照片中，圆盘状的血红细胞和球状的白细胞纤毫毕现，让人一览无遗。扫描电子显微镜利用了电子的波动性，以电子束代替光束在微观世界中探幽入微，我们不禁要问：

电子究竟是粒子，还是波？

光会不会也具有粒子性？

实物粒子是否具有波动性？

本章将循着物理学家探索的足迹，通过实验了解光电效应现象，认识爱因斯坦光电效应方程及其意义；根据实验结论说明光的波粒二象性，知道实物粒子具有波动性，了解微观世界的量子化特征；体会量子论的建立对人们认识物质世界的影响，从而完善对物质和运动的认识。

6.1 光电效应现象

19 世纪 60 年代，麦克斯韦提出电磁场理论，19 世纪 80 年代赫兹用实验验证了这一理论，光的波动说取得了胜利。但同时赫兹还发现了用光的波动说无法解释的现象——光电效应。

光电效应实验

1887 年，赫兹在做证实麦克斯韦理论的火花放电实验时意外地发现：当接收电磁波的电极受到紫外线的照射时，火花放电就更容易产生。

此后，许多物理学家对此进行了深入研究。英国物理学家 J. J. 汤姆孙、德国物理学家勒纳德（P. Lenard）等人通过实验认识到：当光照射到金属表面上时，金属内部的自由电子会从表面逃逸出来（图 6-1-1）。

在光的照射下物体发射电子的现象叫光电效应（photoelectric effect），所发射出来的电子叫做光电子（photoelectron）。

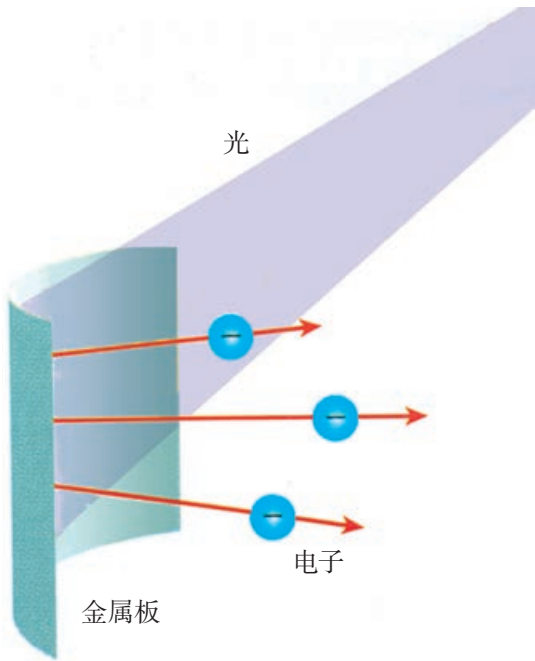


图 6-1-1 光电效应现象

实验探究 探究光电效应产生的条件

如图 6-1-2 所示，取一块锌板，用砂纸擦净其一面的氧化层。用金属导线将锌板连接到验电器上。设法给锌板带上负电，验电器的箔片张开。

1. 用紫外线灯照射锌板擦净的一面，验电器的箔片张角有何变化？
2. 在紫外线灯和锌板间插入一块玻璃，验电器的箔片张角有何变化？
3. 用白炽灯照射锌板擦净的一面，验电器的箔片张角有何变化？设法增加白炽灯的亮度，情况有无改变？

从上述实验中，你能得到什么结论？

请思考并讨论：实验中为什么要给锌板带上负电？带正电行吗？如果不给锌板带电，怎样才能观察到光电效应现象？请试一试。

锌板表面极易氧化，每次实验前都应该用砂纸擦去氧化层。

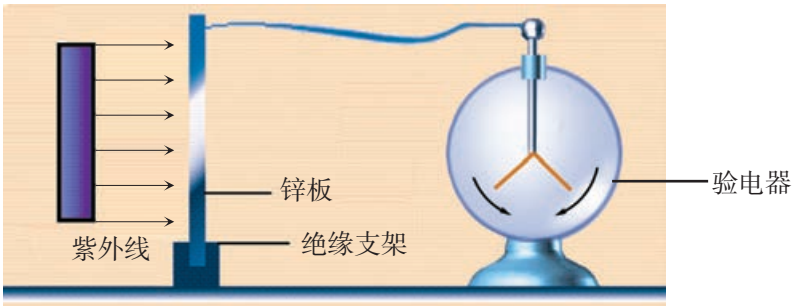


图 6-1-2 光电效应实验

探究光电效应的规律

实验探究 研究光电效应的规律

如图 6-1-3 配置实验装置，进一步研究光电效应的规律。

1. 加在光电管两极上的正向电压（阳极 A 接电源正极，阴极 K 接电源负极）为零时，用紫光照射到用铯做成的阴极 K 上，回路中有电流吗？不改变光照条件，当正向电压增大时，电流如何变化？电流会持续增大吗？

2. 在光电管两极加上反向电压，当电压由小逐渐增大的过程中，电流表指针怎样变化？引起变化的原因是什么？

3. 当反向电压达到一定数值时，电流变为零，这时的电压叫做**遏止电压**。有同学认为，遏止电压 U 与光电子的最大动能 E_{km} 有关，其关系可由 $E_{\text{km}} = eU$ 表达。你同意吗？请说明理由。

4. 改变紫光的强度进行实验；改用绿光、蓝光再各做一次。有人通过实验得到了如表 1 所示的实验数据，请对表中的数据进行分析、处理，把结果填入表 2。你能得到什么结论？

勒纳德等人通过实验得出如下结论：

1. 对于各种金属都存在着一个**截止频率**（cutoff frequency），

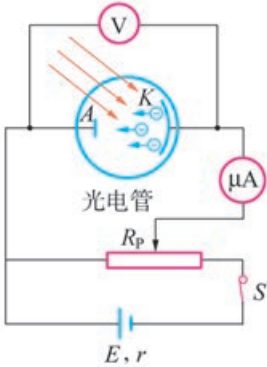


图 6-1-3 研究光电效应的电路图

表 1

颜色	绿	蓝	紫	
波长 / nm	546	480	410	
			强度较低	强度较高
反向电压	光电流	光电流	光电流	光电流
U/V	$I/\mu\text{A}$	$I/\mu\text{A}$	$I/\mu\text{A}$	$I/\mu\text{A}$
0.00	10.4	11.2	8.5	14.8
0.10	7.1	9.0	7.6	13.3
0.20	4.0	7.0	6.7	11.9
0.30	1.0	4.9	5.7	10.4
0.40	0	2.8	4.8	8.9
0.50	0	1.2	3.9	7.4
0.60		0.4	3.0	6.0
0.70		0	2.0	4.5
0.80		0	1.1	3.0
0.90			0.7	1.7
1.00			0.3	0.8
1.15			0	0

表 2

颜色	波长 λ/nm	频率 ν/Hz	遏止电压 U/V	最大动能 E_{km}/eV
绿				
蓝				
紫(强度较低)				
紫(强度较高)				

或称为**极限频率**，当入射光的频率高于这个截止频率时，才能产生光电效应；如果入射光的频率低于这个截止频率，无论光多么强，照射时间多么长，都不会产生光电效应。

2. 光电子的最大动能随着入射光频率的增大而增加，与入射光的强度无关。

3. 当产生光电效应时，单位时间内从金属表面逸出的电子数与入射光的强度有关，光的强度越大，单位时间内逸出的电子数越多。

4. 入射光射到金属表面时，光电子的产生几乎是瞬时的。

有人对光电效应做出如下解释。光是一种电磁波，其能量由光的强度决定，而光的强度又由光的振幅决定，与频率无关。当光射到金属表面时，金属中的自由电子会由于电磁场的作用而振动。只要光的强度足够大，照射的时间足够长，就可使自由电子获得足够的能量，飞出金属表面。你认为这种说法能解释光电效应的实验结果吗？为什么？

在产生光电效应时，电子脱离某种金属所做功的最小值，叫做这种金属的**逸出功**（work function），用符号 W 表示。

不同金属的逸出功不同，表 3 列出了几种金属的截止频率和逸出功。

表 3 若干金属的截止频率 ν_0 和逸出功 W

金属	ν_0 / Hz	W/eV
铯	4.55×10^{14}	1.9
钾	5.38×10^{14}	2.2
锌	8.07×10^{14}	3.3
银	11.5×10^{14}	4.8
铂	15.3×10^{14}	6.3

家庭作业与活动

1. 如图 6-1-4 所示，用导线将验电器与洁净锌板连接，触摸锌板使验电器指示归零。用紫外线照射锌板，验电器指针发生明显偏转，接着用毛皮摩擦过的橡胶棒接触锌板，发现验电器指

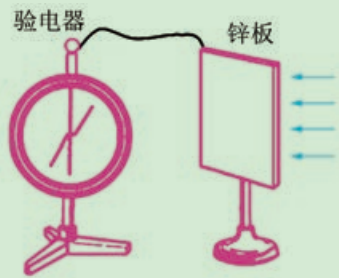


图 6-1-4

针张角减小，此现象说明锌板带_____电（选填“正”或“负”）；若改用红外线重复上述实验，结果发现验电器指针根本不会发生偏转，说明金属锌的截止频率_____红外线的频率（选填“大于”或“小于”）。

2. 某单色光照射某金属时不能产生光电效应，则下列措施中可能使该金属产生光电效应的是（ ）。
- A. 延长光照时间
 - B. 增大光的强度
 - C. 换用波长较短的光照射
 - D. 换用频率较低的光照射

6.2 光电效应的理论解释

面对光电效应的实验结果，如何从理论上做出合理的解释呢？

爱因斯坦的光子说

1905 年，26 岁的爱因斯坦发表了题为《关于光的产生和转化的一个启发性观点》的论文，提出了光的量子理论。

爱因斯坦提出，光在空间传播时不是连续的，而是一份一份的，每一份叫做一个光量子，简称光子（photon）。光子的能量 E 跟光的频率 ν 成正比，即

$$E = h\nu$$

式中 h 为普朗克常量。这个学说叫做光子说。

你能用光子说来解释光电效应的实验结果吗？

从点光源发射出来的光束的能量在传播中不是连续分布在越来越大的空间之中，而是由个数有限的、局限在空间各点的能量子所组成。这些能量子能够运动，但不能再分割，而只能整个地被吸收或产生出来。

——爱因斯坦

爱因斯坦光电效应方程

光子说对光电效应做出了圆满的解释。当光照射到金属表面时，金属中的一个电子吸收一个光子，得到大小为 $h\nu$ 的能量。如果照射光的频率足够高，使得电子吸收光子后能量变得足够大，它就能从金属表面逃逸出来，成为光电子，产生光电效应。由于金属中电子吸收光子能量时是一对一进行的，吸收过程十分迅速，因此光电子的产生几乎是瞬时的。

如果光子的能量 E 小于金属的逸出功 W ，增加照射光的强度和照射时间，虽能提高射到金属表面上的光子数，但电子吸收了光子的能量后，却不能从金属中逃逸出来。这就是存在截止频率的原因。

请思考并讨论：金属的截止频率与其逸出功有何关系？请举例说明。

如果金属中的电子从入射光子得到的能量 E 大于逸出功 W ，那么光电子在脱离金属表面后具有一定的动能。如果一光电子在逸出金属表面的过程中所做功恰好等于逸出功 W ，那么它具有最大动能 E_{km} 。根据能量守恒定律，可以写出以下关系式：

$$h\nu = W + E_{\text{km}}$$

这就是爱因斯坦在其著名论文中写下的光电效应方程。爱因斯坦的光子说不仅可以解释当时有关光电效应的所有实验结果，还对光电子的最大动能与入射光频率、金属逸出功之间的定量关系作出了精确预测，光电效应方程是能量守恒定律在光

电效应现象中的具体体现。

密立根的实验验证

密立根对光电效应进行了长期研究。在 1916 年发表的论文中,他公布了实验结果:光电子的最大动能与入射光频率的关系曲线,确实是一条直线,由直线斜率还精确测定了 h 的值。

对于一种金属,由于它的逸出功是一定的, h 又是一个常量,根据光电效应方程,光电子的最大动能与入射光频率呈一种线性关系,即 $E_{\text{km}} - \nu$ 图像是一条直线(图 6-2-1)。这条直线的斜率就是普朗克常量 $h = \frac{\Delta E_{\text{km}}}{\Delta \nu}$, 这为普朗克常量的实验测定指明了方向。这条直线在 ν 轴上的截距就是这种金属的截止频率 ν_0 , 由此可求得逸出功 $W = h\nu_0$ 。

密立根的实验结果促成爱因斯坦“因在数学物理方面的成就,尤其是发现了光电效应的规律”而荣获 1921 年的诺贝尔物理学奖,密立根也“因基本电荷及光电效应方面的工作”而荣获 1923 年的诺贝尔物理学奖。

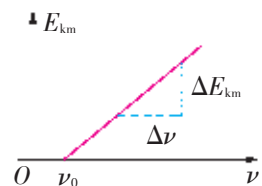


图 6-2-1 $E_{\text{km}} - \nu$ 图像

案例分析

案例 用频率为 $1.00 \times 10^{15} \text{ Hz}$ 的紫外线照射钠的表面,释放出来的光电子的最大动能为 1.86 eV , 求钠的光电效应截止频率。

分析 入射光中光子的能量

$$E = h\nu = 6.63 \times 10^{-34} \times 1.00 \times 10^{15} \text{ J} = 6.63 \times 10^{-19} \text{ J}$$

释放出来的光电子的最大动能

$$E_{\text{km}} = 1.86 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = 2.98 \times 10^{-19} \text{ J}$$

钠的逸出功与其截止频率的关系为 $W = h\nu_0$, 根据光电效应方程可得到本案例的答案。

请自行完成解答本题。

光子说的又一明证——康普顿效应

1916 年,爱因斯坦进一步指出:光子不仅具有能量,而且像实物粒子一样具有动量,其大小为

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

其方向为光波的传播方向。美国物理学家康普顿发现的**康普顿效应**(Compton effect)为此提供了明证。我国著名的物理学家吴有训以精确的实验和严密的分析进一步验证了康普顿效应的普遍性。



康普顿 (A. Compton, 1892—1962), 美国物理学家。因发现康普顿效应而与英国物理学家威尔逊(C. Wilson)分享 1927 年的诺贝尔物理学奖。



吴有训 (1897—1977), 中国物理学家。进一步验证了康普顿效应的普遍性。

光电效应在我们身边

一个漆黑的夜晚，一条黑影窜入藏有宝物的博物馆内。突然间，铃声大作，安保人员闻声而动，窃贼束手就擒。这是影视作品中常会出现的场景。但这里的幕后“英雄”，往往是应用光电效应原理制成的警报器，这种警报器用到了光电管。当一束不为人眼所见的红外线或紫外线照射到由光敏材料制成的阴极上时，逸出的光电子在电路中

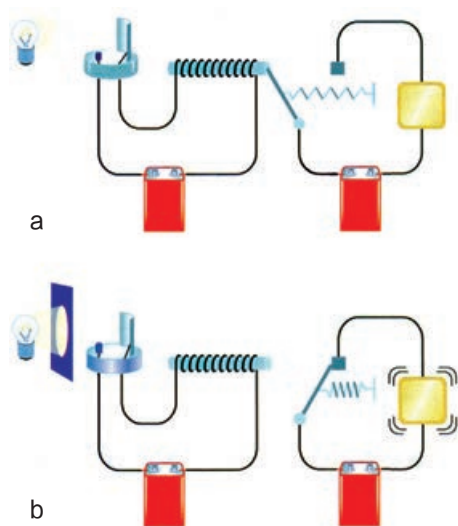


图 6-2-2 警报器的工作原理

产生电流，电流经放大后使电磁铁吸住铁条（如图 6-2-2 a）；一旦有物体挡住光束，阴极上不再有光电子逸出，电磁铁失去磁性，弹簧把铁条拉回，接通警报器电路，于是铃声大作（图 6-2-2 b）。自动门、烟雾探测器等也利用了相同的物理原理，不过现在光电管大多已为光电二极管所替代。

我们在观看电影时，能听到与画面配合一致的配音，也多亏了光电管。影片的音轨位于电影胶片的边缘，是一些宽窄不一的暗条纹。如图 6-2-3 所示，放映电影时，强度不变的光束通过音轨后，形成强度不断变化的光入射到光电管中，在电路中产生变化的电流，经放大后驱动扬声器发出变化的声音。

