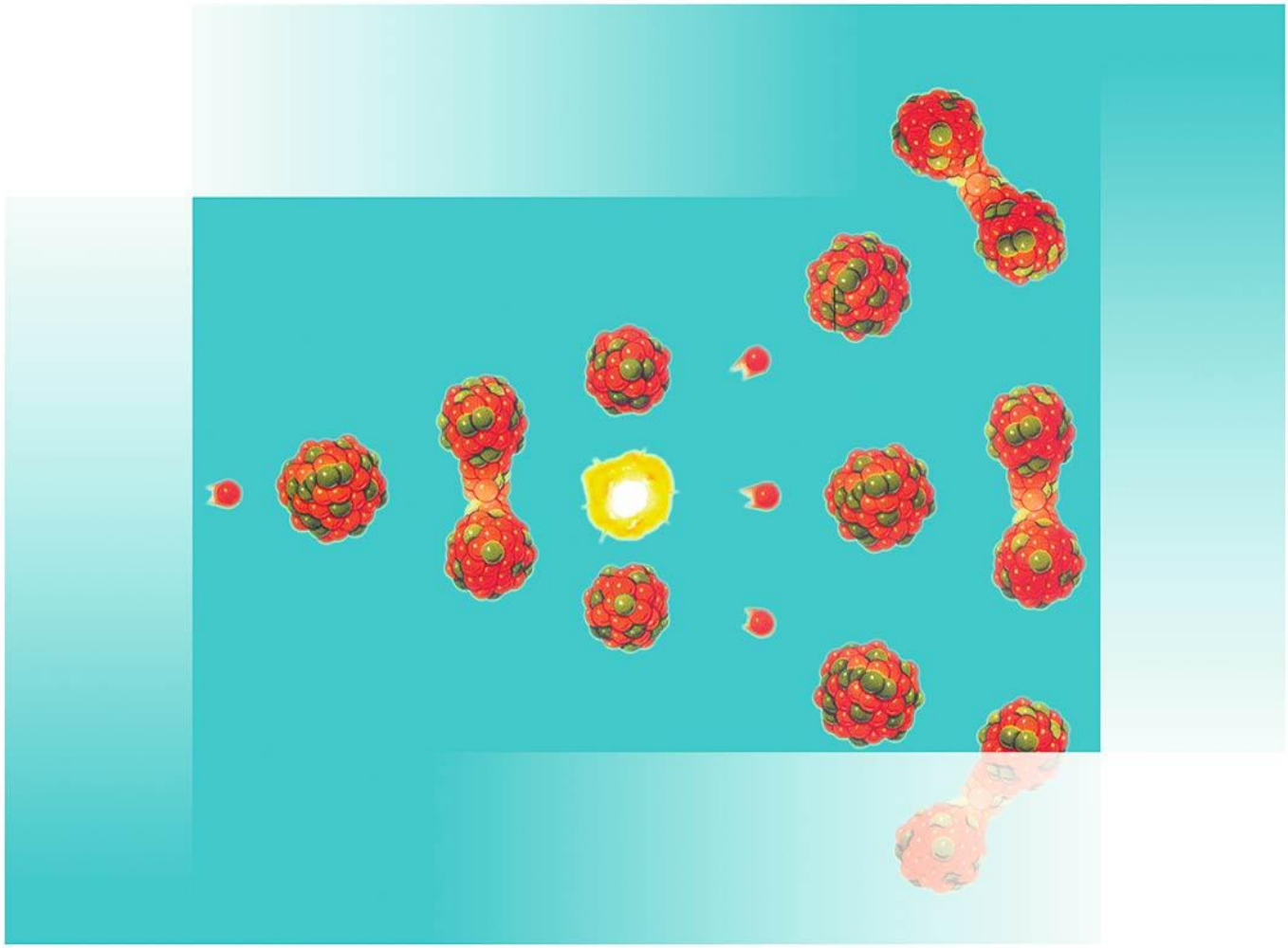
国家教材委员会专家委员会审核通过
2019

普通高中教科书

物理

选择性必修

第三册



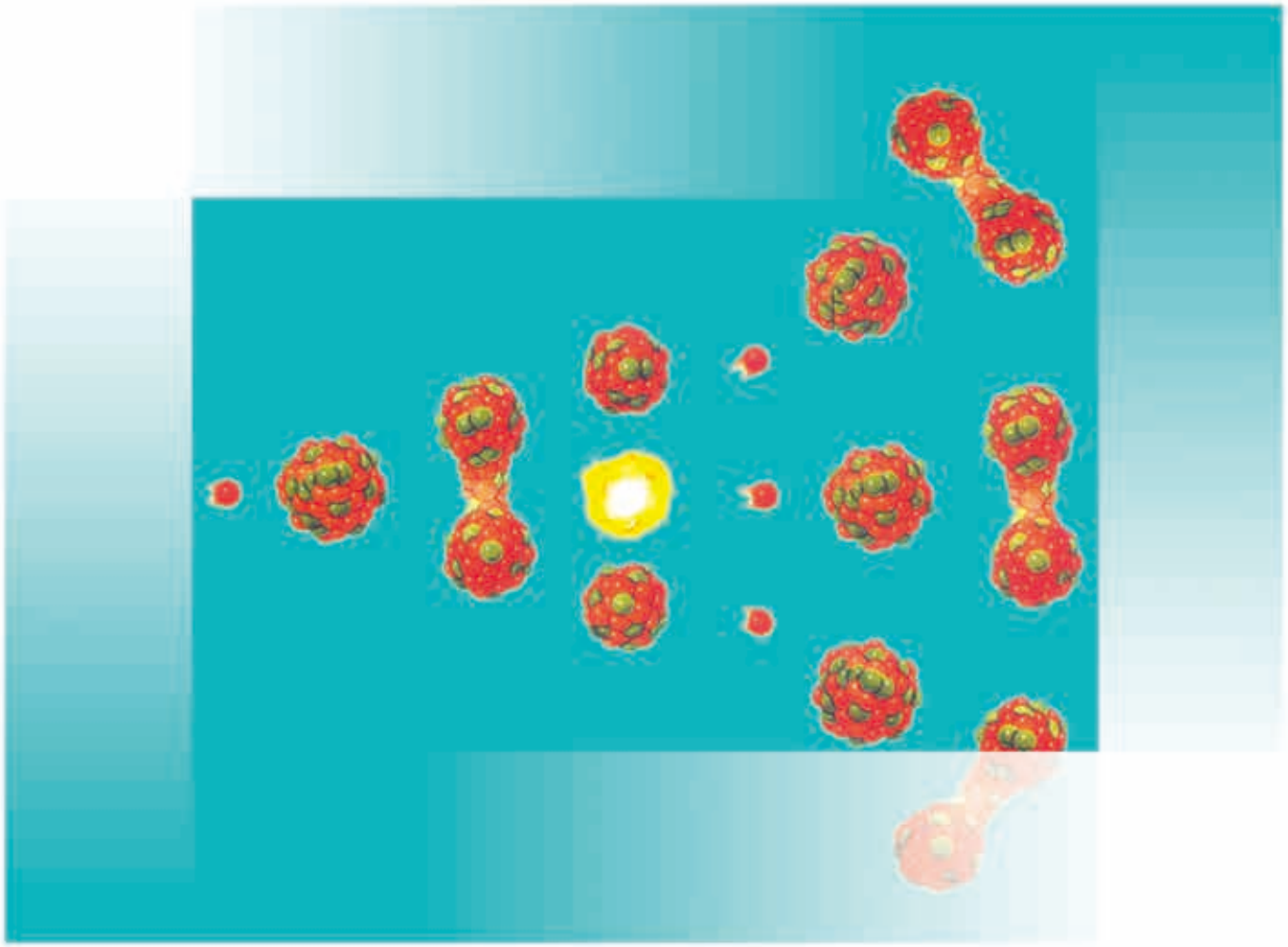
教育科学出版社
ESPH

普 通 高 中 教 科 书

物理

选择性必修

第三册



教育科学出版社

·北 京·

主　　编　陈熙谋　吴祖仁
本册主编　蔡铁权
本册编者　（按姓氏笔画排序）
郑志湖　郑陆敏　莫永超　蔡千斌

出 版 人　李　东
责任编辑　莫永超
版式设计　李勤学　郝晓红
责任校对　贾静芳
责任印制　叶小峰

普通高中教科书

物理　选择性必修　第三册

WULI　XUANZEXING　BIXIU

教育科学出版社出版发行
（北京·朝阳区安慧北里安园甲9号）
邮编：100101
市场部电话：010-64989009　010-64891796（传真）
编辑部电话：010-64989537　010-64989519（传真）
总编室电话：010-64981290　出版部电话：010-64989487
编辑部邮箱：wuli@esph.com.cn
网址：http：//www.esph.com.cn
各地新华书店经销
广西广大印务有限责任公司印装
开本：890毫米×1240毫米　1/16　印张：9.25
2021年1月第1版　　2023年1月第4次印刷

ISBN 978-7-5191-2327-7
定价：10.60元
图书出现印装质量问题，本社负责调换。

目录



第一章　分子动理论

1. 物体是由大量分子组成的 …… 2
2. 实验：用油膜法估测油酸分子的大小 6
3. 分子的热运动 …… 9
4. 分子间的相互作用力 …… 14
5. 分子热运动的统计规律 …… 19
反思·小结·交流 …… 24
本章复习题 …… 25



第二章　固体、液体和气体

1. 固体和固体材料 …… 28
2. 液体 …… 34
3. 温度和温标 …… 39
4. 实验：探究气体等温变化的规律 … 42
5. 气体的等容变化和等压变化 …… 46
反思·小结·交流 …… 51
本章复习题 …… 52



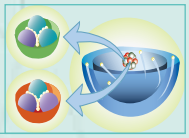
第三章　热力学定律

1. 热力学第一定律 …… 54
2. 能量守恒定律 …… 57
3. 热力学第二定律 …… 63
反思·小结·交流 …… 68
本章复习题 …… 70



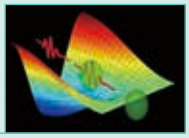
第四章　原子结构

1. 电子的发现 …… 72
2. 原子的核式结构模型 …… 76
3. 光谱　氢原子光谱 …… 81
4. 玻尔的原子模型　能级 …… 86
反思·小结·交流 …… 91
本章复习题 …… 92



第五章　原子核与基本粒子

1. 原子核的组成 …… 94
2. 放射性元素的衰变 …… 97
3. 核反应　结合能 …… 102
4. 核裂变　核聚变 …… 107
5. 粒子物理学发展概况 …… 114
反思·小结·交流 …… 123
本章复习题 …… 124



第六章　波粒二象性

1. 量子论初步 …… 126
2. 光电效应 …… 130
3. 波粒二象性 …… 136
反思·小结·交流 …… 141
本章复习题 …… 142

附录　中英文索引 …… 143



第一章

分子动理论

主题一　分子动理论

- 物体是由大量分子组成的
- 实验：用油膜法估测油酸分子的大小
- 分子的热运动
- 分子间的相互作用力

主题二　统计规律

- 分子热运动的统计规律

盛放的郁金香，沁人心脾。人们是如何闻到它的芳香的呢？一杯清水，到底含有多少分子？分子有多大？拧紧的空矿泉水瓶，为什么要踩瘪它并不容易？

这是自然界的斯芬克斯之谜。本章我们将围绕这些问题，去探索与发现。

1 物体是由大量分子组成的

洒到水面的一滴油很快扩散成一大片，水流可以无孔不入，这些现象的本质是什么？

物体由大量分子组成，分子是组成物质并保持物质化学性质的最小微粒。有些分子只包含一个原子，有些分子包含多个原子。在热学范围内，由于分子、原子或离子遵循相同的热运动规律，因此在讨论热运动时，往往不再区分分子、原子或离子，而把它们统称为分子。

今天，随着科学技术的高度发展，物质是由分子、原子或离子组成的观点已被实验所证实，观察和操纵分子、原子也已成为事实。

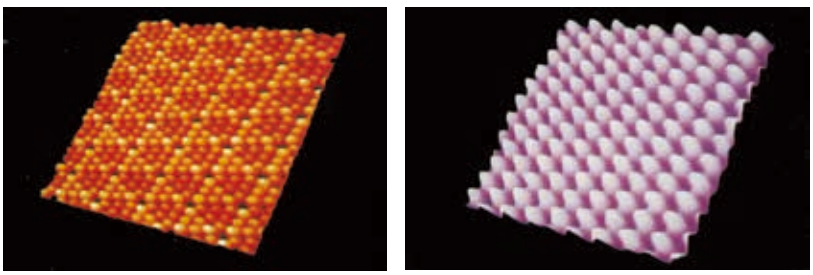


▲ **图1-1-1** 扫描隧道显微镜

扫描隧道显微镜由德国物理学家宾尼希（G.Binnig）和瑞士物理学家罗雷尔（H.Rohrer）于1982年首先研制成功，它是一种基于量子力学中隧道效应的新型高分辨显微镜。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。