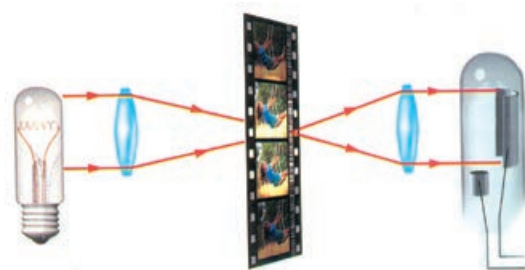


图 6-2-3 电影放映机中的光电管

家庭作业与活动

1. 请思考：量子论关于能量的观点与经典物理学的观点有什么不同？请结合图 6-2-4，与同学们交流体会。

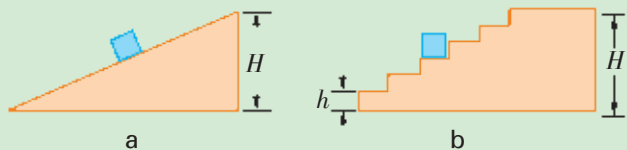


图 6-2-4 关于能量变化的两种观点

2. 对应于 $3.4 \times 10^{-19} \text{ J}$ 的能量子，其电磁辐射的频率和波长各是多少？它是什么颜色的？
3. 当用频率为 $7.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 的紫光分别照射铯、锌和银的表面时，能产生光电效应吗？为什么？若能产生光电效应，逸出的光电子的最大动能是多大？
4. 让波长为 350 nm 的光照射钾表面，产生的光电子的最大动能是 1.3 eV ，求钾的截止频率和逸出功。

6.3 光的波粒二象性

光电效应和康普顿效应告诉我们：光具有粒子性，光子像其他粒子一样，有一定的能量和动量。光的反射、折射、干涉、衍射和偏振现象又向我们表明：光具有波动性。那么，光究竟是什么？

光的波粒二象性

让我们先来考察频率为 2.5 MHz 的无线电波。根据普朗克公式，可算得其光子的能量

$$E = h\nu = 6.63 \times 10^{-34} \times 2.5 \times 10^6 \text{ J} = 1.7 \times 10^{-27} \text{ J}$$

从实验的角度看来，这个能量值太小了。要使一个灵敏的无线电接收天线探测到信号，每秒至少需要 10^{10} 个这样的光子到达天线，因此我们很难探测出到达天线的单个光子，信号表现为一个连续的波。

如果电磁辐射的频率很高，相应的波长很短，其光子能量、动量就很大，光的粒子性就能明显地表现出来。

实验证实光（电磁辐射）具有波和粒子的双重性质。

现代物理学对“光是什么”的回答是：光是波，同时也是粒子，光具有**波粒二象性**（wave-particle dualism）。

光子的能量和动量的公式 $E = h\nu$ 和 $p = \frac{h}{\lambda}$ 对光同时具有粒子性和波动性做出了生动的诠释。式中由普朗克常量 h 把描写光的粒子性的能量 E 、动量 p ，与描写光的波动性的频率 ν 、波长 λ 紧密联系起来。

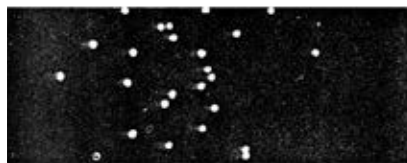
在宏观世界中，我们几乎看不到同时具有波动性和粒子性的现象。但在微观世界里，波粒二象性却是必须予以承认的现实。

再探光的双缝干涉实验

我们曾用光的波动说解释了光的双缝干涉实验的结果（图 6-3-1）。那么，能不能用光的波粒二象性来解释这一结果呢？

图 6-3-1 a 表示曝光时间很短的情况，在胶片上出现的是随机分布的光点。延长胶片曝光的时间，就会出现如图 6-3-1 b 所示的图样。从图中可以看出，光子在某些条形区域出现的概率很大，这些区域是光波通过双缝后产生相干振动加强的区域；而落在其他一些条形区域的概率很小，这些区域是光波通过双缝后产生相干振动减弱的区域。曝光的时间越长，图样就越清

爱因斯坦首先提出“波粒二象性”的概念，他在 1909 年 9 月的一次讲演中指出：“理论物理学发展的随后一个阶段，将给我们带来这样一种光学理论，它可以认为是光的波动论和发射论的某种综合。”



a 28 个光子



b 1000 个光子



c 10000 个光子

图 6-3-1 双缝干涉图样

晰(如图 6-3-1 c)。这说明,可以用光子在空间各点出现的概率,来解释光的干涉图样,即认为光是一种概率波。

在双缝干涉实验中,如果我们挡住双缝中的一条缝,经过一段时间后,在胶片上会出现单缝衍射图样。你能不能用概率波的观念对此进行解释呢?

光既是波又是粒子的说法,常常使人感到困惑。其根源在于我们的思维方式:提到粒子时,我们会联想到小钢球;提到波时,我们会联想到荡漾的水波。

为了解释光的行为,我们应用了波和粒子的观念,而这两个观念似乎是相互抵触的。因为在日常经验中,找不到既是波、又是粒子的物体。随着人类的认识向着微观世界的扩展,未被认识的事物越来越多地出现在我们的面前。从日常经验看来,它们的行为难以理解,我们必须用新的观念予以解释。

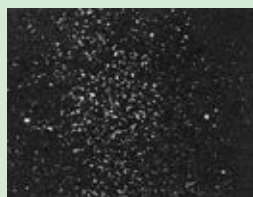
我们应该准备……与我们迄今为止一直据以描述自然的概念做最后的决裂。

——玻尔

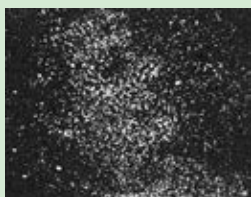
家庭作业与活动

1. 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。试估算 60 W 的白炽灯泡 1 s 内发出的光子数。
2. 在生活中我们会拍很多照片,通常我们都认为,

这是由人和景物发出或反射的光波经过照相机的镜头聚焦在底片上形成的。实际上照片上的图像也是由光子撞击底片,使上面的感光材料发生化学反应形成的。图 6-3-2 是用不同曝光量洗印的照片,请你根据自己对光的理解做出说明。



a 2×10^3 个光子



b 1.2×10^4 个光子



c 9.3×10^4 个光子



d 7.5×10^5 个光子



e 3.5×10^6 个光子



f 2.8×10^7 个光子

图 6-3-2 用不同曝光量洗印的照片

6.4 实物粒子具有波动性

光的波粒二象性理论告诉我们：光是电磁波，又是光子。这表明场和实物并非泾渭分明。那么，电子、质子、中子甚至原子、分子，是否也具有波动性？这就是法国物理学家德布罗意在 1923 年为自己提出的研究课题。

德布罗意波

当时，德布罗意正在巴黎大学攻读理论物理博士学位。他勇敢地打破传统观念，把光的波粒二象性推广到了所有的物体。他于 1924 年在题为《关于量子理论的研究》的博士论文中明确提出：任何一个运动着的物体，都有一种波与之相伴随，其波长

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

式中 p 是物体的动量， h 是普朗克常量。人们把这种波称为物质波（matter wave），也叫德布罗意波。物质波波长 λ 叫做德布罗意波长。

案例分析

案例 一只质量为 450 g 的足球以 10 m/s 的速度在空中飞行；一个初速度为零的电子，通过电压为 100 V 的加速电场。试分别计算它们的德布罗意波长。

解答 物体的动量 $p = mv$ ，其德布罗意波长 $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ 。

足球的德布罗意波长

$$\lambda_1 = \frac{h}{m_1 v_1} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{450 \times 10^{-3} \times 10} \text{ m} = 1.47 \times 10^{-34} \text{ m}$$

电子经电场加速后，速度增加为 v_2 ，根据动能定理

$$\frac{1}{2} m_2 v_2^2 = eU$$

$$p_2 = m_2 v_2 = \sqrt{2m_2 eU}$$

该电子的德布罗意波长

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= \frac{h}{p_2} = \frac{h}{\sqrt{2m_2 eU}} \\ &= \frac{6.63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 100}} \text{ m} = 1.2 \times 10^{-10} \text{ m} \end{aligned}$$



德布罗意 (L. de Broglie, 1892—1987)，法国物理学家。在其博士论文中提出物质波理论，1929 年获得诺贝尔物理学奖。

爱因斯坦曾经说过：“只有理论才能决定我们可以观察到什么。”

我们知道，为了观察到可见光的明显的单缝衍射图样，要求缝宽不能比光的波长大得太多，实验中所用单缝的缝宽数量级是 10^{-4} m。若要探测到足球的波动性，所用狭缝宽度的数量级要达到 10^{-33} m，目前我们尚无能为力。

微观粒子的质量和动量都很小，其德布罗意波长比足球等宏观物体要长得多。上述案例中电子的德布罗意波长的数量级为 10^{-10} m，与晶体中晶格大小的数量级相当，把电子束照射到晶体上，就有可能观察到电子的波动性。早在 1923 年，德布罗意就预言：“从很小的孔穿过的电子束能够呈现衍射现象，这或许就是人们能借以寻找关于我们想法的实验证据的方向。”

请思考并讨论：德布罗意用来证实电子波动性的设想可行吗？

电子衍射实验

1925 年 4 月的一天，美国物理学家戴维孙（C. Davisson）和他的合作者革末（L. Germer）在真空条件下用镍作为靶子研究电子的散射，结果发生了事故，镍靶被进入的空气严重氧化。他们经过长时间对镍靶加热、清理后，再重新实验，发现电子被散射后出现了类似光的衍射图样。这是由于镍靶经过加热后，从多晶体变成了单晶体，这对电子而言，成了很好的衍射光栅。但他们并不知晓这一现象的本质就是电子衍射。1926 年夏，戴维孙在听取了德国物理学家玻恩（M. Born）的说明后，才认识到自己工作的意义。于是他们又重做实验，并于 1927 年公布实验结果，证实了德布罗意理论。

就在 1927 年，英国物理学家 G. P. 汤姆孙（G. P. Thomson）也完成了电子衍射实验。他是在德布罗意理论的启发下进行实验的，并采用了更为简单、明确的方法，即利用高能电子通过金属薄层做透射实验，很快就观察到了衍射环（图 6-4-2），并计算出相应的波长，从而令人信服地证明了德布罗意理论。戴维孙和 G. P. 汤姆孙因此分享了 1937 年的诺贝尔物理学奖。

物质波是一种概率波

物质波是概率波。如图 6-4-1 所示，电子落在“亮环”上的概率大，落在“暗环”上的概率小。

原子中电子的运动并没有确定的轨道，而是可以出现在原子内的整个核外空间，只是在不同的地方出现的概率不同。如果用疏密不同的点表示电子在各处出现的概率，画出图来，就

有趣的是 G. P. 汤姆孙为 J. J. 汤姆孙之子，父亲对阴极射线的实验研究表明电子是粒子，儿子的电子衍射实验表明电子也是波。

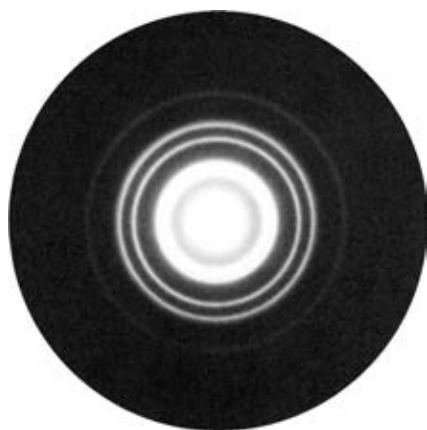


图 6-4-1 电子通过金箔的衍射图样

像云雾一样（图 6-4-2），因此人们把它叫做电子云（electron cloud）。对于氢原子，计算表明，玻尔理论中的电子轨道正是电子出现概率最大的地方。

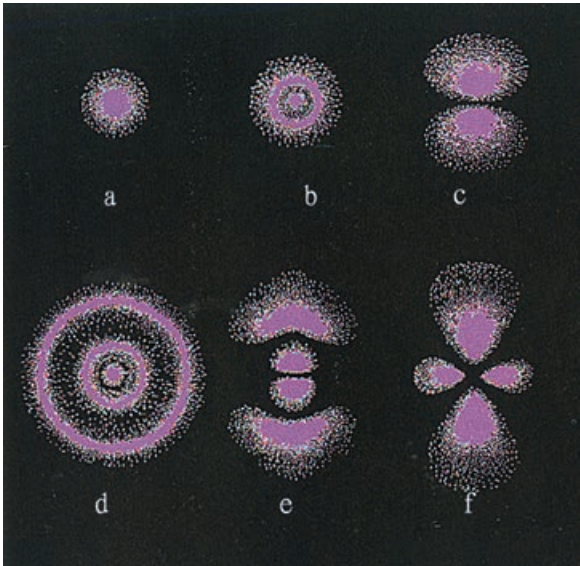


图 6-4-2 氢原子在各种定态时的电子云示意图

电子绝不是具有波动性的唯一粒子，物理学家还观察到了来自核反应堆的中子，甚至氢、氮等原子的衍射图样（图 6-4-3）。德布罗意理论是物理学史上又一次伟大的综合，它揭示了物质世界的普遍属性，启示人们在对电子这类微观粒子进行研究时，不能再局限在经典物理学的框架内，从而为量子力学的建立奠定了坚实的基础。

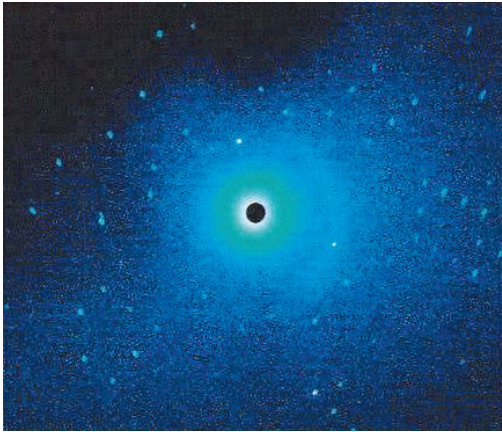


图 6-4-3 中子的衍射图样

1925 年德国物理学家海森堡建立了矩阵力学。
1926 年，奥地利物理学家薛定谔接受并发展了德布罗意的思想，建立了波动力学。不久，薛定谔证明了矩阵力学和波动力学在数学上是等价的，后来人们将这两种理论通称为量子力学。



海森堡（W. Heisenberg, 1901—1976），德国物理学家。创立了矩阵力学，提出不确定关系，荣获 1932 年的诺贝尔物理学奖。



薛定谔（E. Schrödinger, 1887—1961），奥地利物理学家。因发现原子理论的新的有效形式，与英国物理学家狄拉克（P. A. M. Dirac）分享了 1933 年的诺贝尔物理学奖。

信息浏览

原子，请你排好队！

借助光学显微镜，人们可以观察到细胞、细菌和其他微生物，其分辨本领可达 $2 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 。尽管从技术上来说，提高光学显微镜的放大倍数并不困难，但不管放大倍数有多大，比 $2 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 还小的物体，如大多数病毒，在光学显微镜下都不能被看清楚。

要提高显微镜的分辨本领，必须改用波长比可见光短得多的射线。电子的德布罗意波长很短，因此用电子束代替光束成为上佳选择。1931 年德国物理学家鲁斯卡 (E. Ruska) 发明了世界上第一台电子显微镜。

1982 年，美国 IBM 公司的物理学家宾尼希和他的老师罗雷尔发明了世界上第一台扫描隧穿显微镜，它应用了电子的量子隧穿效应，能直接观

测到单个原子的立体形貌。利用 STM，人类还实现了直接操纵和排布原子的奇迹 (图 6-4-4)。

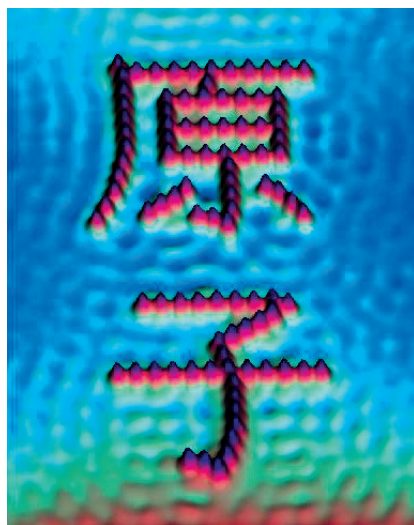


图 6-4-4 用扫描隧穿显微镜把碳原子排布在铜表面上的“原子”两字

家庭作业与活动

1. 世界上运动速度最快的球是羽毛球，你相信吗？根据测算，羽毛球离拍时的最大速度可达到 288 km/h ，羽毛球的质量为 5.0 g ，试求其德布罗意波长。我们能观察到羽毛球的波动

性吗？

2. 一个细菌在培养皿中的移动速度为 $3.5 \mu\text{m/s}$ ，其德布罗意波长为 $1.9 \times 10^{-19} \text{ m}$ ，该细菌的质量多大？

第 6 章家庭作业与活动

A 组

1. 在演示光电效应的实验中，把某种金属板连在验电器上。第一次，用弧光灯直射金属板，验电器的箔片就张开一个角度。第二次，在弧光灯和金属板之间插入一块普通的玻璃板，再用弧光灯照射，验电器箔片不张开。由此可以判

定，使金属板产生光电效应的弧光中有()。

- A. 可见光成分
- B. 紫外光成分
- C. 红外光成分
- D. 无线电波成分

2. 关于光电效应，下列陈述中正确的是()。

- A. 金属电子的逸出功与入射光的频率成正比
 B. 光电流的大小与入射光的强度无关
 C. 对于同种金属, 用不可见光照射一定比用可见光照射产生的光电子的动能要大
 D. 对于任何一种金属都存在一个“最大波长”, 入射光的波长必须小于这个波长, 才能产生光电效应
3. 已知铁的逸出功是 4.7 eV , 试求:
 (1) 铁的光电效应截止频率;
 (2) 用波长为 150 nm 的光照在铁表面上时发出的光电子的最大动能。
4. 在光的双缝干涉实验中, 光子撞击屏幕的位置可以预言吗?
5. 如果你拍一张照片时用的快门速度是如此之快, 使得只有 20 个光子进入镜头, 那么你在照片上会看到什么?
6. 求以 $0.1c$ 的速度打在电视机荧屏上的电子的德布罗意波长 (c 为真空中的光速)。

B 组

1. 在演示光电效应的实验中, 某金属被光照射后产生了光电效应现象, 实验测出了光电子的最大动能 E_{km} 与入射光频率 ν 的关系, 如图 6-B-1 所示。由 $E_{\text{km}} - \nu$ 图像可求出 ()。
- A. 该金属的逸出功
 B. 该金属的截止频率
 C. 单位时间内逸出的光电子数

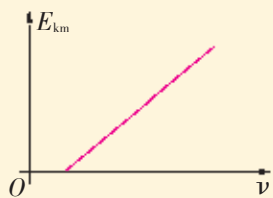


图 6-B-1

D. 普朗克常量

2. 某同学用两种不同的金属做光电效应实验。实验中他逐渐增大入射光的频率, 并测出光电子的最大动能。图 6-B-2 中哪一幅图像表达了他的实验结果? 为什么?

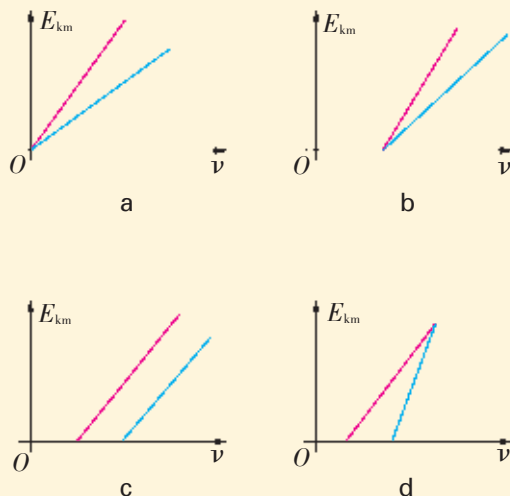
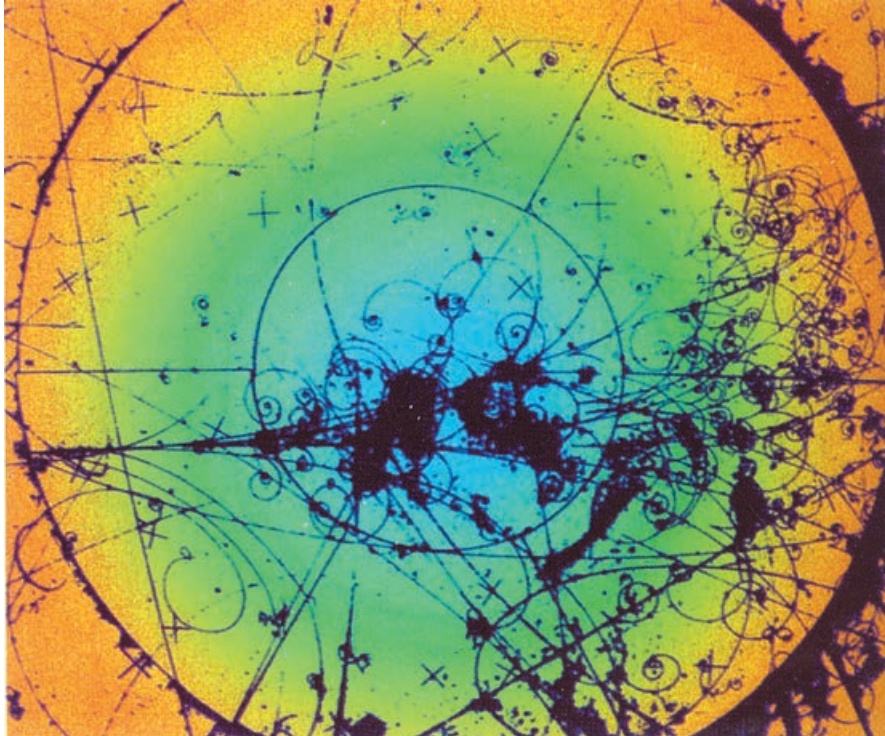


图 6-B-2

3. 物理学家做了个有趣的实验, 在双缝干涉实验中, 在光屏处放上照相底片, 若减弱光强的多少, 使光子只能一个一个地通过狭缝。实验结果表明, 如果曝光时间不太长, 底片上只能出现一些不规则的点子; 如果曝光时间足够长, 底片上就会出现规则的干涉条纹。请你对这个实验结果, 从以下几方面作分析。
- (1) 曝光时间不长时, 在底片上只能出现不规则的点子, 是因为能量太小, 底片上的条纹看不清楚?
- (2) 单个光子的运动有确定的轨道么?
- (3) 干涉条纹中出现亮条纹是何原因?
- (4) 无论是单个光子还是大量光子, 其行为都表现出波动性吗?



第 7 章 原子核与核能

20 世纪初，科学家结合严密的理论研究，利用强有力的实验手段，对原子核结构进行深入探索，不但发现了构成原子核的更小的微粒，还发现了原子核中蕴藏的巨大能量。那么：

原子核是由什么组成的？

组成原子核的质子与中子还能再分吗？

原子核的变化有规律吗？

神秘的核能是从何而来的？核能安全吗？

浩瀚宇宙中恒星的演化跟这些微观粒子之间有什么样的联系？

在本章中，我们将循着物理学家的足迹，了解原子核的组成和核力的性质，讨论核反应中的质量数守恒和电荷守恒问题。学习放射性和原子核衰变规律，知道射线的危害与防护。关注核技术应用对人类生活和社会可持续发展的影响。了解华人科学家在粒子物理领域中的杰出贡献。

7.1 原子核结构探秘

我们已经知道原子是由原子核和核外电子组成的，那么，原子核的里面是什么呢？它是怎样构成的？

质子的发现

从1917年起，卢瑟福就开始进行 α 射线轰击氮原子核的实验，他的实验装置及示意图如图7-1-1和图7-1-2所示。在罐中充入氮气，尽管放射源与荧光屏的距离超过 α 粒子的射程很多，仍能观察到屏上有明亮的辉光；但罐中充入氧气后，却观察不到任何闪光。至1919年，卢瑟福经过3年的反复研究，终于明白：氮原子核在 α 粒子的轰击下发生了核反应，释放出了氢核，辉光是氢核引起的。

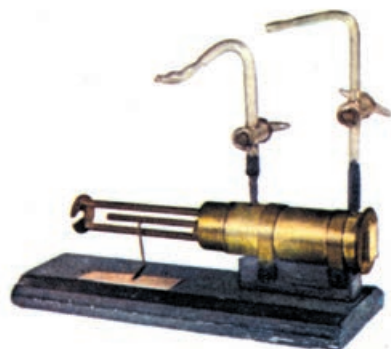


图 7-1-1 卢瑟福用 α 射线轰击氮核的实验装置

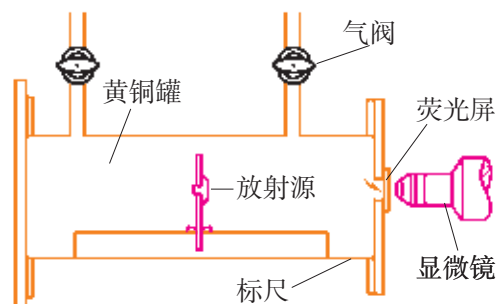


图 7-1-2 第一次实现人工核反应的实验装置示意图

这个实验是历史上第一次人工核反应。实验表明，可以用人工的方法改变原子核，把一种元素变成另一种元素。继卢瑟福的发现后，人们对多种物质进行了类似的实验，发现硼、氟、钠、铝、磷等原子核在受到 α 粒子轰击后，也会发射出氢核。于是，人们借用“原始”（prot）之义把氢核叫做质子（proton），并认为质子是原子核的组成部分。

质子用 p 表示，质子带正电荷，电荷量与一个电子的电荷量相等，质子的质量是

$$m_p = 1.672\,623\,1 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

中子的发现

1920年，人们用质谱仪发现：在忽略电子质量的情况下，原子质量都是氢原子质量的整数倍，也就是说，原子核的质量是质子质量的整数倍。于是，人们认为原子核是由质子组成的。



查德威克 (J. Chadwick, 1891—1974), 英国物理学家。因发现中子获得 1935 年的诺贝尔物理学奖。

但是困惑马上就出现了, 如果原子核是由质子组成的, 原子核的电荷数就应该与质量数基本相等, 然而大量事实表明, 多数原子核的电荷数只是质量数的一半或者还少一些, 怎么解释这个现象呢? 同年, 卢瑟福在一次演讲中, 提出了一个大胆的猜想: 原子核内除了质子外, 还存在一种质量与质子的质量大体相等但不带电的粒子。卢瑟福认为这种不带电的中性粒子是由电子进入质子后形成的。在这之后, 许多科学家开始用实验来探索这种不带电的中性粒子。

1932 年, 查德威克用如图 7-1-3 所示的装置验证了他的老

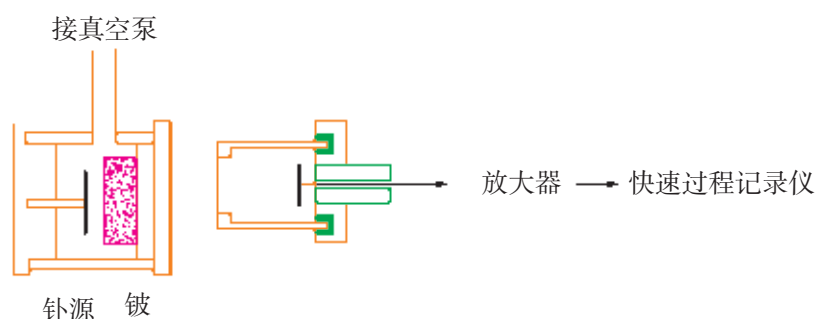


图 7-1-3 查德威克发现中子的装置示意图

信息浏览

大海捞针——40多万条与8条

卢瑟福实验中发现的质子, 是 α 粒子从氮核中打出的, 还是 α 粒子打进氮核后形成的复核放出的? 为了进一步弄清这个问题, 1925 年, 英国物理学家布莱克特 (P. M. S. Blackett) 又在充氮的云室里做了这个实验。

实验设想是: 如果质子是 α 粒子直接从氮核中打出的, 那么在云室里就会看到 4 条径迹: 入射 α 粒子的径迹、碰撞后 α 粒子的径迹、质子 p 的径迹、抛出质子后的核的反冲径迹 (图 7-1-4 a); 如果是 α 粒子打进氮核后形成的复

核放出的, 那么在云室里就只能看到 3 条径迹: 入射 α 粒子的径迹、质子 p 的径迹、核的反冲径迹 (图 7-1-4 b)。

实验中, 布莱克特拍摄了 2 万多张云室照片, 终于从照片上的 40 多万条 α 粒子径迹中, 发现有 8 条产生了分叉 (图 7-1-5)。分叉的情况表明, 上述的第二种设想是正确的。从质量数守恒和电荷数守恒可以知道, 这个人工核反应产生的新核是质量数等于 17 的氧核。

在云室的照片中, 分叉后细而长的是质子的径迹, 短而粗的是反冲氧核的径迹。

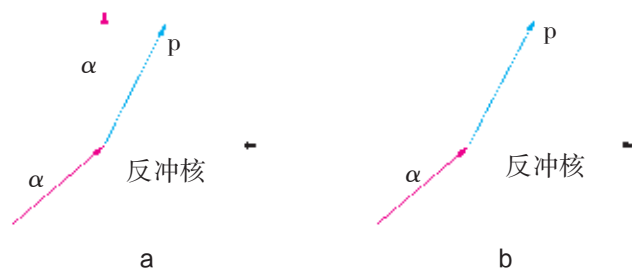


图 7-1-4 布莱克特实验的两种可能结果

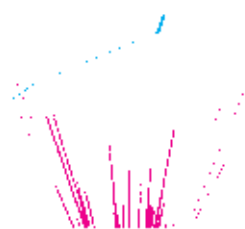


图 7-1-5 α 粒子打进氮原子核的示意图

师卢瑟福 12 年前的预言，原子核中确实存在着中性的、质量几乎与质子相同的粒子。查德威克把它叫做**中子**（neutron）。

在这之后，查德威克通过实验，发现从各种元素的原子核里都能打出中子来，可见中子也是原子核的组成部分。

中子用 n 表示，中子不带电，中子的质量是

$$m_n = 1.674\,928\,6 \times 10^{-27} \text{ kg}。$$

中子的发现是原子核物理学发展史上的一座里程碑。

请你查阅资料，谈一谈为什么这样评价中子的发现？

原子核的组成

在相继发现质子、中子的基础上，苏联物理学家伊万年科（Д. Д. Иваненко）和德国物理学家海森堡相继提出，原子核是由质子和中子组成的。

质子和中子统称为核子。质子带一个单位的正电荷，中子不带电。质子和中子的质量几乎相等，都等于一个质量单位，所以原子核的电荷数就等于它的质子数，原子核的质量数就等于它的质子数与中子数的和，即核子数。如原子序数（即核电荷数）为 Z 、质量数是 A 的原子的核 X ，有 Z 个质子和 N （ $N = A - Z$ ）个中子。原子核用符号表示为 ${}_Z^AX$ 。

例如， ${}_{82}^{207}\text{Pb}$ 表示原子序数是 82 的铅原子核，它的质量数是 207，它的核中有 82 个质子，有 125 个中子。

为了表述方便，人们将中子表示为 ${}_0^1n$ ，它的质量数是 1，电荷数是 0；电子表示为 ${}_{-1}^0e$ ，它的质量数是 0，电荷数是 -1。

具有相同质子数的原子，它们核外的电子数也相等，因而有相同的化学性质，属于同一元素。但它们的中子数可能不同，这些具有相同质子数和不同中子数的原子核，互称**同位素**（isotope）。

想一想：互为同位素的原子核，质量数是否相等？为什么？

核反应方程

在核反应中，参与反应的原子核内的核子（质子和中子）将重新排列或发生转化。用原子核的符号来表示核反应前后各原子核变化情况的式子称为核反应方程。核反应遵守质量守恒定律和电荷守恒定律，即核反应方程两边的质量数和电荷数均是守恒的。

案例 卢瑟福发现质子的人工核反应如图 7-1-7 所示：

在原子核物理中，把元电荷取作电荷的单位；把碳-12 原子质量的 $1/12$ 取作原子质量单位，用 u 表示， $1\,u = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。原子核的质量数通常非常接近整数，习惯上就用核子数表示原子核的质量数。