分子的大小

组成物质的分子是很小的，不但用肉眼不能直接看到，用普通的光学显微镜和电子显微镜也都难以观察到。在科学技术高度发达的今天，有了新型的表面分析仪器——扫描隧道显微镜（STM），如图 1-1-1 所示。它能够放大几亿倍，观测到原子在物质表面的排列状态，研究与表面电子行为有关的物理、化学性质。扫描隧道显微镜在平行和垂直于样品表面方向的分辨率分别达到 0.1 nm 和 0.01 nm，可以分辨出单个的原子。



（a）硅表面硅原子的排列　　（b）砷化镓表面砷原子的排列

▲ **图1-1-2** 扫描隧道显微镜获得的物质表面照片

讨论交流

扫描隧道显微镜所拍摄的物质表面照片如图 1-1-2 所示。图中的那一个个小突起就是一个个原子吗？已知扫描隧道显微镜的放大倍数是几亿倍，给你一把刻度尺，请你根据图 1-1-2（b）估测出砷原子直径的数量级。

除了利用扫描隧道显微镜测定分子大小之外，还有其他多种测定分子大小的方法。尽管不同方法测出的结果有差异，但是分子直径的数量级是一致的。测量结果表明，除了一些有机物质的大分子外，多数分子大小的数量级为 10^{-10} m。

阿伏伽德罗常量

呼吸时，我们每口气呼出约 2.7×10^{22} 个分子；1 cm^3 水中含有约 3.3×10^{22} 个水分子，假如把这些水分子一个挨一个排列成一条直线，这条直线将达 100 亿千米。分子很小，所以组成物质的分子数非常大。为此，科学家采用了一个特殊的物质的量的单位，称为**摩尔**（mol）。1mol 的任何物质都含有相同的粒子数 N_A，这个数量叫作**阿伏伽德罗常量**（Avogadro constant）。

为了得到精确的阿伏伽德罗常量，科学家不断地用各种各样的方法进行测量。1986 年利用 X 射线测得的阿伏伽德罗常量是 $N_A=6.0221367\times10^{23}$/mol。通常计算取 $N_A=6.02\times10^{23}$/mol。

例题示范

问题　（1）水的摩尔体积是1.8×10^{-5} m^3/mol。假设水分子是一个挨着一个排列的，每个水分子的体积约为多少？已知阿伏伽德罗常量为6.02×10^{23}/mol。

（2）如果已知气体的摩尔体积V_{mol}和阿伏伽德罗常量，要求一个气体分子的体积，也可以用$V_0=\frac{V_{mol}}{N_A}$计算吗？

分析　忽略水分子的具体结构及分子间的空隙，把水分子当作小球，水分子的体

积可用公式 $V_0=\frac{V_{mol}}{N_A}$ 来计算。但气体分子间的间隙较大，就不能用上述公式来计算一个气体分子的体积了。

解 （1）每个水分子的体积为 $V_0=\frac{V_{mol}}{N_A}$。已知 1mol 水有 6.02×10^{23} 个水分子，其体积是 $1.8\times10^{-5}\,m^3$，可求得一个水分子的体积：

$$V_0=\frac{V_{mol}}{N_A}=\frac{1.8\times10^{-5}\,m^3/mol}{6.02\times10^{23}/mol}=3.0\times10^{-29}\,m^3$$

（2）不能。对于气体分子而言，分子间距比较大，可以达到分子直径的十倍以上，因而摩尔体积与阿伏伽德罗常量的比值，即 $V_0=\frac{V_{mol}}{N_A}$ 并不是气体分子的体积，而是代表一个气体分子所占的空间。

拓展 在估算分子大小时有两种情况：对于固体和液体，分子间距较小，在估算分子大小时，可以认为分子是一个一个紧挨着的小球；对于气体，由于分子间距较大，是分子直径的十倍甚至更多倍，可将分子占据的空间视为立方体，从而计算出气体分子间的平均距离。

在热学研究中，阿伏伽德罗常量把摩尔质量、摩尔体积这些宏观物理量跟分子质量、分子大小等微观物理量联系起来，成为连接微观量和宏观量的纽带。

分子之间存在间隙

我们已经知道，半试管水和半试管酒精混合之后的总体积要小于整个试管的容积，这说明液体分子间是有间隙的；气体很容易被压缩，表明气体分子之间存在很大的间隙；给装在钢筒中的油施加很大的压强，将有油从钢筒壁上渗出，这说明固体分子之间也是有间隙的。

分子间存在间隙，分子内部结构也非常复杂，我们在估算分子大小时，把固体、液体分子看作是一个挨着一个紧密排列的小球，这是一种理想化的处理方法，目的是使研究问题更加方便，所得的结果也只有数量级有意义。

讨论交流

你还能举出生活中其他说明分子之间有间隙的例子吗？

自我评价

1. 水分子直径约为 4×10^{-10} m。若把 9 g 水的分子一个挨一个紧密地排成单行，则可绕地球赤道约几圈？（赤道周长约为 4×10^{7} m）

2. 标准状况下，1 cm^3 中含有多少个空气分子？某运动员的肺活量（一次尽力吸气后再尽力呼出的气体总量）约 4000 cm^3，则一次呼吸进入人体的空气分子数约为多少个？

3. 阿伏伽德罗常量是 N_A，铜的摩尔质量是 M，铜的密度是 ρ，试推算出：① 1 m^3 铜所含的原子数目的表达式；② 1 个铜原子占有体积大小的表达式。

4. 对于分子间有间隙，判断以下说法是否正确：①手捏面包，面包体积变小，说明固体分子是有间隙的；②一滴墨水滴到清水中，发生了扩散，说明液体分子间是有间隙的；③水结成冰，同时体积变大，说明水分子之间是有间隙的；④热胀冷缩现象说明分子间是有间隙的。

发展空间



课外阅览

估算—— 一种重要的科学方法

估算，即对物质的数量做大致推算，是对结果进行预测的一种科学方法。在微观世界中，由于涉及的分子、原子等粒子数目惊人，如人呼吸一口气的体积约 1L，每口气呼出约 2.7×10^{22} 个分子，我们无须精确知道具体的分子个数，只要知道其数量级就可以了，因而很有必要在研究或测量前对微观粒子进行数量级的估算。数量级的估算，并没有成套的规律，也没有什么系统的方法，而是针对实际情况灵活运用。当然，若能记住一些基本常数，或熟知生活中有些物质的数量级，将有利于我们对未知物质的数量级估算。

估算，也是一种数据处理的方法。有时我们不需要很精确的数据，且求得精确的数据既复杂又没多大作用，我们就可以用估算的方法去处理。比如，我们要比较蚂蚁和人可以对外施加的力的大小，不同蚂蚁之间、不同人之间就存在个体差异，精确的计算并没有实际意义，但二者的数量级差异是显而易见的，因此进行估算就足够了。

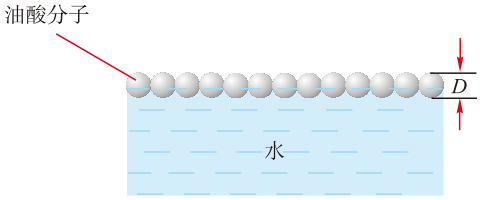
估算为我们解决问题带来了极大的便利。虽然很多发现和研究需要“定量”的过程，但是在研究初期，若能利用合理的模型进行粗略估算，或采取一定的近似方法，能起到避免或少走弯路的作用。

2 实验：用油膜法估测油酸分子的大小

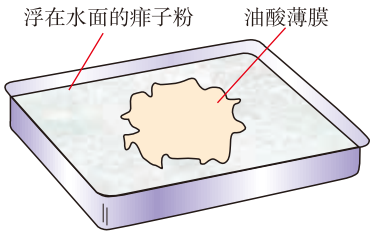
让我们通过估测油酸分子的大小（直径），加深对分子大小数量级的认识。通过建立适当的物理模型，学习利用宏观量的测量来估算微观量的科学方法。

实验原理

我们利用油酸在水面上形成一层单分子油膜的方法（图 1-2-1）估测分子大小。当把一滴用酒精稀释过的油酸滴在水面上时，油酸就会在水面上散开，其中的酒精溶于水中，并很快挥发，这样就在水面上形成一层单分子纯油酸薄膜（图 1-2-2）。如果把分子看作小球，那么可以认为油膜的厚度等于油酸分子的大小（直径）。测出一滴油酸的体积，并算出这滴油酸在水面上形成的单分子油膜的面积，就可估算出油酸分子的大小。



▲ 图1-2-1 用油膜法测分子大小的示意图



▲ 图1-2-2 纯油酸薄膜

讨论交流

阅读以上实验原理，思考并讨论以下问题：

1. 油酸中加酒精配制成油酸酒精溶液的目的是什么？
2. 如何测出一滴油酸酒精溶液的体积？
3. 如何测出油膜散开后形成的不规则图形的面积？
4. 如何计算油酸分子的大小？

实验器材

量筒，注射器，浅盘，油酸酒精溶液，玻璃板，坐标纸，痱子粉或滑石粉，细彩笔，水。

实验步骤

1. 用注射器吸入一定体积（如 1 mL）事先配制好的油酸酒精溶液，再均匀地滴到玻璃杯中，记下滴出的总滴数，即可算出一滴油酸酒精溶液的体积 V_0。

2. 在边长 30 ～ 40 cm 的浅盘里倒入约 2 cm 深的水，然后将痱子粉或滑石粉均匀地撒在水面上，用注射器将事先配制好的油酸酒精溶液滴一滴在水面上，待其散开。

3. 当油酸薄膜的形状稳定后，将玻璃板轻放在浅盘上，用细彩笔仔细地把油酸薄膜边缘的形状画在玻璃板上。

4. 将画有油酸薄膜轮廓的玻璃板放在坐标纸上，用数格的方法估算出油膜的面积 S。

5. 根据油酸酒精溶液的浓度和已测出的一滴油酸酒精溶液的体积 V_0，算出一滴油酸酒精溶液中纯油酸的体积 V。

6. 用公式 $D=\frac{V}{S}$（D 为油酸分子直径），计算得到油酸分子的大小。

◎计算面积的一种方法

凡大于半个格的计为1个格，凡小于半个格的略去不计，数出总格数，再乘以每小格的面积，即为油膜的面积。

实验总结

做完实验，回顾实验过程，我们就可以回答实验前考虑的那些问题了。

油酸为无色或淡黄色油状液体，油酸分子可以看成由两部分组成，即一个较大的“头部”（烃链 $C_{17}H_{33}$—）和一个很小的“尾巴”（羧基—COOH）。“头部”不溶于水，但“尾巴”对水有很强的亲和力。把一滴油酸酒精溶液滴入水中，其中的酒精溶于水并很快挥发，油酸分子充分展开，油酸分子就会竖起来，“头部”露出水面，而“尾巴”

则留在水中，油酸分子就这样一个挨一个紧密地排列在水面上，形成单分子油膜（图 1-2-1）。由于它的“尾巴”很小，其体积可以忽略不计。

实验中用酒精稀释油酸，而不是把纯油酸直接滴到水面，这是因为若不用酒精将油酸稀释，很多油酸分子会堆积在一起形成叠层油膜，不会形成单分子油膜，就无法测出分子直径；而且酒精容易挥发，避免了对实验产生额外的影响。

另外，实验之所以选择用油酸，是因为油酸分子有亲水部分和疏水部分，很容易形成单分子油膜，而别的分子，像汽油、植物油，它们的分子式决定着它们对水的亲近程度差不多，不一定形成单分子油膜。

自我评价

1. 某同学在做“用油膜法估测油酸分子的大小”的实验中，计算结果偏大，可能的原因是（　　）

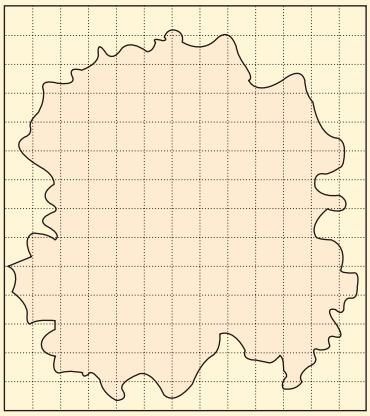
A. 油酸未完全散开

B. 油酸中含有大量的酒精

C. 求每滴体积时，1 mL 溶液的滴数多记了 10 滴

D. 计算油膜面积时，舍去了所有不足一格的小方格

2. 在做“用油膜法估测油酸分子的大小”的实验时，每 10^4mL 油酸酒精溶液中有纯油酸 6 mL，用注射器测得 75 滴这样的溶液为 1 mL。把 1 滴这样的溶液滴入盛水的浅盘里，把玻璃板盖在浅盘上并描画出油酸薄膜轮廓，如图 1-2-3 所示。图中正方形小方格的边长为 1 cm。