原子核的符号有时可以省去下标，如 ${}_{82}^{207}\text{Pb}$ 可简写为 ${}^{207}\text{Pb}$ ，还可以写成铅-207 或 Pb207。

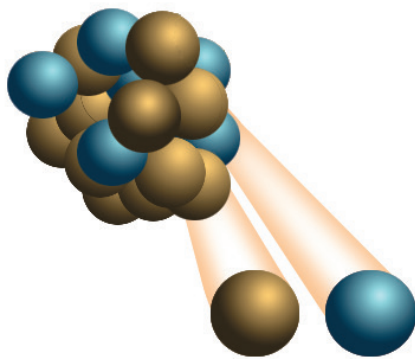
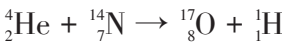


图 7-1-6 质子和中子组成原子核



图 7-1-7

用核反应方程可表示为



请你检查方程两边的质量数和电荷数是否守恒。

请分析：发现中子的实验是用 α 粒子轰击铍核 (${}^9_4\text{Be}$)，核反应的产物是中子和另一个原子核。那么，另一个原子核是什么元素的原子核？写出核反应方程。

家庭作业与活动

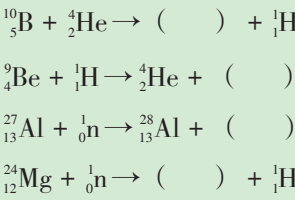
1. 请分别用符号表示质子、 α 粒子、氮原子核、氧原子核。

2. 有 J、K、L 三种原子核，已知 J、K 的核子数相同，K、L 的质子数相同，试完成下列表格。

3. 铀 -238 的核里有多少个质子？多少个中子？
铜 -63 的核里有多少个质子？多少个中子？

4. 完成下列核反应方程：

原子核	原子序数	质量数	质子数	中子数
J	9	18		
K	Z	A		
L	10	19		



7.2 原子核的衰变

我们已经知道，原子核在一定条件下是可以发生变化的，那么其中的变化规律是什么样的呢？

天然放射性的发现

1896 年，法国物理学家贝可勒尔在研究荧光物质和 X 射线之间关系时，准备把铀盐和一张用黑纸包得密不透光的照相底片一起放到太阳光下照射，不料一连几天都是阴雨，于是他只好把铀盐和照相底片一起锁进了抽屉。几天后，他惊奇地发现，放在抽屉里的底片竟然感光了。

经过反复探索，贝可勒尔发现只要照相底片放在铀盐附近，不管在多么黑暗的地方，底片上都会产生铀盐的阴影。贝可勒尔意识到，这个现象说明铀及其化合物放出了一种不同于 X 射线的新射线，这种射线可以穿透黑纸使照相底片感光。

物理学中把物质放出射线的性质叫做放射性。某些物质能自发地放出射线，我们称这些物质具有**天然放射性**（natural radioactivity）。后来，物理学家发现，天然放射性是某些元素的特有性质。原子序数大于 83 的所有天然存在的元素都具有放射性。原子序数小于 83 的元素，有的也有放射性。我们称具有放射性的元素为**放射性元素**（radioactive element）。

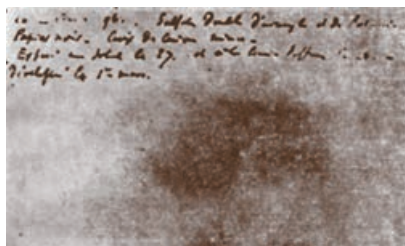


图 7-2-1 第一张由铀盐射线感光的照片

三种放射性射线

放射性元素每时每刻都在放出射线，这些看不见的射线到底是什么呢？

科学家们经过努力，发现各种放射性元素所放出的射线有三种：一种射线带正电，能在磁场作用下发生偏转，偏转角度较小，叫做 α 射线；另一种射线带负电，在磁场作用下与 α 射线“分道扬镳”，朝另一个方向偏转，偏转角度较大，叫做 β 射线；还有一种射线不带电，在磁场中不偏转，叫做 γ 射线（图 7-2-2）。

实验证明，这些射线是从原子核内发射出来的。 α 射线是 α 粒子流， α 粒子就是氦原子核，电荷数为 2，质量数为 4； β 射线是高速运动的电子流； γ 射线是波长很短的电磁波。

令人惊讶的是，这三种射线都有“穿墙破壁”的本领。

α 粒子射出时的速度大约是光速的十分之一，穿透物质

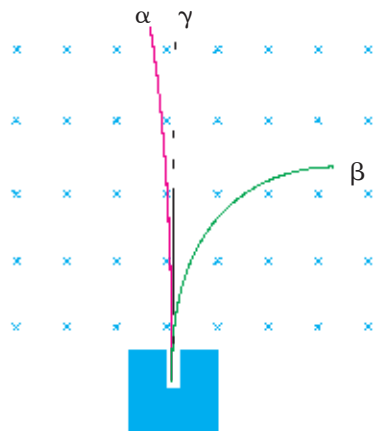


图 7-2-2 三种放射性射线

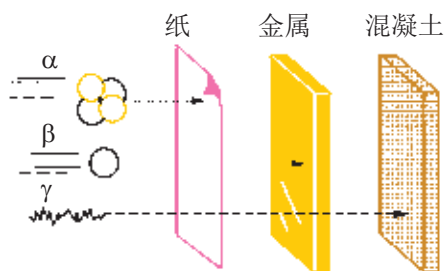


图 7-2-3 α、β、γ 射线穿透本领示意图

放射性的研究已经深深地修改了古老的原子观念，并且为几乎 30 种新型物质带来光明……同时，它已经给我们提供了一个很直接的方法，显示出作为物质结构中一个确实的物理和化学单位而单个存在的原子的有力方法。

——卢瑟福

的本领很小。能量为 2 MeV 的 α 粒子，在空气中只能飞行 1.7 cm，一张薄锡箔或一张纸就能把它挡住。但它有很强的电离作用，很容易使空气电离，使照相底片感光。

β 射线的速度接近光速，对物质的穿透本领比 α 射线约强 100 倍。能量为 0.5 MeV 的 β 粒子，可以穿透 1.6 m 的空气层，甚至穿透几毫米厚的铝板，但它的电离作用比较弱。

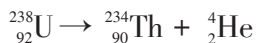
γ 射线的穿透本领比 β 射线更强。能量为 1 MeV 的 γ 射线，在空气中经过 100 m 的路程时，强度才减弱一半。它甚至能穿透几厘米厚的铅板，但它的电离作用很小。

放射性元素的衰变

原子核放出一个 α 粒子或 β 粒子后，就变成了新的原子核。原子核由于放出某种粒子而转变成新核的变化，叫做原子核的衰变（decay）。

那么，原子核衰变有什么规律呢？

在核的衰变中电荷数和质量数都是守恒的。 $^{238}_{92}\text{U}$ 核的衰变可用下面的方程来表示：



这种放出 α 粒子的衰变叫做 α 衰变。它的规律是：新核的质量数比原来核的质量数减少 4，电荷数减少 2，因此新核在元素周期表中的位置要向前移两位。

$^{238}_{92}\text{U}$ 衰变后产生的新核 $^{234}_{90}\text{Th}$ （钍）也具有放射性，它能放出一个 β 粒子而变成 $^{234}_{91}\text{Pa}$ （镤）。由于 β 粒子就是电子，电子的质量比核的质量小得多，可以认为它的质量数为零，因此一个原子核放出一个 β 粒子后，质量数不变。放出 β 粒子的衰变叫做 β 衰变。

请你仿照 $^{238}_{92}\text{U}$ 的衰变方程，写出 $^{234}_{90}\text{Th}$ 的衰变方程。

想一想：发生 β 衰变时，新核的电荷数变化多少？新核在元素周期表中的位置怎样变化？

放射性元素的原子核在发生 α 衰变或 β 衰变时，产生的新核往往处于激发状态，这时它要向低能量状态跃迁，辐射出光子，产生 γ 射线。原子核放出 γ 射线后不会变成其他核。

放射性元素的半衰期

放射性元素的衰变随时间变化的规律是怎样的呢？它的寿

命有多长呢?

对于单个原子核而言,它发生衰变的时刻是不确定的。但实验发现,大量的放射性物质中发生放射性核衰变的量的变化却是有规律的。例如,1 g 铋-210,由于 β 衰变,经过 5 d(天),就会有一半变成钋-210;再经过 5 d,剩下的 0.5 g 铋-210 又会有一半衰变成钋-210。这就是说,放射性元素每经过一段时间,就有一半的核发生衰变,这段时间叫做放射性元素的**半衰期**(half life)。半衰期反映的是大量原子核的平均衰变快慢。例如,一块矿石中的某些铀-238 核可能立即发生衰变,而它们旁边的另一些核却可以平静地度过几十亿年仍不发生衰变,但每经过一个半衰期,将有一半的铀-238 核发生衰变。

每一种放射性元素都有一定的半衰期,不同的放射性元素有不同的半衰期,而且不同元素的半衰期可以相差很大。例如,铀-238 的半衰期是 4.5×10^9 a(年),氡-222 的半衰期是 3.8 d,而钋-214 的半衰期只有 1.64×10^{-4} s。

放射性元素的半衰期是由其原子核本身决定的。一种放射性元素,不论它是以单质的形式存在,还是和其他元素形成化合物,也不论所处环境如何,它的半衰期都不会改变。

案例分析

案例 1 图 7-2-4 反映了放射性原子核衰变过程中,剩余原子核数 n 和衰变时间 t 的关系。

分析 可以看出,经过第一个半衰期 T ,未衰变核数是 $\frac{n}{2}$,有 $\frac{n}{2}$ 的核发生了衰变。

看图并回答:

1. 经过前两个半衰期(共经历 $2T$ 时间),发生衰变的原子核数是不是 n ?

2. 第二个半衰期中发生衰变的原子核数是多少?未发生衰变的原子核数是多少?

案例 2 图 7-2-5 表示了氡-222 的衰变规律。 m_0 为衰变前氡-222 的质量, m 为 t 时刻氡-222 的质量。

请讨论:

1. 图 7-2-5 的纵坐标表示什么?

2. 图 7-2-4 中的 n 和图 7-2-5 中的 m 有什么不同?两者有什么关系?

3. 氡-222 的半衰期是多少?经过 7.6 d 和 11.4 d,分别有多少氡-222 发生了衰变?

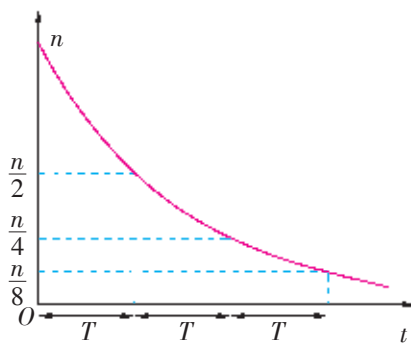


图 7-2-4 放射性原子核衰变规律

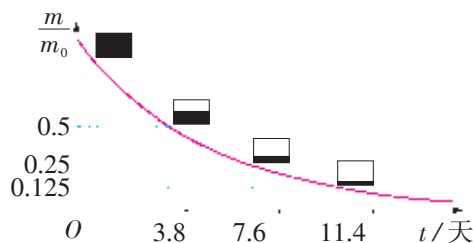


图 7-2-5 氡-222 的衰变规律

部分放射性元素的半衰期

原子核	半衰期
$^{14}_6\text{C}$	5 730 a
$^{24}_{11}\text{Na}$	15 h
$^{60}_{27}\text{Co}$	5.27 a
$^{131}_{53}\text{I}$	8.04 d

信息浏览

大自然的“时钟”——碳-14

一座古墓被发掘出来了，科学家们从其中的一块木片就可以大致推断这座古墓是在多少年前建造的。你想知道其中的原因吗？

原来，在地球的大气中含有一定比例的碳-14，碳-14具有放射性。活的动植物从空气中吸收的碳中，既有不带放射性的碳-12，也有一定比例的碳-14。动植物死后，不能再吸收空气中的碳-14，于是动植物体中的碳-14通过衰变而逐渐减少。

碳-14的半衰期是5 730 a。图7-2-6为碳-14测年法示意图。现在利用先进的加速器质谱计，让碳-14离子在加速器中获得较高能量后，进入

粒子探测器，通过直接测量被鉴定样品中碳-14的原子数来断定文物样品的年代。这种方法可使考古年代推至数十万年前，误差仅为数十年，测量精度非常高。

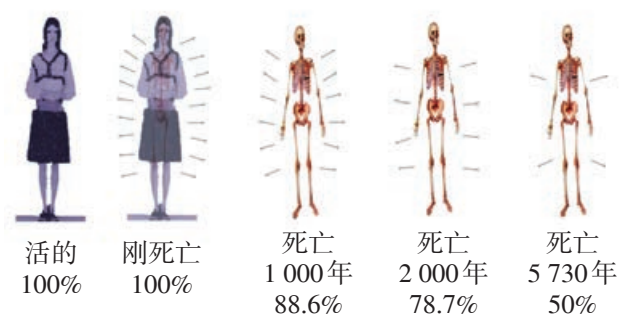
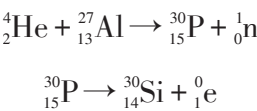


图 7-2-6 碳-14 测年法示意图
古生物遗骸中所含的碳-14 经半衰期 5 730 a 减为一半。

人工放射性元素的发现

正电子是美国物理学家安德森 (C. Anderson) 在 1932 年发现的，它的质量跟电子的相同，电量也相同，但符号相反，是正电荷，通常用 ^0_1e 表示。

1934 年，约里奥-居里夫妇在用 α 粒子轰击铝箔时，除探测到了预料中的中子，还意外地探测到了正电子。他们把 α 放射源拿走后，仍能测到正电子。物质放射正电子也随时间衰减，有一定的半衰期。原来，铝箔经 α 粒子轰击后，产生了一种具有放射性的新元素，是这种新元素在不断地放射出正电子。核反应过程可表示为：



$^{30}_{15}\text{P}$ 与天然磷比较，具有相同的质子数，但中子数不同，它们互为同位素。 $^{30}_{15}\text{P}$ 有放射性，衰变时放出正电子，同时还放出一个电子中微子。具有放射性的同位素（如 $^{30}_{15}\text{P}$ ）称为放射性同

位素。

居里夫妇的这一重大发现，为发现更多的放射性元素开辟了全新的途径，开拓了放射性研究中的一个崭新领域。

探测射线的方法

放射性射线用肉眼是看不见的，那么怎样对它们进行探测呢？人们根据射线的性能和所产生的效应，设计制造了专门的仪器来进行探测。下面介绍几种常用的探测仪器和探测方法。

计数器

计数器的主要部分是计数管，其结构如图 7-2-7 所示。它是一支玻璃管，里面的一个铜圆筒（或在管壁上涂有一层导电薄膜）是阴极，穿过圆筒轴心的钨丝是阳极。管内充有低压惰性气体，工作时在两极间加上的电压通常略低于管内气体的击穿电压。

一个带电粒子或一个 γ 粒子（光子）射进管内，会使管内气体发生电离。电离产生的电子和正离子在强电场作用下分别向阳极和阴极加速运动，跟管内的气体分子发生碰撞，产生新的电子和正离子。这个过程在极短时间内会发生很多次，于是产生大量电子，使计数管电路中出现一个相当强的脉冲电流。

这个电流经放大器放大，由计数器记下，表明有一个粒子进入了计数管。高级计数器每秒能计数 1 万次以上。

云室

计数器只能记录粒子进入计数管的次数，而利用云室就可以显现出粒子的径迹。

云室的主要结构如图 7-2-8 所示。圆筒形容器的下底是一个可在小范围活动的活塞，上盖是透明的，通过它可以观察室内发生的现象或进行照相。放射源可放在室内侧壁附近，也可放在室外侧壁的窗口处。

实验时，在云室内加一些酒精，使室内充满饱和汽。然后使活塞迅速向下移动一段距离，室内气体由于突然膨胀而温度降低，使酒精的饱和汽处于过饱和状态。这时如果有能量较高的粒子从室内气体中飞过，就会使沿途的气体分子电离产生离子，过饱和汽便以这些离子为核心凝结成一条雾迹。

各种粒子的电离本领不同，因此它们在云室中的径迹也不同。

请思考：为什么云室中 α 粒子径迹粗而直， β 粒子径迹细而弯， γ 粒子径迹细而碎？

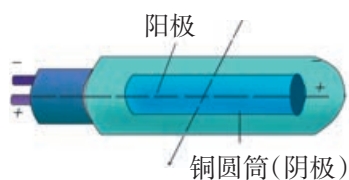


图 7-2-7 计数器结构示意图

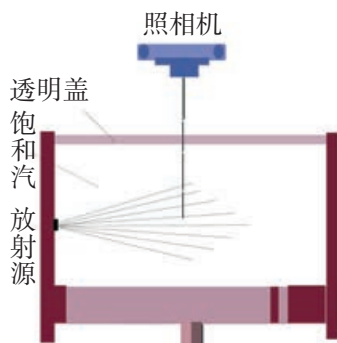


图 7-2-8 云室结构示意图

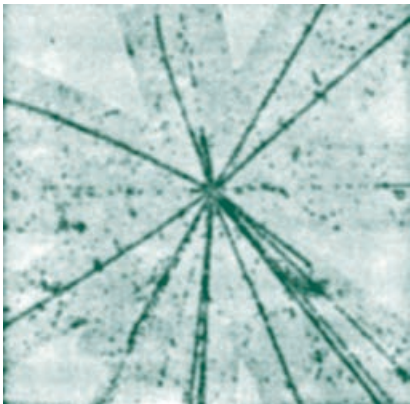


图 7-2-9 粒子在乳胶中分裂的径迹

乳胶照相

利用高速运动的带电粒子能使照相底片感光的特性，可以直接用照相胶片来得到粒子的径迹。

高速粒子通过胶片时，会使胶片乳胶层中的溴化银晶粒电离形成潜像。经显影和定影，便可显示出粒子的径迹。乳胶照相的优点是可以连续记录，并可得到完整的径迹，便于判断粒子的性质和行为。图 7-2-9 是粒子在乳胶中分裂的径迹。

放射性射线的应用及其防护

天然放射性同位素只有几十种。1934 年后，人们用质子、氘核、中子和 γ 射线来轰击各种原子核，得到了多种放射性同位素。现在，人们利用原子反应堆和加速器生产的放射性同位素已达 2 000 多种。射线有益也有害，我们要扬其长，避其短，合理应用射线。

射线的应用

射线源 放射性同位素在工农业生产、医疗卫生和科学研究各个方面已有广泛应用。

由于透过物体的射线的强度跟物体的密度和厚度有关，因此可以用射线来检查产品的厚度、零件内部有无砂眼或裂缝、密封容器中液面的高度等。这种检查可自动进行，并可根据检查的结果控制生产过程或发出必要的报警信号。

利用射线的生物效应，可以消灭害虫，杀菌消毒，治疗癌症，保藏肉类、水产、谷物和水果，抑制马铃薯发芽，改良种子等。

利用射线的化学效应，可以促进高分子化合物的聚合反应，以制造各种塑料或改善塑料的性能。此外，还可以利用射线使石油裂解，增加汽油的产量。

示踪原子 我们知道，一种元素的各种同位素具有相同的化学性质，因此用放射性同位素制成的化合物，在经历各种过程时会不断地放出射线。由此可以掌握它的踪迹，研究它所经历的变化。作这种用途的放射性同位素通常叫做示踪原子。

例如，在内燃机的活塞上装有放射性同位素铁-59 的活塞环，通过测量润滑油中的放射性就可以弄清楚活塞跟汽缸壁的磨损情况，不必拆开内燃机去检查。

农田施肥时，在肥料中加一些放射性同位素，就会知道哪种农作物在什么季节最能吸收含有哪种元素的肥料。

在医学上，利用放射性同位素可以了解病人的血液循环情况和食物消化情况，以及诊断某些疾病的病变情况。

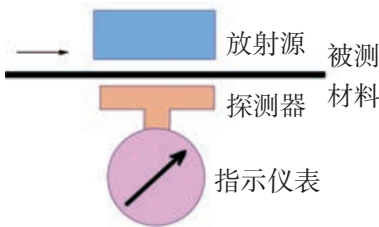


图 7-2-10 用射线监测产品厚度的示意图

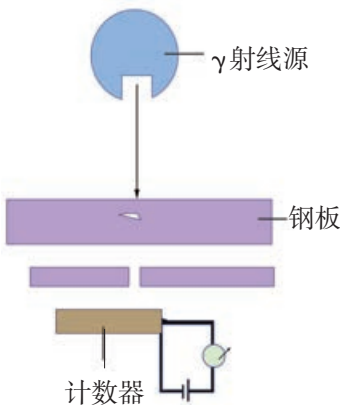


图 7-2-11 无损探伤的示意图

放射性污染及其防护

随着核工业的出现和发展，人们越来越多地利用核能和放射性同位素。但放射性对人体有危害，而且会污染环境，因此我们应懂得如何防护。

人类一直就生活在自然辐射的环境中。我们周围的空气、水和各种食物,都有一定的放射性。人体中也有一些放射性物质，如钾 -40 和碳 -14 等。它们在体内也会放出射线，对人体产生内辐射。通常这种自然条件下的内外辐射都很弱，没有发现对人体的健康有什么影响。

但是，过强的辐射，无论哪种射线（包括电磁辐射），都会对生物体造成危害。科学的发展已使我们掌握了安全生产和使用放射性物质的方法。在使用放射性物质时必须严格遵守操作规程，不准用手接触；即使是废弃不用的放射性物质也不能随便丢弃，应交有关部门处理，或者在指定地点深埋于地下，并要远离水源。特别要注意防止放射性物质对空气、水源和食品的污染。

家庭作业与活动

1. 请填写下表，以总结比较与区分 α 射线、β 射线、γ 射线的性质。

2. 镭 -226 发生 4 次 α 衰变和 4 次 β 衰变，变成什么？

3. 已知铋 -210 的半衰期是 5 d， 1 g 铋 -210 经 20 d 后还剩下多少？
4. 下面是四种元素的同位素的原子核：

$^{118}_{50}\text{X}$ ， ^3_2X ， $^{50}_{22}\text{X}$ ， $^{197}_{79}\text{X}$

请将 X 改为具体的元素符号，并说明每个原子核中的中子数。

5. 为什么说射线是把双刃剑？请查阅资料加以说明。

射线名称	本质	符号	速度	穿透能力	电离本领
α 射线					
β 射线					
γ 射线					

课题研究

调查住房装饰材料的放射性

查找有关装饰材料在放射性方面的标准；

了解如何检测装饰好的住房中的放射性；讨论如何减少装饰住房带来的放射性污染。

7.3 原子核的结合能

20 世纪初，爱因斯坦质能方程的提出，使一些科学家敏锐地认识到，核反应伴随着巨大的能量。一个小小的原子核，居然是一个能量宝库。那么，原子核的能量来自何方？

强大的核力

我们知道，原子核很小，结构却十分复杂，除氢核外，其他各种元素的原子核中既有带正电的质子，又有不带电的中子。如铀-235 的核内有 92 个质子，143 个中子。因此，人们不禁要问：

质子间的静电斥力为什么没有把它们驱散开来？

中子不带电，又是靠什么力聚集在一起？

这么多的核子（质子和中子）挤在半径小于 10^{-14}m 的核内，为什么能形成稳定的结构呢？

科学研究发现，组成原子核的核子之间存在着一种特殊的力，这种力叫做**核力**（nuclear force）。

核力是目前已知的各种力中最强的力，它存在于质子与质子间、质子与中子间、中子与中子间。因此，在研究核的稳定性等问题时，核力起着决定性的作用。

科学研究表明，正是核子间存在着这么强大的核力，才使小小的原子核蕴藏着巨大的能量。

结合能

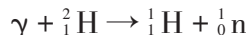
研究氢原子的能级时已经知道，由于原子核跟核外电子间存在着静电力的作用，要把一个氢原子的核外电子从基态移到无穷远处（也就是使一个处于基态的氢原子电离），必须克服库仑力做功，这需要吸收 13.6 eV 的能量。从对称性的角度思考，使相距无穷远的一个电子和一个质子结合成一个处于基态的氢原子时，由于静电力做功，会放出 13.6 eV 的能量。

同样道理，由于核子间强大的核力，要把原子核拆散成核子，必须克服核力做巨大的功，即需要提供巨大的能量。反过来，核子结合成原子核时，由于核力做功，会放出同样多的能量。

在物理学上，把核子结合成原子核时放出的能量，或原子核分解成核子时吸收的能量，都叫做原子核的结合能。

研究表明，用光照射氘核（ ${}^2_1\text{H}$ ），只有当光子的能量等于

或大于 2.2 MeV 时,才能使它分解为质子和中子。核反应方程为



反过来,使一个质子和一个中子结合成氘核,就会放出 2.2 MeV 的能量。因此,氘核的结合能为 2.2 MeV。

结合能的计算

爱因斯坦的质能方程指出,物体的质量跟它的能量有一定的联系。如果物体质量增加(或减少)了 Δm , 物体的能量相应会增加(或减少) ΔE , 它们的关系是

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

实验发现,核子组成原子核时,仿佛会变“轻”一些,原子核的质量总是小于其全部核子的质量之和。我们把组成原子核的核子的总质量与原子核的质量之差,叫做核的**质量亏损**(mass defect)。核子组成原子核时所亏损的这部分质量,实际上体现为辐射能量的形式。

所以,只要知道了核反应中的质量变化,利用质能方程,就很容易算出所释放或吸收的能量。

思考与讨论

1. 有人说,质量亏损就是核子变少了;也有人说,质量亏损,意味着质量消失了。这两种说法对不对?为什么?

2. 有人认为,公式 $\Delta E = \Delta mc^2$ 中的 Δm , 既是原子核的质量亏损,也是原子的质量亏损。这种认识对不对?为什么?

案例分析

案例1 已知中子质量 $m_n = 1.674\,9 \times 10^{-27}$ kg, 质子质量 $m_p = 1.672\,6 \times 10^{-27}$ kg, 氘核质量 $m_D = 3.343\,6 \times 10^{-27}$ kg, 试计算一个中子和一个质子结合成氘核时释放的能量。

解答 中子和质子结合成氘核的核反应方程为



核反应中的质量亏损

$$\begin{aligned}\Delta m &= (m_n + m_p) - m_D \\ &= (1.674\,9 + 1.672\,6) \times 10^{-27} \text{ kg} - 3.343\,6 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ &= 0.003\,9 \times 10^{-27} \text{ kg}\end{aligned}$$

所以,释放的核能

$$\begin{aligned}\Delta E &= \Delta mc^2 = 0.003\,9 \times 10^{-27} \times (2.997\,9 \times 10^8)^2 \text{ J} \\ &= 3.5 \times 10^{-13} \text{ J}\end{aligned}$$

$$1\text{u} = 1.660\,6 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

直接用 u 作为质量单位时，
根据 $\Delta E = \Delta mc^2$ 可得出一个常用
的换算关系：

$$1\text{u} \text{ 相当于 } 931.5 \text{ MeV}。$$

$$= 2.2 \text{ MeV}$$

案例2 “原子质量单位”是原子物理中常用的一个特殊质量单位，符号为 u 。已知碳-12 原子的质量是 $12.000\,000 \text{ u}$ ，一个碳-12 原子可以看作是由 6 个氢原子（每个氢原子的质量是 $1.007\,825 \text{ u}$ ）和 6 个中子（每个中子的质量是 $1.008\,665 \text{ u}$ ）组成，求碳-12 原子核的结合能。

分析 在计算碳核的质量亏损时，因为与电子的质量有关的部分在相减过程中能消去，所以可以用碳原子的质量代替碳原子核的质量，用氢原子的质量代替质子的质量。

解答 中子的总质量 $6 m_n = 6 \times 1.008\,665 \text{ u} = 6.051\,990 \text{ u}$
 氢原子的总质量 $6 m_H = 6 \times 1.007\,825 \text{ u} = 6.046\,950 \text{ u}$
 中子和氢原子的质量和 $6 m_n + 6 m_H = 12.098\,940 \text{ u}$
 碳-12 原子的质量 $m_C = 12.000\,000 \text{ u}$
 质量亏损 $\Delta m = 0.098\,940 \text{ u} = 1.643 \times 10^{-28} \text{ kg}$
 碳-12 核的结合能

$$\Delta E = \Delta mc^2 = \frac{1.643 \times 10^{-28} \times (2.997\,9 \times 10^8)^2}{1.602\,2 \times 10^{-19}} \text{ eV} = 92.2 \text{ MeV}$$

通过这两个案例，请你归纳一下，如何利用公式 $\Delta E = \Delta mc^2$ 计算结合能？在计算中，如何合理地选用单位？

多学一点

平均结合能与核的稳定性

核子结合成原子核时每个核子平均放出的能量叫做平均结合能，它等于核的结合能跟核子数的比值。例如，氘核的平均结合能为 $\frac{2.2}{2} \text{ MeV} = 1.1 \text{ MeV}$ ；碳-12 核的平均结合能为 $\frac{92.2}{12} \text{ MeV} \approx 7.7 \text{ MeV}$ 。用同样的方法，可以求出其他原子核的平均结合能。平均结合能的大小能够反映原子核的稳定程度。平均结合能越大，原子核就越难拆开，表示该核越稳定。

图 7-3-1 反映了原子核的平均结合能随原子核的核子数变化的规律。由图像可以看出，核子数较小的轻核与核子数较大的重核，平均结合能都比较小。中等核子数的原子核，平均结合能较大，表示这些原子核较稳定。

当平均结合能较小的原子核转化成平均结合能较大的原子核时，就会释放核能。例如，一个核子数较大的重核分裂成两个核子数小一些的核，或者两个核子数很小的轻核结合成一个核子数大一些的核，都能释放出巨大的核能。

平均结合能启示人们，利用核能有两种可能的方式：一种是利用重核分裂，另一种是利用轻核聚合。

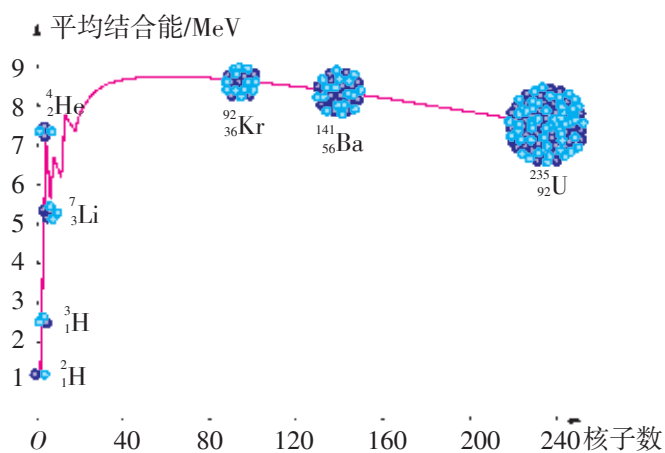


图 7-3-1 原子核的平均结合能曲线

家庭作业与活动

1. 兆电子伏 (MeV) 和原子质量单位 (u) 是核物理领域常用的两个单位, 请根据质能方程证明, 1 u 相当于 931.5 MeV 的能量。
2. 氦核由 2 个质子和 2 个中子组成。1 个质

子的质量是 1.007 277 u, 1 个中子的质量是 1.008 665 u, 氦核的质量是 4.001 509 u, 试求氦核的结合能。



费米 (E. Fermi, 1901—1954), 意大利物理学家。因利用中子辐射发现新的放射性元素, 及慢中子所引起的有关核反应, 获 1938 年诺贝尔物理学奖。第二次世界大战时逃离法西斯意大利, 来到美国, 领导设计和建造了世界上第一台可控核反应堆。为纪念费米, 元素周期表中的第 100 号元素命名为镱。

1946 年至 1948 年间, 我国物理学家钱三强、何泽慧夫妇在研究铀核裂变时, 经过上万次的观测, 首先发现三分裂和四分裂现象。钱三强从实验与理论两个方面对三分裂现象作了全面的论述。