▲ 图1-2-3

（1）1 滴油酸酒精溶液中含有纯油酸的体积是多少？

（2）油酸薄膜的面积是多少？

（3）根据以上数据，估算油酸分子的大小。

3. 运用宏观的实验方法，可以测定极其微小的分子的大小，这种实验思想是很深刻的，实验方法也是很巧妙的。想一想，实验中把宏观与微观两个领域联系起来的关键在哪里？

4. 油酸分子大小的理论值是 1.12×10^{-9} m，你认为自己的实验是否准确测出了油酸分子的大小？为什么？实验关注的是测出的数值还是数量级？

发展空间

课外阅览

宏观量与微观量

微观量是描述系统内微观粒子（分子、原子或基本粒子）本身性质或运动状态的物理量，如分子的质量、线度、速率、动量、动能等；宏观量是描述系统内大量微观粒子运动所表现出来的集体的宏观性质和状态参量，如压强、体积、温度、内能等。

微观量与宏观量有着不可分割的联系，阿伏伽德罗常量是把宏观量与相对应的微观量联系起来的重要物理常量。

单个微观粒子的直径是很难直接测量的，我们通过构建模型，采用测量一滴油酸的体积和形成油膜的面积，从而间接地估测出油酸分子的直径。这种测量思想与方法，在微观领域测量中非常重要，有着广泛的应用。

3　分子的热运动

分子很小，即便是从宏观上看很小的物体，也包含着大量的分子。这么多的分子在一起，它们都处于什么样的运动状态？又遵从什么样的规律呢？

扩散现象

观察思考

1. 打开放在讲台上的一瓶香水，过一会儿你就会闻到香水的气味。为什么放在讲台上香水瓶中的香水，它的气味会被你闻到？

2. 在一个量筒里滴入几滴溴，然后用一块小玻璃片盖住。红棕色的溴蒸气从量筒底部慢慢上升，很快就均匀地充满了整个量筒，如图 1-3-1 所示。我们知道，溴蒸气的密度比空气大，为什么会向上升并充满整个量筒呢？



▲ **图1-3-1**　气体的扩散

溴蒸气的密度比空气的密度大，却能在空气中向上运

动。同时，空气也能运动到下面的溴蒸气中去。这种不同物体相互接触时彼此进入的现象称为**扩散**(diffusion)现象。

活动



▲ **图1-3-2** 液体的扩散

如图 1-3-2 所示，在一个烧杯里装上清水，然后在清水中滴入几滴红墨水。在不搅动的情况下，可以看到红墨水在清水中以不规则的形态向四周扩散，慢慢地将清水染成红色。请比较红墨水在水中扩散与溴在空气中扩散的快慢。

扩散并非只发生在气体之间和液体之间，固体与固体之间也存在扩散现象。将表面平滑的一块铅和一块铜紧压在一起，经过一段时间，可以发现在铜的表面层有铅的成分。在一些堆放煤炭的墙角，经过一段时间，墙皮以内会留下黑色的痕迹。

扩散现象并不是外界作用（例如对流、重力作用等）引起的，也不是化学反应的结果，而是由物质分子无规则运动引起的。扩散现象是物质分子永不停息地做无规则运动的最好证明之一。通过实验很容易观察到，温度越高，扩散越快。

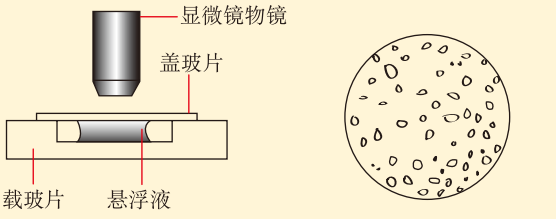
扩散在科学研究和生产技术中有很多应用。在电子技术领域，利用真空、高温条件下固体原子的扩散，可以向半导体材料中掺入其他元素，制成各种半导体器件；机械工业中常常在某些轴、齿轮等零件表面掺入碳、氮等元素，以增强其耐磨、耐腐蚀的特殊性能。

布朗运动

实验探究

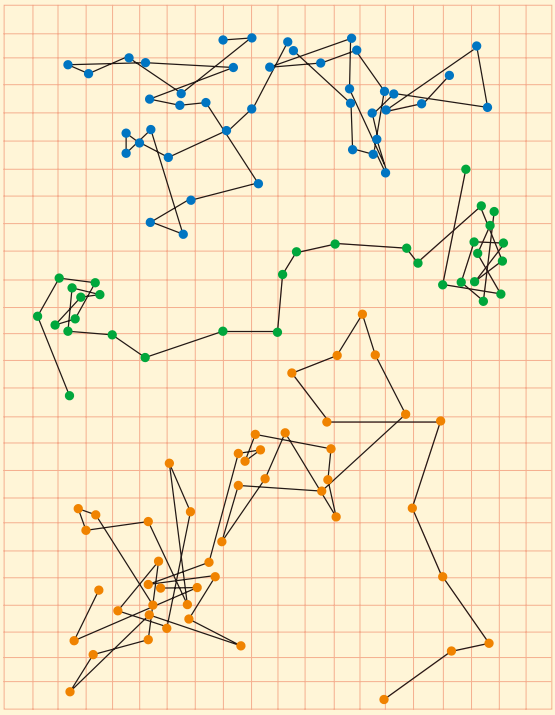
如图 1-3-3（a）所示，把少量的碳素墨水用水稀释，取一小滴放在载玻片上，盖上盖玻片，放在显微镜下观察，可以看到悬浮在液体中的小碳粒在不停地做无规则运动，如图 1-3-3（b）所示。碳粒越小，无规则运动越明显。

在显微镜下追踪一个小碳粒的运动，每隔 30 s 把观察到的碳粒的位置记录下来，然后用直线把这些位置按时间顺序依次连接起来，就得到如图 1-3-4 所示的表现碳粒位置变化的无规则的折线。当然，在这短短 30 s 的时间内，小碳粒的运动也是无规则的，并不是按图中的直线运动。



（a）实验装置　　（b）显微镜下看到的微粒

▲ **图1-3-3**　实验装置及实验现象

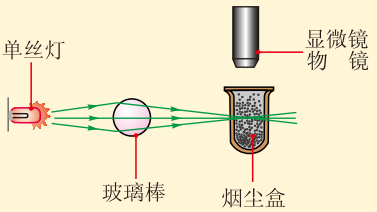


▲ **图1-3-4**　显微镜下三个微粒运动位置的连线

1827 年，英国植物学家布朗（R. Brown）在显微镜下观察悬浮在静止液体里的花粉颗粒，发现花粉颗粒在做永不停息的无规则运动，而且颗粒越小现象越明显，后人把颗粒的这种无规则运动叫作**布朗运动**（Brown motion），这种悬浮颗粒叫作布朗微粒。事实上，不只是花粉颗粒，悬浮在静止液体中的其他微粒都在做布朗运动。

活动

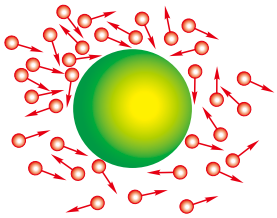
如图 1-3-5 所示，用一根玻璃棒将单丝灯发出的光聚焦到烟尘盒中，在显微镜下观察到的烟尘颗粒呈现为一个个亮点，可以发现这些颗粒在空气中不停地做无规则运动，运动的快慢和方向不断改变。烟尘颗粒越小，这种运动越明显。



▲ **图1-3-5**　观察布朗运动

可见，布朗运动不仅在液体中能观察到，在气体中也能观察到。

布朗运动的解释



▲ 图1-3-6 悬浮微粒受到大量液体分子碰撞

我们知道，液体是由大量分子组成的，如果液体分子都在做无规则的运动，那么每个分子的运动方向和速率都在不断地改变。在不同时刻，各个分子的运动速率有大有小，运动方向也各不相同。悬浮在液体中的微粒就会不断地受到周围液体分子对它的撞击，如图 1-3-6 所示。

当悬浮微粒足够小，悬浮微粒受到的来自各个方向的液体分子的碰撞作用是不平衡的。在某一瞬间，微粒在某一方向上受到的碰撞作用较强，致使微粒产生沿该方向的加速度；在下一瞬间，微粒在另一方向上受到的碰撞作用较强，致使微粒的加速度方向改变，进而运动方向也发生改变。由于来自各个方向的碰撞作用所产生合力的大小、方向是无规则的，因而微粒运动的方向及运动的快慢都是无规则的。悬浮在液体中的微粒越小，在某一瞬间跟它相撞的分子数越少，碰撞作用的不平衡性表现得越明显；同时由于微粒的质量小，运动状态容易改变，布朗运动就越明显。悬浮在液体中的微粒越大，在某一瞬间跟微粒相撞的分子数越多，从不同方向撞击微粒的分子数就越相近，碰撞作用的不平衡性就表现得越不明显；同时，质量越大的微粒运动状态越不容易改变，因而布朗运动也越不明显。如果微粒足够大，以至于在各个方向上与微粒相撞的分子数几乎相等，那么就观察不到布朗运动了。

我们虽然无法直接看到分子的运动，但我们却能看到由分子无规则运动所引起的布朗运动。布朗运动虽然不是分子的运动，却间接反映了液体分子运动的无规则性。

讨论交流

如图 1-3-4 所示的是三个微粒做布朗运动每隔 30 s 位置的连线，可以看到它们的形状各不相同。根据这个实验事实，如何说明布朗运动不可能是由外界影响所引起的？说说你的理由，并与同学进行交流。

热运动和分子动能

进一步的实验表明，布朗运动随着温度的升高而愈加剧烈。这表示分子的无规则运动跟温度有关，温度越高，分子的无规则运动就越剧烈。因此，通常又把分子的无规则运动叫作**热运动**（thermal motion）。

做热运动的分子具有动能。由于分子数目巨大，分子之间碰撞频繁，其运动速率在不断变化，动能也不断地变化。因而描述单个分子的动能毫无意义，且偶然性极大。实际上我们是用大量分子动能的平均值来描述物体内大量分子运动的剧烈程度，这个平均值叫作分子热运动的平均动能。

温度升高，物体分子热运动加剧，分子热运动的平均动能增加，所以温度是分子热运动平均动能的标志。物体的温度越高，其分子平均动能也就越大。

自我评价

1. 关于扩散现象，下列说法正确的是（　　）

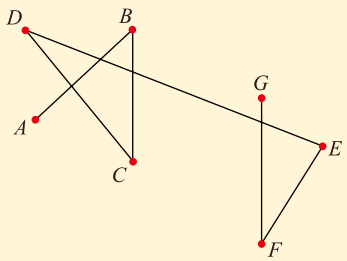
A. 物体的扩散现象是分子热运动引起的

B. 温度越高扩散得越快

C. 如果温度降到很低，扩散现象就会停止

D. 扩散现象只能发生在液体和气体中

2. 在观察布朗运动时，从某微粒在 A 点开始计时，每隔 30 s 记下微粒的一个位置，得到 B、C、D、E、F、G 等点，然后用直线按时间顺序依次连接，得到如图 1-3-7 所示的折线 $ABCDEFG$。那么，微粒在 75 s 末时的位置一定在 CD 线段的中点吗？为什么？



▲ 图1-3-7

3. 在较暗的房间里，从窗帘缝隙射进来的阳光中，可以看到悬浮在空气里的灰尘颗粒飞舞，这是不是布朗运动？请说明理由。

4. 有人说，物体的温度越高，组成物体分子热运动的平均动能就越大，因此物体的动能也就越大。他的说法错在哪里？

发展空间

课外阅览

研究布朗运动的意义

1827 年，英国植物学家布朗用显微镜观察采自南美洲的一种野花花粉时，发现花粉颗粒在水中不停地做无规则运动。起初，布朗认为是植物本身有生命才产生了这样的运动。他用当时保存了上百年的植物标本，取其颗粒进行实验，他还用了一些没有生命的无机物微末进行实验，结果都明显地看到了同样的现象。布朗把实验的经过和结果详细记录下来，写入了《植物花粉的显微观察》一书，书中写道："在经过多次重复的观察以后，我确信这些运动既不是由于液体的流动也不是由于液体的逐渐蒸发引起的，而是属于粒子本身的运动。"布朗当时并不能解释这种运动的原因，但他精于观察与实验，从而发现了问题，为后人的进一步研究做出了开拓性的贡献。