三分裂现象比较罕见, 约为二分裂现象的千分之三; 四分裂现象就更少了。

7.4 裂变与聚变

既然原子核蕴藏着巨大的核能, 那么, 怎样才能使核能释放出来呢? 一个世纪以来对核能的研究与开发, 对当今世界产生了巨大的影响。

裂变及其应用

1942 年, 在意大利物理学家费米的主持下, 在美国芝加哥大学建成了世界上第一座核反应堆。人类从此开始了利用核能的新纪元。

铀核的裂变

重核裂变是在 20 世纪 30 年代末期用中子轰击铀核时发现的。如图 7-4-1 所示, 中子打进铀-235 核, 使该核变成处于激发状态的复核, 并分裂成质量差不多的两部分, 同时放出几个中子。重核分裂成质量较小的核叫做裂变。裂变时会释放核能。

铀核裂变的产物是多种多样的, 有时裂变为氙 (Xe) 和锶 (Sr), 有时裂变为钡 (Ba) 和氪 (Kr), 有时裂变为锑 (Sb) 和铌 (Nb)。产物不同, 所释放的能量和中子数也不尽相同。

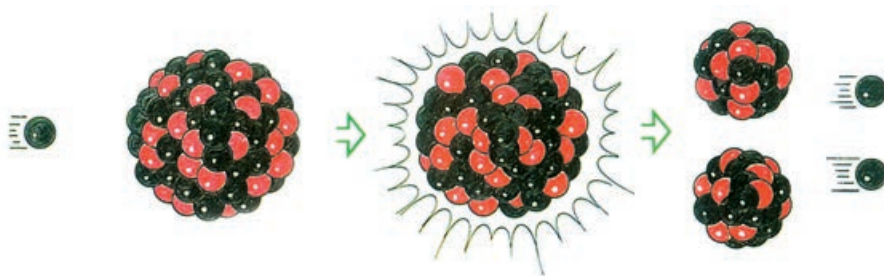


图 7-4-1 铀核裂变过程示意图

链式反应及其条件

如图 7-4-2 所示, 铀核裂变时, 通常会放出 2 到 3 个中子, 这些中子可以作为新的“炮弹”轰击其他的铀核, 使裂变反应不断地进行下去, 这种反应叫做链式反应 (chain reaction)。

研究发现, 核裂变所释放的中子, 并不是每个都能引起新的裂变。要想引起链式反应, 必须使每一次核裂变所释放的中子中至少有一个能引起新的核裂变, 也就是说, 中子的“再生率”要大于 1。因此, 要发生链式反应, 必须保证铀块有足够大的

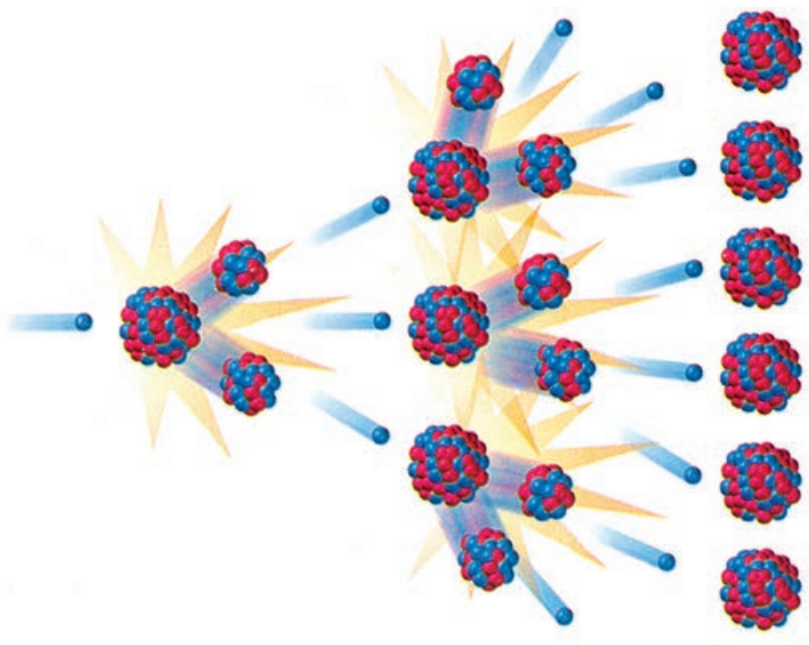


图 7-4-2 链式反应示意图

天然铀中主要有两种同位素：铀-235与铀-238。其中99.3%以上是铀-238，0.7%是铀-235。铀-235俘获各种能量的中子都会发生裂变，铀-238只有俘获能量大于1 MeV的中子才可能发生裂变，并且概率很小。因此，为了便于发生链式反应，需要选用铀-235。

体积。如铀块太小，铀核裂变放出的中子会逸出铀块，从而中断反应。能够使铀块发生链式反应的最小体积(或对应的最小质量)称为**临界体积**(或**临界质量**)。

当铀-235的体积超过其临界体积时，中子进入铀块，立即会引起链式反应，在短时间内释放出大量的核能，原子弹就是根据这个原理制成的。

裂变反应堆

裂变反应堆是核电站的心脏。它是一种用人工控制链式反应的装置，可以使核能较平缓地释放出来。

裂变反应堆的基本结构由裂变材料(核燃料)、慢化剂(减速剂)、控制棒、反射层、热交换器及防护层构成。

裂变反应堆的常见类型有重水堆、高温气冷堆、快中子增殖反应堆(又叫快堆)等。

核电站的工作模式是以核反应堆为能源，用核反应堆产生高压蒸汽，取代发电厂的锅炉，其余部分与火力发电厂基本相同。图7-4-3是秦山核电站的基本结构示意图。

案例分析

案例 用中子轰击铀核($^{235}_{92}\text{U}$)，其中的一个可能反应是分裂成钡($^{141}_{56}\text{Ba}$)和氪($^{92}_{36}\text{Kr}$)两部分，放出3个中子，试写出核反应方程，算出反应中释放的核能。

分析 根据反应前后核的核子数守恒、核电荷数守恒，就

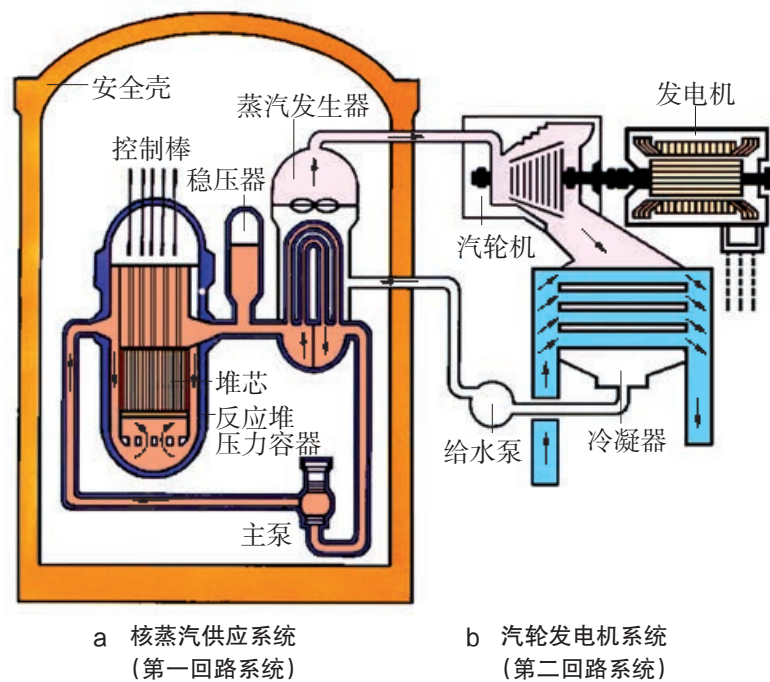


图 7-4-3 秦山核电站的基本结构示意图

可以写出核反应方程。

为了算出核能，查出各个核和中子的质量如下：

$$\begin{aligned} m_{\text{U}} &= 390.313\,9 \times 10^{-27} \text{ kg} & m_{\text{n}} &= 1.674\,9 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ m_{\text{Ba}} &= 234.001\,6 \times 10^{-27} \text{ kg} & m_{\text{Kr}} &= 152.604\,7 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{aligned}$$

根据核反应前后的质量亏损，用爱因斯坦的质能方程就可算出释放的核能。
请根据上述分析，完成本题的解答。

聚变与受控热核反应

聚变

轻核结合成质量较大的核叫做聚变。聚变时会释放核能。在核燃料消耗量相同的条件下，聚变比裂变释放的能量更多。
例如，一个氘核 (^2_1H) 和一个氚核 (^3_1H) 发生聚变时，产

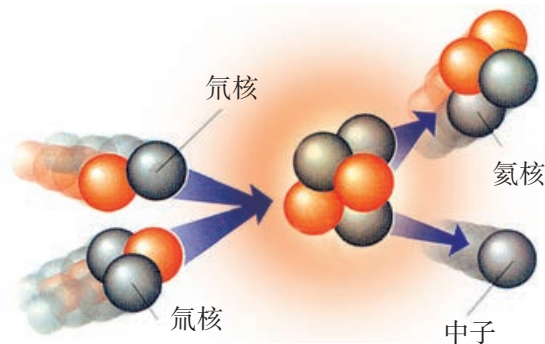


图 7-4-4 氘核与氚核聚变成氦核

生一个氦核 (${}^4_2\text{He}$)，同时放出一个中子和 17.6 MeV 的能量。平均每个核子释放的能量在 3 MeV 以上，比裂变反应中平均每个核子释放的能量大 3 到 4 倍。这个核反应方程为



据推算，1 g 氘发生聚变放出的能量为 $1 \times 10^5 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。地球上共有约 $1 \times 10^{18} \text{ t}$ 海水，其中含氘约 $3 \times 10^{13} \text{ t}$ ，如果用来发电，足够人类使用上百亿年。可见，聚变核能是一个更大的能源宝库。

聚变的条件

我们知道，原子核只占整个原子体积极小的一部分，电子在原子核外绕核运动。要使两个原子的核靠近并聚合在一起，必须剥离原子核外的电子，使两个核接近到 10^{-15} m 以内，这时核力才能发生作用。

原子核带正电，它紧紧地吸引着核外电子。要让核外电子逃逸，并使原子核克服相互靠近时产生的巨大的静电斥力，必须有几千万开以上的高温。在这么高的温度下，剧烈的热运动使原子完全电离，形成物质的第四态——等离子态，原子核可获得足够大的动能，进行剧烈的运动和相互碰撞，这时总有一部分核可以接近到足以发生聚变的距离。所以，聚变又叫热核反应。

热核反应在宇宙中很普遍。目前的理论认为，太阳以及许多恒星内部，都在不断地进行着聚变反应，因此它们不断地辐射出光和热。

那么，怎样才能获得这么高的温度以实现热核反应呢？目前较成熟的技术是利用原子弹的爆炸使氘和氚发生热核反应。氢弹就是这样制造出来的，它能产生比原子弹大得多的威力。

受控热核反应

为了使热核反应的能量缓慢地释放出来，当前，受人青睐的受控热核反应实验装置称为“托卡马克” (Tokamak)，它是一种利用强磁场约束参加反应的等离子体的环流器，其结构如图 7-4-6 所示。它的主体是一个环状真空室，其中充以氘气或氘、氚混合气体，这是托卡马克的核燃料。真空室外是磁场装置，它的作用是约束等离子体。当中央螺线管通电后，在环状真空室内感应出强电流，加热核燃料，使其成为等离子体，同时中央螺线管 and 同轴环形线圈一起形成一个螺旋状磁场，将等离子体约束在环状真空室内，使之不与室壁接触，也不会从端面流失。等离子体在真空室内互相碰撞就会发生热核反应。



图 7-4-5 1967 年 6 月 17 日我国第一颗氢弹爆炸成功

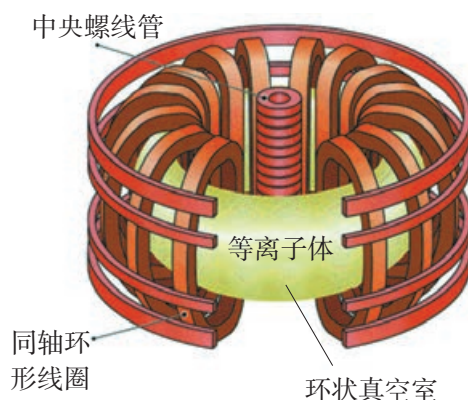


图 7-4-6 托卡马克的结构

运用多种方法，创设多种问题情境，有助于广泛了解核能等对人类生活和社会发展的影响。

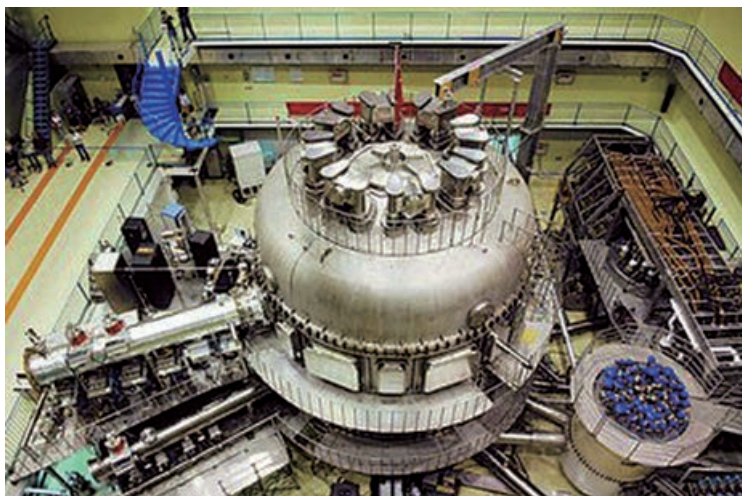


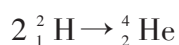
图 7-4-7 中国首座核聚变全超导托卡马克（人造太阳）实验装置

1964 年，我国著名物理学家王淦昌提出了激光聚变的构想，即用高功率的激光束打在氘、氚组成的靶丸上，产生高温使核燃料发生核聚变。现在，我国已建成首座全超导托卡马克实验装置，步入核聚变研究的世界前列。

案例分析

案例 使两个氘核发生聚变生成一个氦核放出多少核能？

分析 聚变的核反应方程为



先查出氘核和氦核的质量

$$m_{\text{D}} = 2.014\,102\,\text{u}, \quad m_{\text{He}} = 4.002\,603\,\text{u}$$

然后根据核反应前后的质量亏损，用质能方程算出释放的核能。

请同学们根据上述分析，完成计算。

核能利用与社会发展

核能登上历史舞台，虽然只有短短的 70 多年，却已有了长足的发展。目前世界上已有 40 多个国家和地区建有 400 多座核电站，发电量已占世界发电总量的 17% 以上。

核能的发展和利用对人类社会产生了哪些影响？

核能的优越性

核能跟常规能源相比，具有明显的优势。

核燃料提供的能量巨大。计算表明，如果按照 1 个铀核裂变放出 200 MeV 的能量估算，1 kg 铀全部裂变释放的能量相当于 2 700 t 标准煤完全燃烧放出的能量。

核燃料的储量丰富。目前核电站使用的裂变材料是铀，铀在地壳中的平均含量比金、银更为丰富，不仅分布在岩石中，也蕴藏在海水、河水、湖水中。除铀以外，钍也是一种裂变材料，它比铀更为丰富。

热核反应需要的聚变材料——氘，在海水中有着丰富的储量。1 L 海水中大约有 0.03 g 的氘，它发生热核反应放出的能量跟燃烧 300 L 汽油相当。因此，一旦受控热核反应获得成功，将从根本上解决困扰人类社会的能源问题。

核燃料的运输和储存方便。一座 1×10^6 kW 的火力发电厂，一年要烧煤 3.5×10^6 t，这些煤每天要用 200 节火车车皮或一艘万吨巨轮运输。而同等规模的压水堆核电站，一年只需 30~40 t 低浓铀，只需 6 辆卡车就可全部运到现场，储存也很方便。

核能清洁卫生，对环境的污染小。火力发电厂运行时会排出大量的废气以及其他对环境和人体有害的物质。核电站不排放二氧化碳、氮氧化物等造成温室效应或酸雨的气体及烟尘。设计良好、管理完善的核电站，不易发生放射性污染事故。因此利用核能有利于环境的保护和可持续发展。

核安全性与核废料处理

1979 年美国三哩岛核电站、1986 年苏联切尔诺贝利核电站、2011 年日本福岛核电站的核泄漏事故，曾给核电站的应用前景投下了一片阴影。目前，核电站有可靠的安全措施，对核废料有严格的处理规程，核能发电技术已经成熟。