1877 年，法国物理学家德尔索指出，微粒的运动是由于受到液体分子从四面八方不平衡的撞击所引起的，并认为它为分子无规则运动的假设提供了有力的实验证据，但是这一观点因缺乏系统的定量解释，说服力仍然不足。直到 1905 年，爱因斯坦在德尔索论述的基础上发表了题为《关于热的分子运动论所要求的静止液体中悬浮小粒子的运动》的论文，首次从理论上对布朗运动进行研究，从统计角度定量解释了布朗运动现象，提出了描述布朗运动的理论，为分子动理论和统计力学的发展做出了重要的贡献。1908 年，法国物理学家佩兰以实验精确地证实了爱因斯坦等人理论的正确性，才终于肯定了分子不仅存在，并且总是处于不停的无规则运动状态。

布朗运动对于人们深入认识热运动本质以及分子动理论最终取得胜利都有很重要的意义。关于布朗运动的理论不仅用来研究许多自然现象，而且还可用来建立研究许多社会现象的模型。

1973 年美国的布莱克、斯科尔斯、莫顿共同研究得出反映金融交易规律的公式（即 B-S 公式）。这一公式，被认为是对金融经济学的划时代贡献，斯科尔斯和莫顿因此被授予了 1997 年度的诺贝尔经济学奖。B-S 公式就是根据爱因斯坦等关于布朗运动研究的成果进一步推导得到的。

从这里也可以看到，物理学对其他学科、其他领域的辐射作用，不仅表现在思维模式、方法论和工作语言等方面，而且也包括物理学理论本身。

4 分子间的相互作用力

物体由大量分子组成，分子又在不停地做无规则热运动，但许多物体在通常情况下都能以固体或液体这种凝聚状态存在，这是什么原因？

分子间存在相互作用力

活动

如图 1-4-1 所示，将两块表面洁净、平整的铅压紧，它们会“粘连”在一起，挂上 2 kg 的重物都不能把它们拉开。

这一现象说明了什么？



▲ **图1-4-1**　压紧的铅块会“粘”在一起

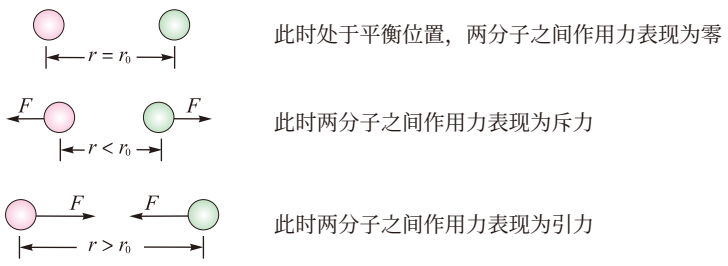
这个实验现象说明，分子间存在引力。正是分子之间引力的作用，使大量分子在一定条件下聚集在一起形成固体或液体；但分子间有间隙，却难以被压缩，这种情况下，分子之间的作用力表现为斥力。那么分子之间的相互作用有什么规律呢？

分子间存在相互作用，具体表现为引力或斥力。那么什么时候分子间作用力表现为引力，什么时候分子间作用力表现为斥力呢？

分子间作用力与距离的关系，跟以前学过的哪一个物理模型相似呢?

分子间作用力与距离的关系

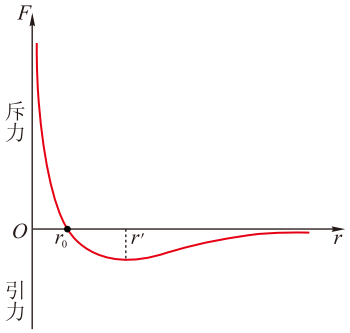
设想有两个分子，一个分子位于 O 点，另一个分子位于距离第一个分子 r 的地方。当 $r < r_0$ 时，分子间作用力表现为斥力；当 $r > r_0$ 时，分子间作用力表现为引力；当 $r = r_0$ 时，处于平衡位置，两分子间相互作用力表现为零，如图 1-4-2 所示（r_0 的数量级为 10^{-10} m）。



▲ **图1-4-2**　分子间作用力与距离的关系示意图

讨论交流

图 1-4-3 是分子间作用力与距离关系的图像，从中你能得到什么信息？请与同学们相互交流。



▲ **图1-4-3** 分子间作用力跟距离的关系

从图 1-4-3 所示的图像可以看出，分子间相互作用力 F 与分子间距离 r 有关。当 $r = r_0$ 时，分子间作用力 $F = 0$，这个位置称为平衡位置。

当 $r<r_0$ 时，分子间作用力 $F > 0$，即表现为斥力，并且距离 r 越小，力 F 越大。

当 $r>r_0$ 时，分子间作用力 $F < 0$，即表现为引力。引力与距离的关系比较复杂：当距离 r 从 r_0 处开始增大时，开始的一段，引力 F 增大；到某一距离处（图中的 r' 处），引力 F 增至最大；再往后，随着距离 r 的进一步增大，引力 F 将逐渐减小；当距离 r 增大到 $10r_0$ 左右时，引力 F 已经很微弱，一般可以忽略不计了。

固体、液体分子间的距离通常在 r_0 附近，多数情况下，液体分子间的距离比固体分子间的距离略大。气体分子间的距离更大，一般达到 $10r_0$ 以上，所以气体分子间的作用力很小，通常可以忽略不计。

内能

地面附近的物体受到地球的吸引，地球和这个物体组成的系统具有重力势能；将弹簧与物体连接，在弹簧拉伸或压缩时，弹簧和物体组成的系统具有弹性势能；两个电荷之间有引力或斥力的作用，两个电荷组成的系统具有电势能。两个分子之间有引力或斥力的作用，它们组成的系统也具有势能。我们把分子系统具有的势能叫作分子势能。分子势能的大小由分子间的相对位置决定。

一切分子都在永不停息地做无规则的热运动，物体中所有分子的热运动的动能和分子势能的总和，称为物体的热力学能，也称物体的**内能**（internal energy）。

根据分子动理论，温度反映了分子平均动能的大小；

而分子势能又跟分子间的距离有关。因此，物体的内能与其所处的状态（如温度、体积等）有关，而与物体如何达到这个状态的过程无关。物体的状态发生变化，物体所具有的内能也发生变化。

讨论交流

1. 两个物体 A、B，A 物体的温度比 B 物体高，我们能否判定 A 物体所具有的内能比 B 物体多呢？为什么？

2. 热量可以从内能较小的物体向内能较大的物体传递吗？试举例说明。

内能和机械能是两种不同的能量。内能源自分子的微观运动，即分子间无规则的热运动，是大量分子热运动的动能与分子势能的总和，用温度、体积等宏观物理量来表征。机械能是物体做宏观运动具有的能量，是物体做宏观运动的动能与势能的总和，与温度无关。在热现象研究中，一般不考虑物体的机械能。

分子动理论

分子动理论是在一定实验基础上总结出来的，简单地说，它包括：物体是由大量分子组成的；分子永不停息地做无规则运动；分子间存在着引力、斥力。

分子动理论是热力学的基础，用分子动理论可以解释很多热现象和物质的性质。

自我评价

1. 两个分子从距离很远到很难再靠近的过程中，下列说法正确的是（　　）

A. 分子间作用力先增大后减小

B. 分子间作用力表现为先是引力后是斥力

C. 分子力表现为引力时，它随距离的减小而增大

D. 分子力表现为斥力时，它随距离的增大而减小

2. 锯断的钢筋对接在一起，不能形成一个整体，而通过焊接却很容易将它们接上，这是为什么？

3. 质量相同，都处于标准状态的氢气和氧气，试比较它们以下几个物理量的大小：①分子数；②分子的平均动能；③内能。

4. 壶里的水加热到沸腾，继续加热，水的温度并不升高，内能如何变化？为什么？

5. 如图 1-4-4 所示，把一块洗净的玻璃板吊在橡皮筋的下端，使玻璃板水平地接触水面。如果你想要玻璃板离开水面，向上拉橡皮筋的力必须大于玻璃板所受的重力。动手做一做，并解释这是为什么。



▲ 图1-4-4

发展空间

课外阅览

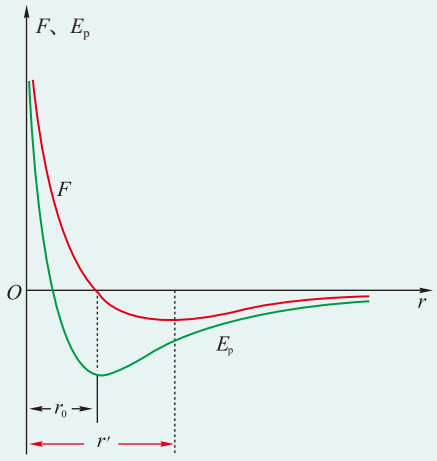
分子势能随分子间距离的变化

势能是由相互作用的物体间相对位置决定的。分子间存在着分子力，并且分子力做功与路径无关，只与分子间相对位置的变化有关，因此由分子组成的系统也具有势能。分子势能同样遵循“分子力做正功，分子势能减小；分子力做负功，分子势能增加”的关系。显然，分子势能的大小是由分子间的相对位置决定的。分子力比重力、弹力要复杂，故分子势能与分子间距离的关系也比较复杂。

当分子间距为 r_0 时，分子力为零。而当 $r > r_0$ 时，分子力为引力，若要增大分子间距必须要克服引力做功，即分子势能增加，因此在 $r > r_0$ 时，分子势能随分子间距离的增大而增大。

当分子间距 $r < r_0$ 时，分子力为斥力，若要减小分子间距，须克服斥力做功，即分子势能增加，因此在 $r < r_0$ 时，分子势能随着分子间距离的减小而增大。

图 1-4-5 把两分子间的分子力 F 与分子势能 E_p 随分子间距离 r 变化的关系示意性地画在一起。其中 r_0 处分子力 $F=0$，而分子势能 E_p 最小。



▲ 图1-4-5 分子力与分子势能随分子间距变化的曲线

5 分子热运动的统计规律

我们已经知道，构成物质的大量分子都在永不停息地做无规则运动，每一个分子的运动状态不同且都在不断变化，每一时刻的运动情况完全是偶然的，是不可确定的。那么，大量分子的无规则运动是否存在规律？

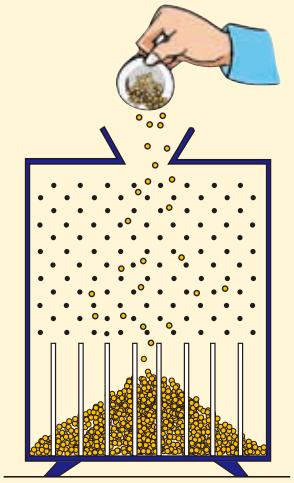
统计规律

观察思考

如图 1-5-1 所示的装置叫作伽尔顿板。其顶面中央放置一个漏斗，伽尔顿板上部沿垂直于纸面的水平方向钉有许多排列整齐的铁钉，下部用等长的木条竖直地隔成许多等宽的狭槽。

将一颗小塑料珠子从漏斗口放入，小珠子在下落过程中与许多铁钉相碰撞，最后落入某一个狭槽内。再将几颗小珠子逐个放入漏斗，观察这些小珠子是否落入相同的狭槽内，有什么规律吗？

若将大量的小塑料珠子投入漏斗口，观察小球落在狭槽内的分布，有什么规律？



▲ **图1-5-1**　大量小珠子最终的落点具有一定的规律性

实验结果发现，投入单颗小珠子，小珠子与铁钉碰撞后落入哪个槽中完全是偶然的或者说是随机的，少量小珠子在各个狭槽内的分布也带有比较明显的偶然性。当大量小珠子投入后，最终落入中部狭槽的小珠子总是较多，而落入两侧狭槽中的小珠子相对较少。多次重复实验发现，各槽中小珠子数目分布基本不变，但又不是绝对相同。由此可见，若将大量的小珠子作为一个整体，其分布状态是具有确定规律的。

这种研究大量分子整体所表现出来的规律的方法——统计方法，是一种重要的科学方法。



▲ 图1-5-2 骰子的统计规律

无序是分子热运动的基本特征。做热运动的单个分子某一时刻的位置、速度都具有不确定性，但大量分子的整体表现却是有规律的。这种规律性来自大量偶然事件的集合，称为统计规律性。就像投掷骰子（图 1-5-2），投掷一次，骰子出现的点数是偶然的，但投掷次数越来越多时，每一面出现的次数越来越接近投掷总次数的$\frac{1}{6}$，或者说，每一面出现的概率为$\frac{1}{6}$。

统计规律是大量偶然事件的整体性规律，它不是单个随机事件的简单叠加，而是系统所具有的必然性。对于大量微观粒子组成的系统，统计规律起主导作用。

分子运动速率分布

讨论交流

气体中的分子比较稀疏，但单位体积中的分子数还是相当多的，在标准状态下，1 cm^3 气体中约含有 2.7×10^{19} 个分子。大量分子永不停息地做无规则运动，致使分子之间不断发生碰撞。在标准状态下，一个空气分子在 1 s 内与其他分子的碰撞达 10^9 次之多。频繁的碰撞使每个分子运动速度的大小和方向频繁地发生改变，因此气体分子的运动是随机的，也是十分混乱的。对比伽尔顿板实验，你认为气体中以某一速率运动的分子数量分布情况可能遵循什么规律？

处于静止状态的气体，虽然每个分子在某一时刻速度的大小和方向都是随机变化的，但对整体而言，存在一种统计规律。这种统计规律表现为：在温度一定的条件下，平均来说气体分子的速率在区间 Δv 内的概率是确定的。也就是说，单个分子速率不可预测，但大量分子的速率分布遵循一定的规律。

英国物理学家麦克斯韦通过对大量气体分子的运动进行分析研究，并通过数学推导，得到一个分子速率分布函数。这个函数给出了一定温度下，每个速率区间的分子占总分子数的百分率。表 1-5-1 列出了氧气分子在 0℃和 100℃时速率分布的情况。

表1-5-1　氧气分子在0 ℃和100 ℃时速率分布的情况

按速率大小规划的区间/（m · s^{-1}）	不同温度下各速率区间的分子数占总分子数的百分率/%	
	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

根据表格中的数据我们可以绘制成直方图，如图 1-5-3 所示。

也可以按照速率分布情况绘制出气体分子的速率分布曲线，如图 1-5-4 所示。

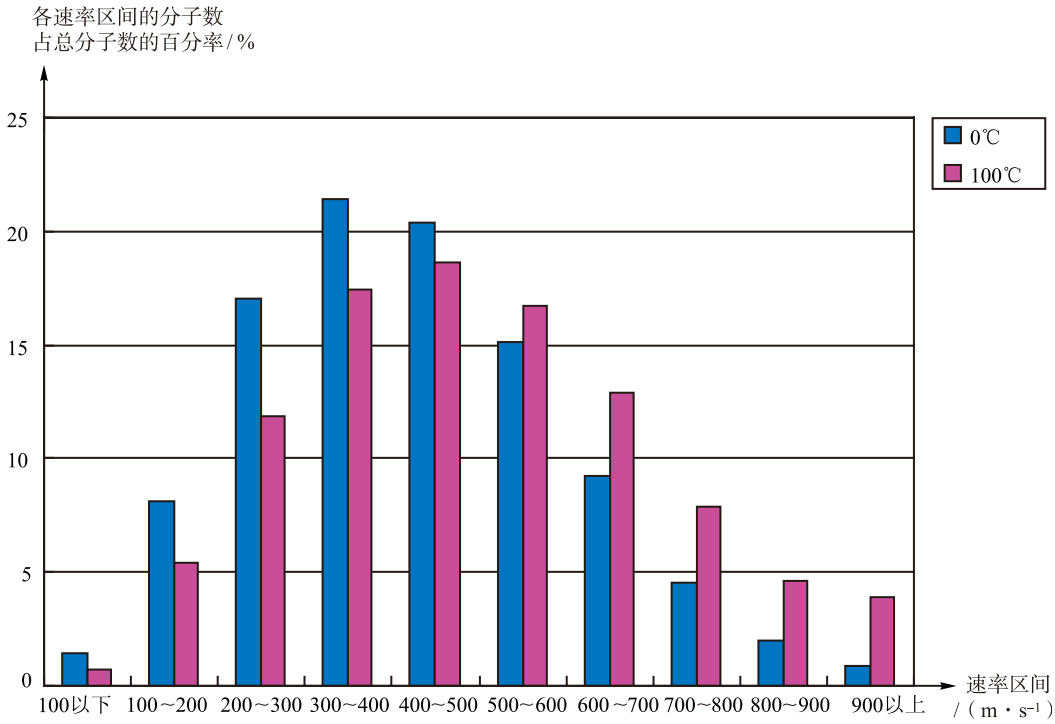
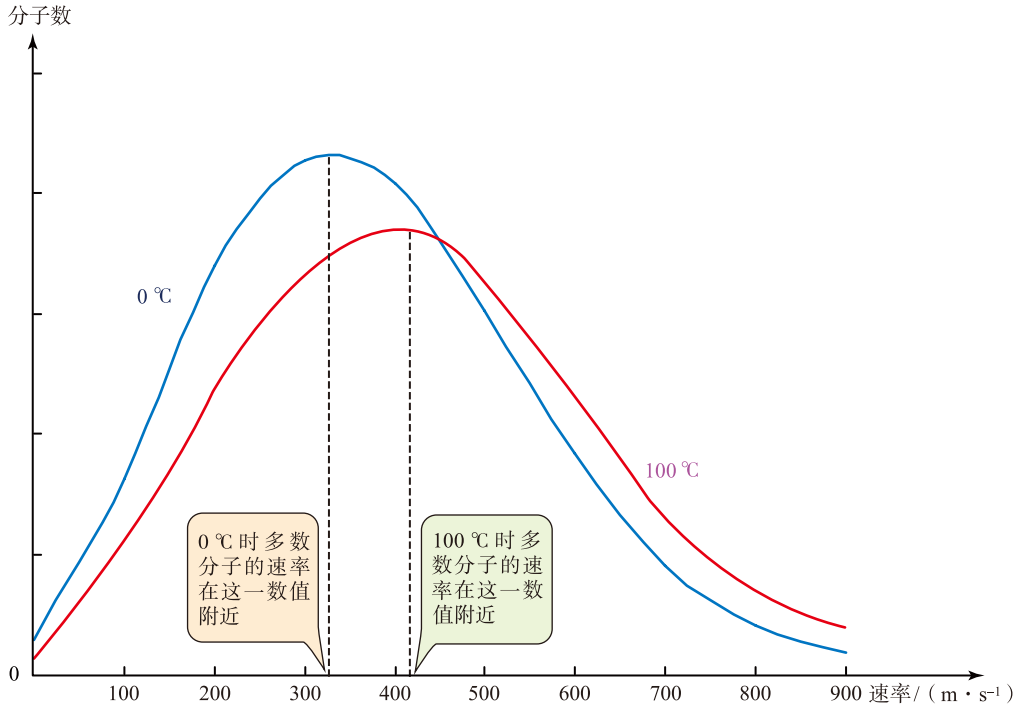


图1-5-3　氧气分子在0 ℃和100℃时的速率分布



▲ **图1-5-4** 氧气分子在不同温度下的速率分布曲线

正态分布曲线呈钟形，两边低，中间高，左右对称。

由分子速率分布曲线可知，0℃和 100℃时，大量气体分子中每一个分子的速率有大有小，但从大量分子的整体来说分子的速率是按照一定的规律分布的，即接近“正态”分布。当然，这两个温度下具有最大比例的速率区间是不同的：0℃时速率在 300 ~ 400 m/s 之间的分子最多，100℃时速率在 400 ~ 500 m/s 之间的分子最多。100℃的氧气中速率大的分子所占的比例要比 0℃的氧气多，其分子平均速率比0℃的氧气大。这也进一步印证了“温度越高，分子的热运动越剧烈”的事实。

对于一般气体，通过严格的理论推导可以得到，温度与分子热运动的平均动能成正比。温度是大量分子无规则热运动的宏观表现，它仅仅与大量分子热运动的平均动能有关。

自我评价

1. 下列关于气体分子热运动特点的说法中正确的是（　　）

A. 气体分子的间距比较大，所以不会频繁碰撞

B. 气体分子的平均速率随温度升高而增大

C. 气体分子的运动速率可由牛顿运动定律求得

D. 当温度升高时，气体分子的速率将偏离正态分布

2. 当温度升高时，气体分子的运动速率分布将如何变化？

3. 由气体分子速率分布规律可知，一般分子热运动的速率很大，在 200 ~ 600 m/s 之间，但是对放在几米远的香水，打开瓶盖后要过一会儿才能闻到香味，这是什么缘故？

4. 举出一个日常生活中表现统计规律的事例。

发展空间



课外阅览

统计力学的研究方法

统计力学依据微观粒子热运动所满足的力学定律，通过统计的方法研究系统的宏观性质，并揭示各种热现象的本质。热力学（我们将在第三章学习）则是把系统看成一个整体，从基本的热力学定律出发，研究系统的宏观性质及其变化规律。

由于微观粒子数目巨大（如 10^{23} 个），粒子之间碰撞频繁，用牛顿力学描述每个粒子的位置、速度毫无意义，且偶然性大。同时，微观粒子的热运动与系统的各种宏观热现象之间存在着内在的联系，即宏观量等于微观量的统计平均值。因而，我们用统计方法得出宏观量（压强、温度、体积、内能等）与微观量（分子的位置、速度、动能、动量、质量等）的统计平均值之间的关系，并从微观上进行解释。

总之，统计力学是分子热运动的微观理论，它所采用的统计方法是微观与宏观、统计力学与热力学之间建立联系的桥梁。

反思·小结·交流

• 学后反思

1. 分子动理论是整个热学的基础，是认识热现象和研究热现象的重要理论。本章估测油酸分子的直径的实验就用到了建立模型、化微观量测量为宏观量测量以及估算的方法来研究微观粒子的相关性质。

2. 扩散现象和布朗运动说明了分子在永不停息地做无规则的热运动；分子之间存在相互作用力。分子平均动能与温度有关，分子势能与物体的体积有关，物体的内能包含了所有的分子动能和分子势能，故物体的内能与物体的温度和体积有关，当然也跟分子的种类及数量有关。

3. 本章涉及一些描述微观粒子性质和运动状态的物理量，如分子的大小（直径）、质量、动能等。由于分子、原子数目惊人，在研究或测量前常常先对微观粒子进行数量级的估算，也可以通过阿伏伽德罗常量由宏观量求出相应的微观量，或用统计的方法对由大量粒子组成的宏观系统的物理性质及宏观规律做出微观解释。

• 自主小结

1. 分子动理论包含了哪几方面的内容？

2. 在估测分子大小时，固体、液体与气体有什么不同？阿伏伽德罗常量起到了什么作用？

3. 物体的内能从微观上来说包含了什么？从宏观上说，跟哪些因素有关？它与机械能有什么区别？

4. 大量微观粒子的热运动有规律可循吗？

• 相互交流

1. 物体是由大量分子组成的，如何证实这个说法呢？

2. 关于热现象的微观理论和宏观理论之间有什么联系？

本章复习题

1．从筷子上滴下一滴水，体积约为0.1 cm^3，这一滴水中含有水分子的个数最接近以下哪一个值？（已知阿伏伽德罗常量$N_A=6\times10^{23}/mol$，水的摩尔体积为$V_{mol}=18\ cm^3/mol$）（　　）

A．6×10^2个　　B．3×10^{21}个

C．6×10^{19}个　　D．3×10^{17}个

2．大量气体分子运动的特点是（　　）

A．分子的速率分布毫无规律

B．分子沿各个方向运动的机会相等

C．气体温度降低时，每个气体分子运动的速率都一定增大

D．气体温度升高时，气体分子运动的平均速率一定增大

3．对液体和固体来说，如果用μ表示摩尔质量，m表示单个分子的质量，ρ表示物质密度，V表示摩尔体积，V'表示单个分子的体积，N_A表示阿伏伽德罗常量。下列反映这些量之间关系的各式中，正确的是（　　）