为了防止核电站放射性物质的泄漏，核电站设置了多道安全屏障（图 7-4-8）。

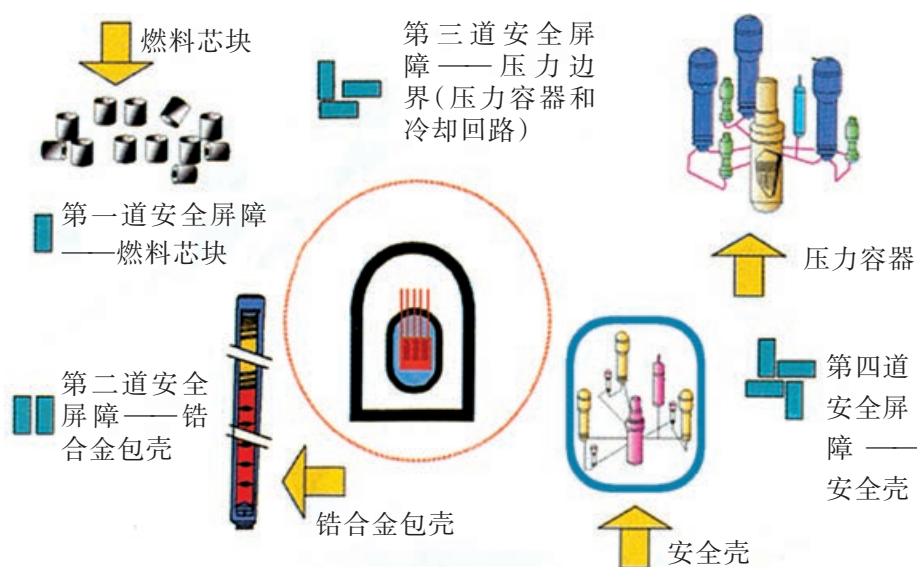


图 7-4-8 核电站的四道安全屏障

第一道屏障——可以把 98% 以上的裂变产物滞留在燃料芯块内，不向外释放。

第二道屏障——性能良好的锆合金包壳把燃料芯块密封在其中，能够经受各种运行工作情况的考验，保证密封性良好。

第三道屏障——保证结构的完整性。

第四道屏障——能承受事故发生的压力并保持良好的密封性，防止放射性物质向外泄漏。

核电站是现代科学技术综合发展的产物，它的科学设计、精心制造、可靠运行和多重安全措施，使得发生重大事故的可能性远比其他自然或人为灾害的要小，核电站是安全可靠的。

对核废料的处理有多种方法。目前我国对核废料采用后处理技术，即从用过的核燃料中回收铀、钚等。这样，占 96% 的铀和占 1% 的钚可回收再利用，只需处理剩下的 3% 放射性废料和其他途径产生的核废料。对其中的低、中放射性废物进行沥青固化或水泥固化后，贮存在地下浅层废料库；对高放射性废料采用玻璃固化后，埋藏在深层废料库。在核电站周围还设置许多监测点，定期采集空气、水、土壤和动植物样品进行分析，监测放射性对环境的影响。

如果国家需要在你的家乡选址建设核电站，你对此持何态度？为什么？就这一问题与你的同学、朋友进行讨论和交流。

为和平利用核能而努力

巨大的核能既能造福于人类，也存在一定的潜在危险。现代社会比以往任何时候更需要科学家的高度社会责任感和正义感。

发现铀核裂变时正值第二次世界大战，科学家认识到核裂变能释放出巨大的能量，并担心这一科学成果被德国纳粹政府用来制造大规模杀伤性武器。当原子弹快要研制成功时，齐拉（L. Szilard）、爱因斯坦、玻尔等科学家纷纷告诫美国政府对原子弹的使用应采取慎重态度。然而，1945 年美国还是在日本的广岛和长崎投掷了两颗原子弹。爱因斯坦在一篇文章中写道：“参加那些令人恐惧和充满危险的武器研制的物理学家们，被同样的责任感所烦扰……”

为了维护世界和平与安定，要求全面销毁核武器，特别是反对各种类型的核试验的呼声日益高涨。1968 年 6 月 12 日联合国大会通过《防止核武器扩散条约》。当前，如何使人类避免核灾难的问题已变得越来越严峻。近年来，联合国等国际组织先后通过了一系列条约和协定，限制各国制造和使用核武器。

我国发展核武器是在特定的历史条件下迫不得已作出的决

科学技术对人类生活和社会发展具有积极的影响，但同时也会带来一系列问题，要充分认识到人与自然是生命共同体，人类必须尊重自然，遵循自然规律。

定。我们研制和发展少量核武器，完全是出于防御的需要，是为了抵制核威胁，打破核垄断。中国从拥有核武器的第一天起，就郑重声明，中国在任何时间、任何情况下都不首先使用核武器。中国还无条件地承诺不对无核武器国家和地区使用或威胁使用核武器。中国是世界上唯一作出并恪守这一承诺的有核国家。

我国的原子能科学技术发展迅速。自20世纪60年代以来，成功地爆炸了原子弹、氢弹。1991年，自行设计的浙江秦山核电站一期工程30万千瓦压水堆机组并网发电成功。1993年，广东大亚湾核电站成功运行。至今，我国是拥有核电机组最多的国家。我国的原子能和平开发利用技术已达到世界先进水平，有多项关键技术被突破。如微堆技术方面，能对高浓度微堆进行低浓化，浓度由原来的90%达到现在的12.5%，有效完成核燃料的低能化，成为被国际原子能机构认可的几种核能设施之一。未来，我国将进一步为人类的核能和平利用做出自己应有的贡献。

家庭作业与活动

1. 我国目前已建成的秦山核电站和大亚湾核电站，都是利用核燃料 $^{235}_{92}\text{U}$ 在裂变反应堆中“燃烧”产生的热能使水汽化以推动汽轮机发电的。已知一个 $^{235}_{92}\text{U}$ 在反应堆中完全“燃烧”放出的能量约为200 MeV。

- (1) 1 g $^{235}_{92}\text{U}$ 完全“燃烧”释放出的能量约为多少焦？
- (2) 秦山核电站的发电功率为 $3.0 \times 10^5 \text{ kW}$ 。假定核燃料 $^{235}_{92}\text{U}$ 完全“燃烧”释放的能量有90%转变成电能，则该核电站每年需消耗纯 $^{235}_{92}\text{U}$ 约多少千克？

2. 1个氘核和1个氚核聚变成氦核，放出1个中子，这个反应中放出了多少核能？已知 $m_{\text{D}} = 2.014\ 102 \text{ u}$, $m_{\text{T}} = 3.016\ 050 \text{ u}$, $m_{\text{He}} = 4.002\ 603 \text{ u}$, $m_{\text{n}} = 1.008\ 665 \text{ u}$ 。

3. 已知4个氢核聚变成1个氦核，放出2个正电子。
 - (1) 写出这个核反应方程；
 - (2) 这一核反应释放出的能量有多少焦？
 - (3) 若1 g 氢完全聚变，它放出的核能相当于多少优质煤完全燃烧放出的化学能？

已知优质煤的热值为 $3.34 \times 10^7 \text{ J/kg}$ 。

4. 假设太阳内部持续不断地发生着4个氢核聚变为1个氦核的热核反应，这个核反应释放出的能量就是太阳的能源。

- (1) 太阳的质量每秒减少多少千克？
- (2) 若太阳质量减少0.03%，热核反应就不能继续发生。据此估算，太阳还能发光多少年？（已知太阳向空间辐射的总功率为 $3.6 \times 10^{26} \text{ W}$ ，太阳的质量为 $2 \times 10^{30} \text{ kg}$, $m_{\text{p}} = 1.007\ 276 \text{ u}$, $m_{\text{He}} = 4.002\ 603 \text{ u}$, $m_{\text{e}} = 0.000\ 548 \text{ u}$ 。）

5. 皮埃尔·居里在1903年说：“人类从未来的发现所得到的好处将比坏处更多。”卢瑟福在1915年说：“我希望人们在学会和平相处之前，不要释放镭的内部能量。”两位科学家的意见是互为对照的。结合本节内容，请说说你的看法。

6. 通过查找资料、观看科普录像，了解核能开发的社会效益及所带来的安全利用核能等问题。

7.5 粒子物理与宇宙起源

粒子物理，是当前物理学的前沿之一，它的研究对象是比原子核更深的层次，随着科学研究的深入，科学家发现组成原子核的更微小粒子的研究与组成宇宙的更大星系的研究是直接相连的。粒子物理学家和天文学家研究的正好是长度标尺极小与极大的两端，现在他们要共同回答的问题是：“这世界究竟是由什么组成和怎样组成的？”你想过这个问题吗？

四种基本相互作用

四种基本相互作用丰富了我们的物理观念。



两位著名物理学家杨振宁(右)和李政道(左)。



吴健雄（1912—1997），生于江苏省苏州市太仓浏河镇，是世界最杰出的实验物理学家之一。

人们在认识原子核之前，只知道在自然界中有万有引力与电磁力两种力。随着对微观世界研究的深入，物理学家发现，自然界中各种不同的相互作用都可以归结为四种基本相互作用：引力相互作用（万有引力）、电磁相互作用（电磁力）、强相互作用（强力）和弱相互作用（弱力）。

万有引力是一切具有质量的物体之间具有的一种吸引力，电磁力是带电物体与电磁场之间及带电物体之间通过电磁场传递的相互作用。万有引力和电磁力的作用范围很远。强相互作用和弱相互作用发生在微观领域。强相互作用的作用范围在 10^{-15} m 以内，弱相互作用的作用范围在 10^{-18} m 以内。

除了作用距离，这四种基本相互作用的差异还表现在它们的作用强度上。在原子的尺度上，如果把强相互作用的作用强度规定为 1，则核内电磁力的强度在 10^{-2} 数量级，弱相互作用的强度在 10^{-6} 数量级，而引力的强度仅在 10^{-39} 数量级。因此，在微观领域，引力常常被忽略，只有在质量巨大且呈电中性的宏观领域，引力作用才会产生明显的效应。

著名物理学家杨振宁和李政道致力于粒子物理的研究，1956 年提出“弱相互作用中宇称不守恒理论”，1957 年共同获得诺贝尔物理学奖。著名核物理学家吴健雄在 β 衰变研究领域具有世界性的贡献，验证了“弱相互作用下的宇称不守恒”。

粒子加速器

粒子怎样被发现的？科学家又怎样进一步观测和研究粒子呢？

原子核的结构是坚固稳定的，1919 年，卢瑟福用天然放射源实现了历史上第一个人工核反应。卢瑟福宣称，如果粒子有

更大的能量，就有希望击破更多元素的原子核。也就是说，打开原子核就需要一些比天然放射性能量更高、更便于控制的高能粒子，于是各种粒子加速器与粒子探测器就产生了。

直线加速器 直线加速器是指利用高频电场对质子、电子或其他带电粒子进行加速的设备，它由一系列内部有着很长真空室的中空管组成，被加速粒子的运动轨迹为直线。从原理上讲直线加速器可以把粒子加速到足够高的能量，可是当需要很高的能量时，加速器的直线距离会很长，这就限制了直线加速器的发展。现在的直线加速器大多作为注入器与同步加速器一起使用。

同步加速器 同步加速器是一种环形装置，它利用磁场把粒子的路径弯成圆形，使加速器变得较小。在同步加速器中，使粒子做圆弧运动的弧形电磁场单元与粒子加速电场区域单元是分开的。在直线区域用高频电场加速带电粒子，使粒子的动能增加。在弧形电磁场单元用磁场让粒子偏转，弧形区域的磁感应强度和路径长度都是设定好的。当粒子在到达有交变电场的直线区域时电场正好能对它们进行加速，当粒子在到达有磁场的弧形区域时磁场正好能让它们做匀速圆周运动。同时，同步加速器中磁感应强度随被加速粒子能量的增加而同步增加，保持粒子回旋频率与高频加速电场同步，这样洛伦兹力就始终将粒子约束在同一条轨道。原理如图 7-5-1 所示。

近年来，在粒子物理中的一系列研究成果与重大发现，几乎都是通过同步加速器来完成的。在粒子物理学中，通常称 1×10^8 eV 以下为低能（原子弹爆炸时平均每个核子释放的能量只在 10^6 eV 的量级）， $1 \times 10^8 \sim 3 \times 10^9$ eV 为中能， 3×10^9 eV 以上为高能。粒子能量越高，波长越短，越能深入到粒子内部去获得更多的信息。我国在 1989 年建成的北京正负电子对撞机，同时加速两种粒子，使它们沿相反方向加速运动并相撞，能量为 5.6×10^9 eV。

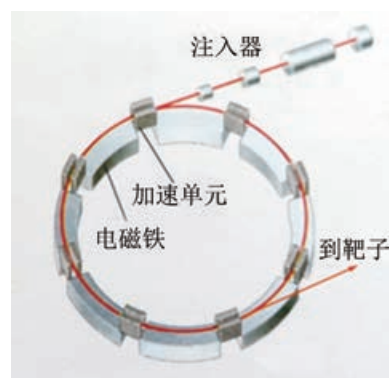


图 7-5-1 同步加速器原理图

粒子世界和夸克模型

粒子世界

在知道原子核是由质子和中子组成之后，人们以为电子、质子、中子等是组成物质的最基本的粒子，曾把它们叫做“基本粒子”。用这种观点能成功解释各种原子核的一些性质和核反应的一些规律。但是，还是有一些现象不能通过该观点解释。如原子核内并不存在电子，那么 β 射线是怎样产生的？于是人们怀疑，“基本粒子”是否基本？它们是否有着更深层次的结构？

在发现的粒子中，有的质量中等，还有的比质子重得多。它们有的带正电，有的带负电，也有的不带电。一些粒子的寿命只有 10^{-23} s，而另一些的寿命却很长，如质子，根本看不到它们的衰变。美国物理学家费米曾一度被问及该怎样识别粒子的径迹并将其分类，他的回答是：“如果我能够记住所有这些粒子的名称，那么我就是植物学家了。”

1912 年，奥地利物理学家赫斯（V. Hess）通过在气球上进行的高空观测，证实有射线从宇宙空间射来，这些射线被称为宇宙线。之后，许多物理学家常年坚持对宇宙线进行观测，从中发现了一些新的粒子。

宇宙线中有能量很高的粒子，但数量很少。人们用高能加速器进行实验，发现了更多的新粒子。如 1937 年发现了 μ 子，1947 年发现了 K 介子和 π 介子，此后不久又发现了 Λ 子。

夸克模型

20 世纪 60 年代后期，人们弄清楚了构成原子核的质子与中子也是有结构的。在许多科学家研究的基础上，美国物理学家盖尔曼（M. Gell-Mann）于 1964 年提出了夸克模型，认为质子和中子是由一个叫做夸克（quark）的粒子家族组成的，夸克模型把核子（质子和中子）看做夸克的一个集合体。

后来，一系列的实验证实了夸克的存在。在夸克模型中，人们最初预言的三种夸克是上夸克（u）、下夸克（d）和奇异夸克（s）。后来又相继提出存在第四种夸克——粲夸克（c）、第五种夸克——底夸克（b）。1994 年，美国费米实验室间接证实了第六种夸克——顶夸克（t）的存在。

不过需要强调的是，至今人们仍不能将夸克从强子中打出来，即无法获得自由的夸克，夸克始终被“禁闭”着，这是一个尚未解开的谜。

当今粒子物理学研究的第一个粒子家族是强子，参与强相

信息浏览

丁肇中的实验研究

1974 年 12 月，美籍华裔物理学家丁肇中教授领导的一个小组发现了一种新粒子，他把它命名为 J 粒子。几乎同时，美国物理学家里克特（B. Richter）领导的另一个实验小组也找到了这种粒子，他把它命名为 ψ ，所以现在这种粒子叫做 J/ ψ 粒子。

J/ ψ 粒子的质量是质子的 3 倍多，这个新粒子的发现表明了第四种夸克——粲夸克的存在。

丁肇中主要从事实验粒子物理学的研究工作，在电子和 μ 子物理学、量子电动力学、重光子性

质等方面都有深入的研究。因发现 J/ ψ 粒子，他与里克特分享了 1976 年的诺贝尔物理学奖。



丁肇中（1936— ），美籍华裔物理学家。1976 年因发现 J/ ψ 粒子而荣获诺贝尔物理学奖。

相互作用。质子是最早发现的强子，中子、介子和超子也是强子。第二个粒子家族是轻子，它们不参与强相互作用。轻子包括电子、 μ 子、 τ 子以及它们相联系的三种中微子。第三个粒子家族是传递相互作用的粒子，目前包括传递电磁作用的光子、传递弱相互作用的中间玻色子 $W^\pm$ 、 Z^0 ，以及传递强相互作用的胶子。