A．$N_A=\dfrac{V}{V'}$　　B．$N_A=\dfrac{\mu}{V'}$

C．$V=\rho\mu$　　D．$V=\dfrac{\mu}{\rho}$

4．下列现象说明分子做无规则运动的是（　　）

A．水沸腾时冒出的“白汽”在空气中做无规则运动

B．把少许碳素墨水滴入水中，在显微镜下可以观察到碳颗粒的无规则运动

C．阳光从缝隙射入教室，在阳光下看到尘埃不停地运动

D．经过搅拌，沙粒在水中杂乱地运动

5．有甲、乙两个分子，甲分子固定不动，乙分子由无穷远处逐渐向甲分子靠近，直到不能再靠近为止，在这个过程中（　　）

A．分子力总对乙分子做正功

B．乙分子总是克服分子力做功

C．先是分子力对乙做正功，然后乙分子克服分子力做功

D．先是乙分子克服分子力做功，然后分子力对乙分子做正功

6．下列关于布朗运动的说法中，正确的是（　　）

A．布朗运动也叫作热运动

B．布朗运动是液体分子无规则运动的反映

C．液体温度越低，布朗运动越明显

D．悬浮微粒越小，布朗运动越明显

7．既然分子之间存在引力，为什么使劲压两片玻璃也很难结合起来，但是给玻璃接触处加热一直到熔化，就能使它们黏合？请根据分子间作用力的特点进行解释。

8．清晨，草叶上的露珠是由空气中的水蒸气凝结而形成的。这一物理过程中，水分子间的作用力如何变化？

9．设想将1 g水均匀分布在地球表面，估算1 cm^2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$5\times10^{14}\ m^2$。（结果保留1位有效数字）

10．在“用油膜法估测油酸分子的大小”的实验中，某同学操作步骤如下：

①取一定量的无水酒精和油酸，制成一定浓度的油酸酒精溶液；

②在量筒中滴入一滴该溶液，测出它的体积；

③在蒸发皿内盛一定量的水，再滴入一滴油酸酒精溶液，待其散开稳定；

④在蒸发皿上覆盖透明玻璃，描出油膜形状，用透明方格纸测算油膜的面积。

（1）请指出该同学操作中的错误，并加以改正。

（2）若油酸酒精溶液体积浓度为0.10%，一滴溶液的体积为4.8×10^{-3} mL，其形成的油膜面积为40 cm^2，则可估测出的油酸分子直径为多大？

（3）油酸分子直径的数量级为10^{-10} m，有

位同学的测量结果远大于这个数量级，试分析可能的原因。

11. 请用学过的知识解释以下实验事实：

（1）固体很难被压缩；

（2）细绳不易被拉断；

（3）糖在热水中溶解得快；

（4）冰冻食品也会变干。

12. 统计规律在自然和社会现象中是普遍存在的。通过调查，了解日常生活中表现出统计规律的事实。例如，调查统计高中二年级同学的身高，画出身高统计分布直方图，并说出学生身高分布遵循的规律。



第二章

固体、液体和气体

主题一　固体和液体

- 固体和固体材料
- 液体

主题二　气体实验定律

- 温度和温标
- 实验：探究气体等温变化的规律
- 气体的等容变化和等压变化

“忽如一夜春风来，千树万树梨花开。”诗句描绘了壮美的冰雪景象。“雪消冰又释，景和风复暄。”当天气转暖，阳光普照，冰雪会融化，水不断蒸发，形成水蒸气……。大自然中，物质的三种状态在不断转化。这些变化，遵循着一定的规律。

1 固体和固体材料

固体的形状、物理性质和微观结构复杂多样，由此也形成了各种固体不同的类型和性质，构造出纷繁的世界。那么，固体大致怎么分类呢？不同类型各有什么特征？

晶体和非晶体

活动

用放大镜观察食盐、明矾、玻璃和松香碎小颗粒，看看它们的形状有什么不同。

固体可分为**晶体**（crystal）和**非晶体**（noncrystal）两大类。金刚石、云母、明矾、雪花等具有规则的几何形状，都是晶体，如图 2-1-1 所示；玻璃、松香等不具有规则的几何形状，是非晶体。



（a）黄水晶



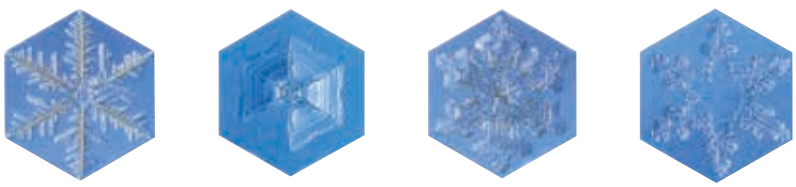
（b）明矾



（c）钻石

▲ **图2-1-1** 晶体

在放大镜下观察雪花，可以看到雪花晶体呈六角形，如图 2-1-2 所示。



▲ **图2-1-2** 雪花晶体图案

实验探究

取一张云母片和一块盖玻片，在云母片和盖玻片的一面均匀地涂上石蜡。用钳子夹住小铁钉放在酒精灯上烧红后，将钉尖接触云母片和盖玻片未涂蜡一面中央的某一点。观察云母片和玻璃片上石蜡熔化区域的形状，并分析热量在云母片和玻璃片上的传递过程有什么不同。由此你能得出什么结论？

实验表明，晶体在不同方向上的导热性能不同，而非晶体在各个方向上的导热性能相同。

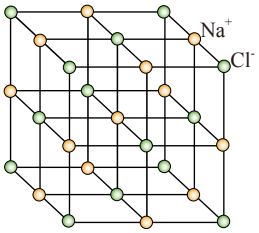
大量事实证明，晶体在不同的方向上不仅导热性能不同，而且机械强度和导电性能等性质也不一样。也就是说，晶体的一些物理性质与方向有关，这种特性叫作**各向异性**（anisotropy）。而非晶体的各种物理性质，在各个方向上都是相同的，叫作**各向同性**（isotropy）。

晶体的热膨胀也具有各向异性。如石墨受热时，沿某些方向膨胀，而沿另一些方向则收缩。

天然具有规则几何形状且各向异性的大块晶体被称为**单晶体**（monocrystal），如石英、明矾等；由许多晶粒构成的晶体被称为**多晶体**（polycrystal），如金属、岩石等。单晶体在技术上有重要应用，例如，制造各种晶体管就要用纯度很高的单晶硅或单晶锗等半导体材料的单晶体。

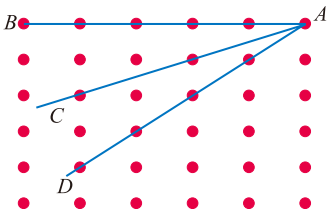
晶体的微观结构

我们知道，晶体是由分子、原子、离子等微粒组成的，如果用点来表示这些微粒的中心，那么，这些点在晶体内部的空间就会形成一个有规则的、周期性排列的结构，称为晶体的点阵结构。如图 2-1-3 所示是食盐晶体中钠离子（Na^+）和氯离子（Cl^-）构成的点阵结构。



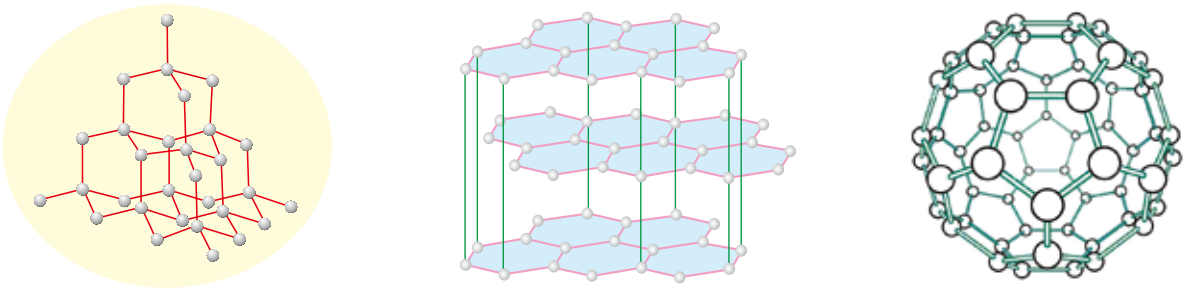
▲ **图2-1-3**　食盐晶体的点阵结构

晶体为什么会表现出各向异性呢？如图 2-1-4 所示，从某一微粒出发，沿不同的方向画等长的线段 AB、AC、AD，则三条线段上的微粒数目并不相等，这表明不同方向上微粒排列的情况不同。因此在不同的方向上会表现出不同的物理性质。同一种物质微粒也可以形成不同的晶体结构，从而表现出不同的物理性质。金刚石、石墨和足球烯都是由碳原子构成的，但它们的性质差异很大。



▲ **图2-1-4**　各向异性的微观解释

图 2-1-5 是它们不同的结构图示。



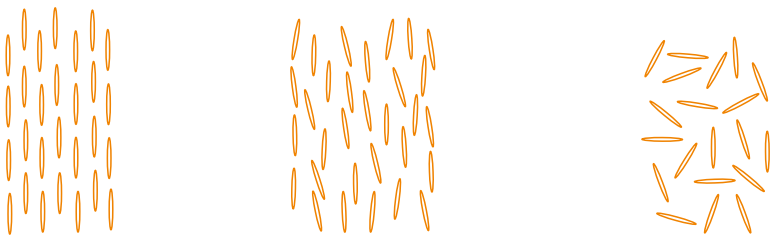
（a）金刚石的晶体结构　（b）石墨的晶体结构　（c）足球烯的晶体结构

▲ **图2-1-5**　金刚石、石墨与足球烯晶体结构比较

液晶

晶体具有点阵结构，液体中分子完全无序，有一些物质可以呈现介于晶体和液体之间的状态。这种物质尽管失去固态物质的刚性，获得了液体的易流动性，却保留着部分晶体物质的各向异性的特性。我们将这种物质称为**液态晶体**（liquid crystal），简称液晶。

晶体中分子具有取向有序性和位置有序性，这些分子虽能在平衡位置附近的小范围内振动，但平均说来，它们一直保持这种高度有序的排列状态，如图 2-1-6（a）所示；当处于液体状态时，这两种有序性完全丧失，分子可以随意地移动和转动，如图 2-1-6（c）所示。当处于液晶状态时，分子位置有序性丧失，但仍倾向于保持在固体中确定的取向，分子排列有序性介于固体和液体之间，如图 2-1-6（b）所示。



（a）晶体　（b）液晶　（c）液体

▲ **图2-1-6**　晶体、液晶和液体分子的排列示意图

液晶分子的排列会因温度、压强、摩擦、电磁作用、

容器表面的差异等外界条件的微小变动而发生变化，由此引起液晶光学性质的改变，其电光效应在显示器件方面有广泛的应用。液晶的电光效应是指它的干涉、散射、衍射、旋光、吸收等受电场调制的光学现象。如有一种液晶，在外加电压的影响下，会由透明状态变成混浊状态而不再透明；去掉电压，又恢复透明。液晶显示（Liquid Crystal Display，即 LCD）就是利用液晶的这些性质而发展起来的。这种显示元件用于电子手表、电子计算器、计算机以及其他仪器中，如图 2-1-7 所示。



▲ **图2-1-7**　常见的液晶显示器

还有一种液晶，温度逐渐升高时颜色会按照红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的顺序改变；温度降低，颜色又按相反顺序变回来。利用液晶的这种性质可以指示温度。在医学上，在皮肤表面涂一层液晶，由于肿瘤部分的温度与周围正常组织的温度不一样，液晶会显示不同颜色。

天然存在的液晶不多，大多数液晶是人工合成的。迄今为止科学家已发现几千种有机化合物具有液晶态。

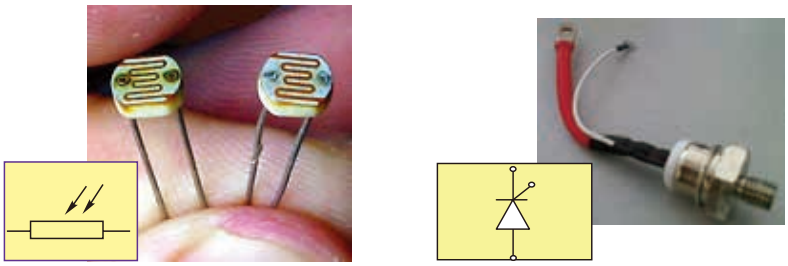
半导体材料

半导体材料（semiconductor material），是指电阻率为 10^{-5} ～ 10^{7} Ω · m，介于金属和绝缘体之间的材料。一般情况下，金属的电阻率随温度升高而升高，其变化是线性的，但半导体材料的电阻率与温度的关系比较复杂。

半导体材料是制作半导体器件和集成电路的主要材料，这是因为它有许多特殊性质。半导体材料在光、热、磁、电等作用下会引起相应的物理效应和现象，如有些半导体材料对温度、光照非常敏感，外界温度、光照的微小改变能使它的电阻率迅速发生变化。

利用半导体材料的各种特性可以制成不同的半导体器件，如热敏电阻、光敏电阻、光电池、可控硅、高压硅堆、半导体激光器等，如图 2-1-8 所示。这些器件在工业自动控制、医疗、国防军工、通信、计算机以及网络信息技术等领域中有着广泛的应用。

在半导体产业发展中，经历了以硅、砷化镓、氮化镓



（a） 光敏电阻　　（b）可控硅

▲ **图2-1-8**　半导体元器件

为代表的三代半导体材料。我国的半导体材料研究和生产是从 20 世纪 50 年代首次制备出高纯度的锗开始的，后来改用硅（Si）元素制作半导体器件，不仅使晶体管的类型和品种增加、性能提高，而且迎来了大规模和超大规模集成电路的时代。以砷化镓（GaAs）为代表的半导体材料的发现，促进了微波器件和光电器件的迅速发展。

从目前电子工业的发展来看，尽管有各种新型的半导体材料不断出现，半导体硅材料仍以丰富的资源、优质的特性、日臻完善的工艺以及广泛的用途等综合优势而成为当代电子工业中应用最多的半导体材料。半导体硅材料分为多晶硅、单晶硅、硅外延片以及非晶硅、浇注多晶硅、淀积和溅射非晶硅等。电子工业的发展历史表明，没有半导体硅材料的发展，就不可能有集成电路、电子工业和信息技术的发展。

纳米材料

在各种固体材料中，有一种新型材料异军突起，那就是纳米材料。**纳米**（nanometer）是长度单位，1 nm = 10^{-9} m，这相当于 10 ～ 100 个原子紧密排列在一起的尺度。

科学研究表明，许多固体材料当厚度、长度和宽度中有一个在纳米范围（1 nm ～ 100 nm）时，或将宏观物体细分成超微颗粒（纳米级）后，将显示出许多奇异的特性，即它们的光学、热学、电磁学、力学以及化学方面的性质跟大块固体相比会有显著的不同。人们把三维空间中至少有一维处于纳米尺度范围的固体材料，称为**纳米材料**（nanomaterial）。

纳米金属材料是 20 世纪 80 年代中期研制成功的，后来相继问世的有纳米半导体薄膜、纳米陶瓷、纳米磁性材料和纳米生物医学材料等。由于纳米材料性能独特，在日常用品、新材料等方面，以及工业、医疗、国防军工和科技等领域有着十分广泛、诱人的应用前景，促进了材料科学技术领域的革命。

随着我国对纳米材料持续地政策支持和研发投入，未来我国的纳米材料研发将保持快速发展态势。不过，纳米材料在生产技术上还存在不少困难，因为用研磨的方法是不可能获得超细粒粉末的。目前，一般选用较为特殊的物理或化学加工方法，来获得细微的纳米粉末。如用激光蒸发凝固法，来制取陶瓷超微粒粉末，得到的微粒直径仅几纳米。不过这些制作方法不仅成本很高，且生产规模也极有限，因而在生产技术和应用领域方面还有不少难关需要攻克。

自我评价

1. 某物质表现出各向异性，是由于组成该物质的微粒（　　）

A. 数目较多的缘故　　B. 数目较少的缘故

C. 在空间的排列不规则　　D. 在空间按一定的规则排列

2. 是否所有的物质从固态到液态，或从液态到固态的转变，都要经过液晶态？试举例说明。

3. 没有电源，任何电器都不能工作，为什么有些小计算器长年不换电池，仍能正常工作？寻找一下这些小计算器中的电池，查一查它们是什么类型的电池，这些电池是什么材料制成的？

4. 关于新材料的开发与应用，下列说法正确的是（　　）

A. 纳米材料的运用，对人们总是有利的

B. 半导体材料是具有优异特性的微电子材料

C. 所有的晶体管和集成电路都是由硅材料制成的

D. 低损耗的光导纤维是现代光纤通信的重要材料

5. 材料的日新月异推进了人类文明的发展。请查阅资料，了解人们使用各种材料的历史。

发展空间

课外阅览

蓝色发光二极管

发光二极管（LED）由镓（Ga）、砷（As）、磷（P）、氮（N）等元素的化合物制成，当其中的电子与空穴复合时能辐射出可见光。砷化镓二极管发红光，磷化镓二极管发绿光，碳化硅二极管发黄光。

我们知道，通过红、绿、蓝的三基色可以合成白光。红色、绿色发光二极管在20世纪中叶已经问世，但要产生照明用的白色光源，就必须要有蓝色发光二极管。

20世纪80年代，日本名古屋大学的赤崎勇和天野浩选择氮化镓材料，向蓝色发光二极管这个世界难题发起挑战。1986年，两人首次制成高质量的氮化镓晶体，并于1989年成功研发出蓝色发光二极管。

自1988年起，中村修二也开始研发蓝光二极管。与两位日本同行一样，他选择的也是氮化镓材料，但技术路线完全不同。20世纪90年代初，中村修二也研制出了蓝色发光二极管，与名古屋大学团队相比，他发明的技术更简单，成本更低。至此，将发光二极管用于照明的最大技术障碍已被扫除，被誉为“人类历史上第四代照明”的LED灯呼之欲出。

因发明“高亮度蓝色发光二极管”，日本科学家赤崎勇、天野浩和美籍日裔科学家中村修二获得了2014年诺贝尔物理学奖。

2 液 体

跟固体一样，液体分子之间的距离很近，这使得液体具有一定的体积，很不容易被压缩。液体分子热运动时，在一个平衡位置附近振动一小段时间后，又会转移到另一个平衡位置附近振动，因而液体具有流动性，没有一定的形状。而且，分子在液体里的移动比固体中容易得多，所以液体的扩散比固体的扩散要快。

液体还有哪些值得我们关注的性质呢？



▲ **图2-2-1** 蜘蛛网上面的液珠串

表面张力

图2-2-1的照片是沾有小水滴的蜘蛛网。也许你会为

自然界所创造的艺术品拍案叫绝，但你是否想过，水滴的形状为什么都是球形或椭球形呢？

观察思考

在装满水的杯子里小心地把一枚面值 1 分的硬币放在水面上，如图 2-2-2 所示，观察并在纸上画出硬币边缘水面的形状。轻轻向下压硬币，你看到什么现象？缓缓加大压力，观察硬币没入水中前水面发生的变化。

硬币的密度比水大，它为什么能“浮”在水面上？

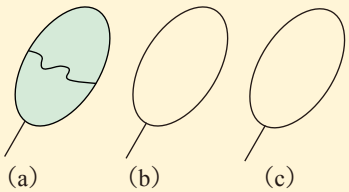


▲ **图2-2-2**　“浮”在水面上的硬币

实验探究

将一根细线宽松地系在一个铁丝框架相对的两边上。把框架浸到洗涤剂溶液里再取出来，框架上便会出现一层液膜，如图 2-2-3（a）所示。用烧热的针刺破线的某一侧的液膜，看看出现了什么现象。

重做一次实验，用烧热的针刺破线的另一侧的液膜，看看出现了什么现象。将两次实验观察到的液膜的形状分别画在图（b）和图（c）上。由此你能得出什么结论？



▲ **图2-2-3**　表面张力实验

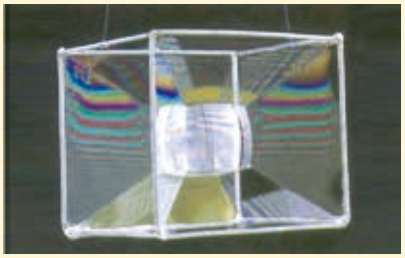
实验表明，液体表面好像张紧的橡皮膜，具有收缩的趋势。液体表面存在的这种收缩力叫作**表面张力**（surface tension）。正是它，使液体的表面积趋向最小。

利用数学方法可以证明：体积一定的物体，当其形状为球形时，表面积最小。据此，你就可以解释为什么液滴的形状都是球形或椭球形了。

在失重的太空，水滴呈完美的球形。在地球表面，由于重力的作用，小的水滴近似于球形，而较大的水滴则呈椭球形。

活动

在洗脸盆中放半盆肥皂水（或洗涤剂的水溶液），将用铜丝弯折成的正四面体和正方体框架，浸没在肥皂水中后再取出来，欣赏由肥皂膜形成的奇妙的曲面，如图 2-2-4 所示。

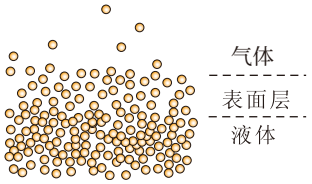



▲ 图2-2-4 肥皂膜形成的奇妙曲面

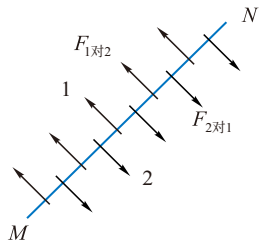
利用特制的洗涤剂，把铜丝弯折成各种不同的形状，可以观察到更多形状各异的肥皂膜。

液体表面张力的微观解释

液体跟气体接触的表面存在一个薄层，叫作表面层，表面层里的分子比液体内部稀疏些，如图 2-2-5 所示。在液体内部，分子间距离接近平衡时的距离 r_0。但在液体的表面层，由于分子之间的间距较大，分子之间的相互作用表现为引力。如果在液面上任意画一条分界线 MN（图 2-2-6），则分界线两侧的分子之间就存在着相互作用的吸引力，就像你要把弹簧拉开些，弹簧表现出收缩的趋势一样，这些相互吸引力的宏观表现就是液体的表面张力。正是因为这种张力的存在，有些小昆虫才能无拘无束地在水面上行走，硬币也才能“浮”在水面上。



▲ 图2-2-5 液体不同层面的分子疏密程度不同



▲ 图2-2-6 表面张力方向示意图

毛细现象

活动

在洁净的玻璃板和石蜡块上滴一滴水，看一看小水滴的形状有什么不同。

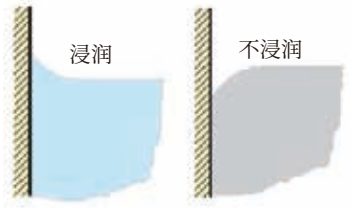
在洁净的玻璃板上滴一滴水，水会附着在玻璃板上形成薄层，把一块洁净的玻璃片浸入水中再取出来，玻璃的表面会沾上一层水。这种液体会润湿固体并附着在固体表面的现象叫作**浸润**（wetting）。水不能附着在石蜡上，水珠会在荷叶上自由滚动(图 2-2-7)，这种液体不会湿润固体，也不会附着在固体表面的现象叫作**不浸润**（non-wetting）。

液体放在玻璃容器中，液面与器壁接触的位置是弯曲的，有的向上弯，有的向下弯（图 2-2-8）。这也是浸润与不浸润两种现象的区别。

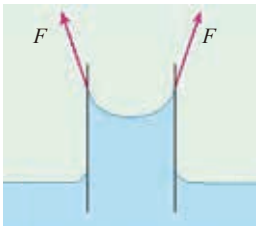
浸润液体在细管中的液面是凹形的，边缘处的液体分子受到器壁分子的作用力方向如图 2-2-9 所示，它们的合力使管中液体向上运动。当管中液体上升到一定高度，液柱所受重力与这个合力相等时，管内的液体停止上升，达到平衡。同样的分析也可以解释不浸润液体在细管内下降的现象。



▲ **图2-2-7**　荷叶表面的液滴

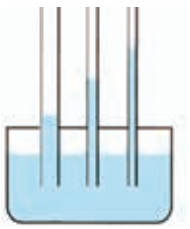


▲ **图2-2-8**　器壁处的液面形状



▲ **图2-2-9**　边缘处液体分子受到的力

把几根内径不同的细玻璃管插入水中，可以看到，管内的水面比容器里的水面高，管子的内径越小，里面的水面越高，如图 2-2-10 所示。像这样浸润液体在细管中上升，不浸润液体在细管中下降的现象，称为**毛细现象**（capillarity），能够明显观察到毛细现象的管叫毛细管。



▲ **图2-2-10**　对于一定的液体和一定材质的管壁，管的内径越小，毛细现象越明显

活动

玻璃器皿中有一些红墨水，将一张餐巾纸和一张塑料片的一端放入液体中，过一段时间观察，有什么现象发生？想一想：这是为什么？

在自然界和日常生活中有许多毛细现象的例子，砖块吸水、毛巾吸汗、粉笔吸墨水都是常见的毛细现象，这些物体中有许多细小的孔道起着毛细管的作用。

有些情况下毛细现象是有害的。例如，建筑房屋的时候，在夯实的地基中毛细管又多又细，它们会把土壤中的水分引上来，使得室内潮湿，因而在建房时地基上要铺设油毡，防止毛细现象发生。在农耕方面，地下的水也会沿着土壤中的毛细管上升到地面上来。如果要保存地下的水分，就应当经常锄松地面的土壤，破坏土壤表层的毛细管，以减少水分的蒸发，这就是农谚所说的“旱耪田”。