现在已发现的粒子总数达400多种，难道它们都是“基本”的吗？特别是参与强相互作用的粒子（称为强子），形形色色，种类繁多，它们会不会有内部结构呢？有待我们进一步去探秘。

人类对物质的认识是无止境的。要不断完善对物质的认识，形成相对完整、科学的物质观念。

多学一点

反物质

1932年，美国物理学家安德森在对宇宙射线的研究中，利用云室观察到了人们预言过的电子的反粒子，即正电子。

正电子是人们发现的第一个反粒子。此后，一些粒子的反粒子相继被人们发现：1955年，发现反质子；1957年，发现反中子；1959年，我国物理学家王淦昌等发现反超子。随着反粒子的不断被发现，科学家开始设想：如果用反质子和反中子代替原子核中的质子和中子，就可以得到一个反原子核，再配上相应的正电子，就可得到一个反原子，我们可用反原子构成反分子，而反原子和反分子则构成反物质。

反粒子（反物质）最显著的特点是：当它们与相应的正粒子（物质）相遇时，会发生“湮灭”，即同时消失而转化成电磁辐射。

小粒子与大宇宙

宇观世界和微观世界之间存在着巨大的差异。从空间范围来讲，宇观世界现已扩展到现代天文学观测手段所能探及的约 10^{27} m之远的宇宙深处；微观世界则已深入到约 10^{-19} m之微的夸克和轻子。从时间范围来讲，宇观世界的“寿命”至少不少于150亿年。微观世界中粒子的寿命有的很长，如质子（ $> 10^{32}$ a）、中子（约15 min），而有的却很短，如 μ 子（ 2.2×10^{-6} s），有的粒子寿命甚至短到仅 10^{-23} s。这两个在空间上和时间上有着“天壤之别”的世界之间，却存在着千丝万缕的联系。

1979年诺贝尔物理学奖获得者格拉肖（S. Glashow）曾经非常形象地把大至宇观世界小至微观世界的“链条”比喻成一条咬住自己尾巴的巨蟒（图7-5-2），从尾到首依次对应于粒子、原子核、原子、细胞，一直到超星系团、整个宇宙。宇宙大爆炸学说认为，宇宙是在一百多亿年前的一次大爆炸中诞生的，开始物质的密度和温度都极高，那时只有极高温的热辐射和高

宇观世界通常指宇宙学和天文学所研究的范围。常用光年等作为长度单位。

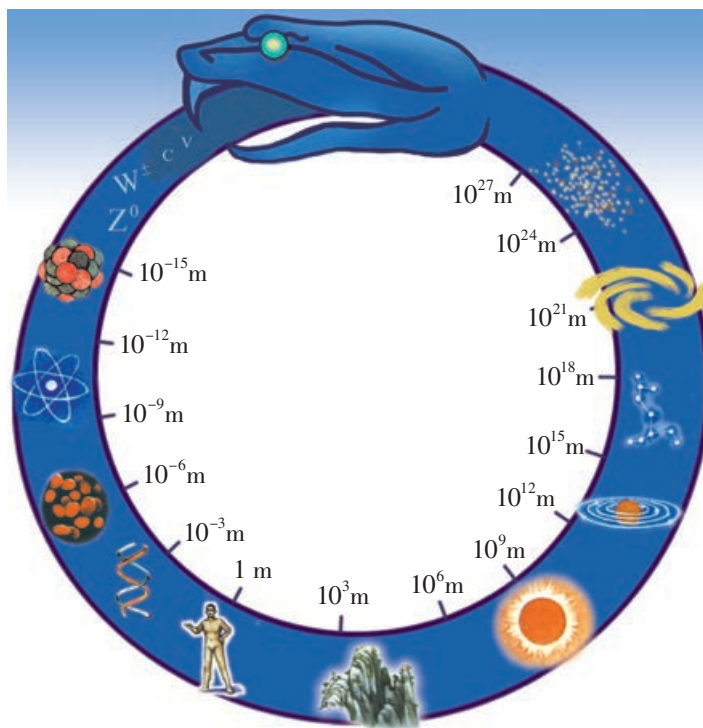


图 7-5-2 宇观世界与微观世界紧密联系

物理学家的进一步追求，是把强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用、引力相互作用这四种各有特色的相互作用再综合在一个统一的理论体系——统一场论之中。

能粒子，早期的宇宙就成为粒子物理学的研究对象，这样粒子物理学和宇宙学竟奇妙地衔接起来！

我国在探索宇宙奥秘方面已处于世界前沿水平。2016年9月25日，自行设计建设的世界最大单口径500 m球面射电望远镜（FAST）落成启用，至今已在发现新脉冲星等方面取得重要成果。这一“中国天眼”必将在观测宇宙线、暗物质和暗能量，开展从宇宙起源到星际物质的探讨方面获得更大的科研成果。

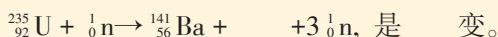
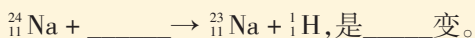
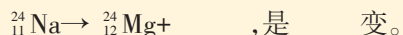
家庭作业与活动

1. 自然界中的基本相互作用是如何分类的？
2. 粒子是如何分类的？
3. 你对物质的层次结构有什么见解？

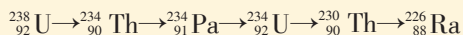
第7章家庭作业与活动

A组

1. 完成下列核反应方程，并指出核反应的类型：



2. 用 α 粒子轰击硼-10，产生一个中子和一个具有放射性的核，这个核是什么？这个核能放出正电子，它衰变后变成什么？写出核反应方程。
3. 用中子轰击氮-14，产生碳-14，碳-14具有 β 放射性。它放出一个 β 粒子后衰变成什么？写出核反应方程。
4. 铀-238 衰变为镭-226 的过程如下：

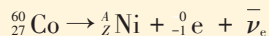


每次衰变放出的粒子是什么？请标在箭头的下方。

5. 镭-82 的半衰期是 25 d，如果有 140 g 镭-82，那么经过多少天只剩下 17.5 g？再经过多少天剩下的量不足 1 g？
6. 钍-230 具有放射性，它放出一个 α 粒子后变成了什么？写出衰变方程。
7. 钫-223 具有放射性，它放出一个 β 粒子后变成了什么？写出衰变方程。
8. 在某些恒星内，发生着 3 个氦核聚变成碳-12 核的反应，已知氦核的质量为 4.001 509 u，碳-12 核的质量为 12.000 000 u，计算这一反应中释放的能量。

B组

1. 1956 年李政道和杨振宁提出在弱相互作用中宇称不守恒，吴健雄用 ${}^{60}_{27}\text{Co}$ 对此进行了实验验证。次年，李、杨两人为此获得诺贝尔物理学奖， ${}^{60}_{27}\text{Co}$ 的衰变方程是：



其中 $\bar{\nu}_e$ 是反电子中微子，它的电荷为零，静止质量被认为是零。

- (1) 在上述衰变方程中，衰变产生的 ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ 的核子数 A 是 ，核电荷数 Z 是 。
- (2) 在衰变前 ${}^{60}_{27}\text{Co}$ 是静止的，根据云室照片

可以看出，衰变产物 ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ 和 ${}^0_{-1}\text{e}$ 的运动径迹不在同一条直线上，如果认为衰变产物只有 ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ 和 ${}^0_{-1}\text{e}$ ，那么衰变过程将违反 守恒定律。

2. 已知 1 L 海水含有 0.146 g 的重水，从中可提取 0.03 g 的氘 (${}^2_1\text{H}$)。假如 1 L 海水中的氘全部聚变为氦，则释放多少能量？氘核和氦核的质量分别为 2.014 1 u 和 4.002 6 u，若 1 L 汽油完全燃烧释放的能量为 $3.23 \times 10^7 \text{ J}$ ，那么 1 L 海水中的氘全部聚变所放出的能量相当于多少升汽油燃烧时释放的能量？(1 u = $1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$)
3. 放射性同位素 C 被考古学家称为“碳钟”，它可以用来判定古生物体的年代，此项研究获得 1960 年诺贝尔化学奖。

- (1) 宇宙射线中高能的中子碰到空气中的氮原子后，会形成很不稳定的 ${}^{14}_6\text{C}$ ，它很容易发生衰变，放出 β 射线变成一个新核，其半衰期为 5 730 a。试写出此核反应方程。
- (2) 若测得一古生物遗骸中的 ${}^{14}_6\text{C}$ 含量只有活体中的 12.5%，则此遗骸距今约有多少年？

4. 已知物体从地球上逃逸的速度（第二宇宙速度）

$$v = \sqrt{\frac{2GM_E}{R_E}}, \text{ 其中 } G、M_E、R_E \text{ 分别表示万有引力常量、地球的质量和半径。}$$

已知 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ ，光速 $c = 2.997 9 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

- (1) 逃逸速度大于真空中光速的天体叫黑洞。设某黑洞的质量等于太阳的质量 $M = 1.98 \times 10^{30} \text{ kg}$ ，求它的可能最大半径（结果保留两位有效数字）。
- (2) 在目前天文观测范围内，物质的平均密度为 10^{-27} kg/m^3 。如果认为我们的宇宙是这样一个均匀大球体，其密度使得它的逃逸速度大于光在真空中的速度 c ，因此任何物体都不能脱离宇宙，则宇宙的半径至少多大？

总结与评价 课题研究成果报告会

亲爱的同学：

祝贺你即将完成《物理（选择性必修3）》的学习。在这个模块中，我们用统计思想方法，认识了大量分子无规则热运动的规律；从宏观和微观两个角度研究，知道了固体、液体和气体的性质；以实验探究为基础和量子论的视野探秘原子世界，认识光和实物粒子的波粒二象性；认识了核能对人类生活和社会发展的影响，培养了我们的物质观念、运动与相互作用观念、能量观念和物理模型建构等物理学科核心素养。你一定有许多新的感受和收获，那么，就让我们开一个“课题研究成果报告会”吧！

你可以把你平时做过的最满意的课题拿出

来，再做进一步的研究，取得更有意义的成果，到这个报告会上去展示；你也可以从下面的研究课题示例中，选择你感兴趣的课题，独立完成或与同学合作完成。当然，你还可以自选其他课题进行研究。

在这个报告会上，也许没有鸿篇大论，也许没有什么重大的发明，但这里展示的成果，铭刻着你们的勤奋，凝聚着你们的心血……这里，最可贵的是真实！

简单就是美丽，巧妙就是智慧！

这个“课题研究成果报告会”，将让你的智慧放出灿烂的火花，让你的才智得到充分的展示！

研究课题示例

寻找生活中显现统计规律的实例

例如：可记录电视台或广播电台天气预报的主要指标，了解这些指标的意义，分析诸如天气晴好、降雨、台风、下雪的统计规律，据此预测本地的天气状况。体会统计规律意义和作用，写出课题研究报告，在同学间相互交流评价。

关于新材料的应用研究

你可通过查阅资料、上网搜索、实地调查等方式，了解材料科学技术的有关知识及其应用，体会它们的发展对人类生活和社会发展的影响，自选一个题目，整理一份情况报告资料，在班上交流，并作出相应的评价。

合理开发和利用能源的调查

基于对热力学定律和能量守恒定律的认识，结合可持续发展的理念，对当地人们在生活生产中开发和利用能源的问题作一调查，写成调查报告，并提出合理开发和利用能源的建议，供当地有关部门参考。

讨论建立核电站的必要性

通过查阅资料，了解世界各国核电站的基本情况、成功经验和深刻教训，了解本地区能源供应情况，论证本地区建立核电站的必要性和可行性，写一份发言材料，在班上交流评价。

华人科学家在粒子物理领域中的贡献

通过到图书馆或上网等途径查找资料，了解华人科学家在粒子物理领域中的杰出贡献。搜集从古至今有关我国科学家的发明创造成果，学习其科学奉献精神，为实现中华民族伟大复兴而努力奋斗。写成体会文章，在班上交流评价。

我所知道的宇观、宏观和微观世界

查阅资料，阅读科普读物，收集有关研究宇观星系和微观粒子领域的进展情况，就人类探索物质结构和宇宙起源，写一份关于人类向自然界两极空间求索的专题报告，在班上进行交流评价。

评价表

课题名称:

姓名:完成日期:

合作者:

1. 课题设计思路	2. 课题研究过程
3. 收集的主要资料或证据	4. 分析与论证
5. 研究成果和结论	

6. 自我评价

我在课题研究中的表现： 我对小组研究的贡献是： 我擅长的是：

我在研究中遇到的困难是： 我在这些方面应该做得更好：

自我评价等级（在评价的等级上画圈）

A 级（优秀）	B 级（良好）	C 级（合格）	D 级（低于标准）
---------	---------	---------	-----------

7. 小组评语

建议从成果的科学性、创造性、实践性，以及从参与课题研究的热情和态度、克服困难的勇气、团队合作精神等方面进行评价。

8. 教师评语

建议从成果的科学性、创造性、实践性，以及从参与课题研究的热情和态度、克服困难的勇气、团队合作精神等方面进行评价。

后 记

我们编写的《普通高中物理课程标准实验教科书》（沪科教版）在实验区已试用十余年了，随着基础教育课程改革的深入，教育部又颁布了《普通高中物理课程标准（2017年版）》，为此，我们根据新课标的要求，对这套教科书进行了全面修订，以适应新时期课程改革的要求。

这次修订旨在落实“立德树人”根本任务，进一步提升学生的物理核心素养，为学生的终身学习、终身发展和做有责任感的社会公民奠定基础。

参加本册修订的编写组成员如下：

总主编：束炳如 何润伟

副总主编：母小勇 仲扣庄

本册主编：谢步时 王溢然

本册主要作者：谢步时、王溢然、徐达林、孙 浩

本教科书于2004年首次出版，当时参加本册书有关内容编写的人员还有：汪乾荣、李金生、朱琦、仲扣庄、汪延茂、钱嘉伟、戴苾芬等。沈永昭、倪汉彬、王文祥、罗基鸣、徐建国、梁明奋等同志也曾对本书的修改提出了许多宝贵意见。随着课程改革的深入，编写队伍的组成人员也发生了一些变化，旨在进一步优化编写队伍，以适应新时期课程改革的需求。

在本书的编写过程中，得到了许多专家、学者、教学研究人员和广大教师的热情帮助和大力支持。上海科技教育出版社的李志棣、匡志强、李枯青、朱惠霖、汤世梁等同志和有关工作人员为本书的编辑加工、美术设计、排版印刷等方面做了大量的工作，在此，编写组特向关心本书及为本书的出版提供帮助的所有同志表示诚挚的谢意。

研制符合时代要求的、有特色的、高质量的高中物理教科书，始终是我们的追求目标。恳请广大专家、学者、教师、教研员、学生和家长对本套教科书提出宝贵的意见和建议，与我们一起，合作共建这套教科书。

编者
2018年8月

PUTONG GAOZHONG JIAOKESHU WULI

普通高中教科书
物理 选择性必修
第三册

上海科技教育出版社有限公司出版发行
(上海市闵行区号景路159弄A座8楼 邮政编码201101)
各地新华书店发行 上海华顿书刊印刷有限公司印刷

开本 890×1240 1/16 印张 9
2019年7月第1版 2021年12月第5次印刷

ISBN 978-7-5428-7045-2/G·4087

定价:10.40元

批准文号:琼发改费管[2019]845号 举报电话:12358

ISBN 978-7-5428-7045-2



9 787542 870452 >



致力于用榜样的力量提升学生成绩的共享家教平台

中国家庭教育学会荣誉会员单位

985/211 大学生 1对1 上门辅导

找家教就像叫“代驾”一样简单
家长们都在偷偷用的家教预约神器

记得拍照留存哦



扫码关注 预约上门

关注送200元优惠券

小初高全科辅导

学霸云集任您挑

学历真实可担保



与优秀大学生同行，激发孩子无限潜能



微信搜索公众号：365优教网

咨询热线：4000-711-365

YOUJ 优教

既是找老师，更是找榜样

家教老师全国招募中