自我评价

1. 如图 2-2-11 所示，水黾被喻为“池塘中的溜冰者”，它在水面上行走时，既不会划破水面，也不会浸湿自己的腿，而且还能像溜冰运动员一样优雅地跳跃和玩耍。请你解释一下，水黾为什么不会掉进水里？



▲ **图2-2-11** 水黾站在水面上

2. 下列现象中，由液体的表面张力引起的是（　　）

A. 小木块能够浮在水面上

B. 有时缝衣针能浮在水面上不下沉

C. 喷泉喷射到空中形成一个个球形的小水珠

D. 用布料做成的雨伞，雨水也不会穿过伞面滴下来

3. 液体表面具有收缩趋势的原因是什么？

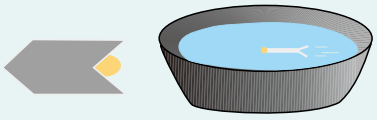
4. 要想把衣料上的蜡或油脂去掉，只要把两张吸附性好的纸分别放在这部分衣料的上面和下面，然后用熨斗来熨一熨就可以了，这是为什么？

发展空间

实验室

自动小船

把一块塑料泡沫剪成如图 2-2-12（a）所示的小船状，在船尾镶上一小块肥皂。或把火柴杆劈开，劈开的长度约占总长度的四分之一，镶上一小块肥皂，就做成了一只“小船”。把这只“小船”放在水盆中［图 2-2-12（b）］，看看在水面上会发生什么现象。你能解释所发生的现象吗？



(a)　　(b)

▲ **图2-2-12** 塑料泡沫制成的小船

3 温度和温标

气体既无一定形状也无一定体积，在研究气体的热学性质时，可用体积、温度、压强等宏观物理量来描述气体的状态，这几个量叫作气体的状态参量。

我们在日常生活中都有这样的经验：打足气的自行车在烈日下曝晒，常常会爆胎；压瘪了的乒乓球浸没在热水中，会重新鼓起来……。这些现象都表明气体的压强、体积、温度三个状态参量之间存在着一定的关系。

让我们首先讨论温度。

气体的体积是指气体所充满的容器的体积，所以气体体积就是贮放气体容器的容积。体积的国际单位制单位是 m^3，常用单位还有升（L）、毫升（mL）。

当大量分子对器壁进行碰撞时，就可以使器壁受到一个持续的、均匀的作用力，这便在器壁上表现出压强这个宏观的物理量。压强的国际单位制单位是帕斯卡，简称帕，符号Pa。

热平衡定律和温度

温度是描述热现象时最常用到的概念。

什么是温度？有一种通俗的说法，温度就是物体冷热的程度。但是，凭人的冷热感觉来判断物体温度的高低，有可能是不准确的，甚至可能是错误的（图 2-3-1）。从测量出发，也可以说，温度就是某种温度计的读数。我们在物理学上，需要对温度的概念给出科学的定义，对温度的测量给出客观的依据。



▲ **图2-3-1**　人的感觉未必是正确的

讨论交流

为什么凭人的冷热感觉来判断物体温度的高低是不准确的？能设计一个小实验加以证明吗？

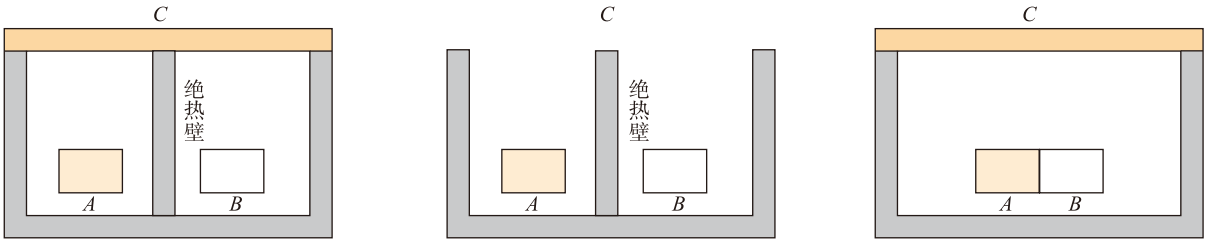
从微观上看，**温度**（temperature）是处于热平衡系统

的微观粒子热运动强弱的量度。从宏观上看，温度是系统的一个状态参量，是系统自身分子热运动性质的宏观表现。

热力学系统是指由大量分子组成，并与周围环境发生相互作用的宏观客体，它是热力学的研究对象，简称**系统**。系统的周围环境简称**外界**。

假设有两个热力学系统，原来各自处在一定的平衡态。在没有外界影响的情况下，让这两个系统互相接触，使它们之间发生热传递，这种接触叫作热接触。实验表明，热接触后两个系统的状态都将发生变化，热的变冷，冷的变热。经过一段时间后，两个系统的状态不再变化。这表明最后对热传递来说，两个系统已经达到平衡，我们把这种平衡叫作**热平衡**（thermal equilibrium）。这时这两个系统的温度相同。

再假设有两个热力学系统 A、B，把它们用绝热壁隔开，使它们不发生热接触，如图 2-3-2（a）所示。打开顶部的绝热盖，如图 2-3-2（b）所示，则 A 与 B 都跟外界的大环境发生了热接触。这里所谓外界大环境，包括整个实验室以及室外，它可以看作一个状态不变的热力学系统 C。经过一段时间，A、B 都与 C 达到热平衡，即 A、B 都与 C 不再发生热传递了。这时，再盖上顶部的绝热盖，并把中间的绝热壁撤走，使 A、B 发生热接触，如图 2-3-2（c）所示。A 和 B 也处于热平衡，即两个系统的状态不再发生变化。



▲ **图2-3-2** 热平衡实验

由此我们得出结论：如果两个系统分别与第三个系统处于热平衡，则这两个系统彼此也必定处于热平衡。这个规律称为**热平衡定律**。

也就是说，如果系统 A 与系统 C 温度相同，系统 B 与系统 C 的温度也相同，则系统 A、B 的温度必定相同。

温标

上面的实验表明，我们利用具有确定初始状态的第三个系统 C，就可以判定 A 和 B 是否处于热平衡之中，即判定它们的温度是否相同。

系统 C 温度的变化通常是通过它某一可观测的性质的变化加以标志的，这个性质必须随物体的冷热程度有单调而显著的变化，比如液体的体积、气体的压强、气体的体积、导体的电阻等。

温度数值的标定方法称为**温标**（thermometric scale）。国际通用的温标主要有摄氏温标和热力学温标。

1. 摄氏温标

建立一种经验温标需要三个要素：(1) 选择某种测温物质（如水银，见图 2-3-3）；(2) 选定固定点（如以冰的正常熔点为一个固定点，水的正常沸点为另一个固定点）；(3) 进行分度（如以冰的正常熔点为 0℃，水的正常沸点为 100℃，二者之间等分为 100 小格）。以上举例的这种温度数值表示法就叫作**摄氏温标**，是瑞典天文学家摄尔修斯（A.Celsius）于 1742 年确定的。在摄氏温标中，温度的单位是℃，读作“摄氏度”。



▲ **图2-3-3**　水银温度计

2. 热力学温标

1848 年，英国物理学家开尔文（W.Thomson）从理论上建立了一种不依赖于任何测温物质及测温属性的温标，称为**热力学温标**或**绝对温标**。由它所确定的温度叫作热力学温度或绝对温度，热力学温度的单位是开尔文，简称开，符号是 K。

1960 年国际计量大会根据热力学温标对摄氏温标进行了重新定义：如果以 t 表示摄氏温度的数值，T 表示绝对温度的数值，则有

$$t/℃ = T/K - 273.15$$

在表示温度变化时，有1 ℃ = 1 K。

自我评价

1. 热力学平衡态和力学平衡态有什么区别？

2. 太阳中心的温度是 10^7 K，太阳的表面温度是 6000 K，太阳内部不断发生热核反应，所产生的热量以恒定不变的速率从太阳表面向周围散发。试问：太阳整体处于热平衡吗？

3. 水银温度计浸在冰水中时，水银柱的长度是 4.0 cm；温度计浸在沸水中时，水银柱长度为 24.0 cm。

（1）温度计浸在某种沸腾的化学溶液中时，水银柱的长度为 25.4 cm，试求该溶液的沸点。

（2）在室温 28 ℃时，水银柱的长度为多少？

发展空间

课外阅览

温度大观

根据宇宙大爆炸理论，宇宙诞生于 100 多亿年前的大爆炸中，初生时它的温度在 10^{39} K 以上。此后，宇宙不断膨胀，温度急剧下降。几分钟后，当温度降到 10^9 K 时，宇宙中合成了第一个稳定的复合核素——^{4}He。几十万年过去了，宇宙温度降到了 4000 K 时，随着中性原子的有效复合，宇宙变得透明了。今天，宇宙的温度已经冷却到 2.735 K（微波背景辐射的温度）。

太阳中心的温度是 10^7 K，这是热核聚变所需的温度。太阳表面温度是 6000 K。金星表面的温度是 460 ℃，即 733 K 左右，在那里铅、锌都要熔化。地球表面的平均温度为 15 ℃，即 288 K 左右，10^9 种生物大分子可以在这样的环境中生存。在一个大气压下，氧在 90 K 时液化，氮在 77 K 时液化，液态氢的最高温度是 20 K，而氦在 4 K 的低温下变成液体。因此，粒子加速器中用液氦包裹线路，以实现低温超导。

当代科学实验室里能够产生的最高温度是 10^8 K，最低温度是 2×10^{-8} K。

人类生存的环境，一般在 300 K 左右，上下变化不超过几十开。如果地球的温室效应使平均气温升高 3 K，海平面将上涨 2 ~ 5 m，海水所淹没的肥沃土地将令农业减产 25%，10 亿人将被迫背井离乡。在地球发展史上产生的冰河期，平均温度降低 10 ℃左右，就导致大批物种灭绝。可见，保护地球，保护我们的家园，是多么重要。

4 实验：探究气体等温变化的规律

目的与原理

当气体状态发生变化时，一般情况下体积、温度、压

强这三个物理量都要发生变化。一定质量的某种气体如果在状态变化时，其温度保持不变，这种变化叫作**等温变化**。

本实验的目的是探究在温度不变的情况下，一定质量的某种气体其压强随体积变化的定量规律。

我们知道，一定质量的气体在温度不变时，体积越小压强越大，由此猜测：其气体压强可能与体积成反比。为了验证这一猜想，可以选取一段空气柱作为研究对象，在保证其温度、质量一定的条件下，改变并且测量空气柱的体积 V，同时测量它在不同体积下的压强 p。建立 p - $\frac{1}{V}$ 坐标系，将实验所得数据在坐标系中描点，得到 p - $\frac{1}{V}$ 图像。看一看这条曲线是什么形状，你就可以从中得出一定质量的气体在温度不变的情况下，p、V 之间遵从的规律。

实验设计

对这个实验，可以利用常规的仪器进行设计，也可以利用传感器来测量压强。

1．方案一

如图 2-4-1 所示，气柱玻管如同注射器一样分活塞和外管两部分。活塞的中心轴上有一细玻璃管，其下端与被测气体相通，上端与压强计相连，压强计的指针直接指示出管内气体的压强。整个装置安装在固定架上，固定架上设有体积标尺，指示出管内气体的体积。

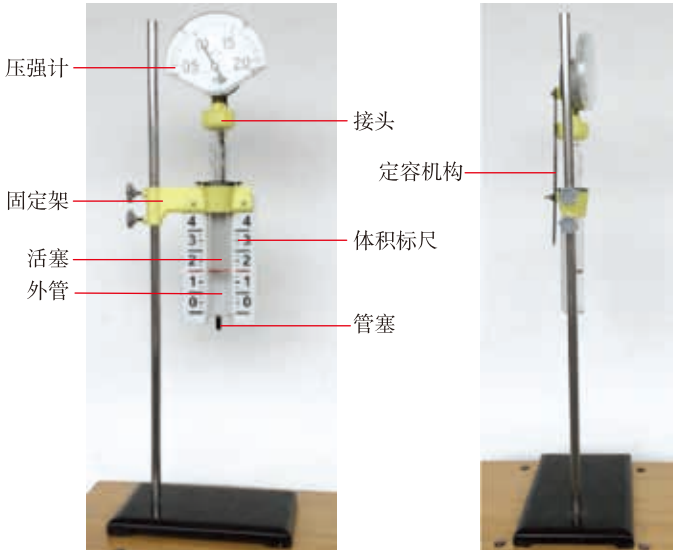
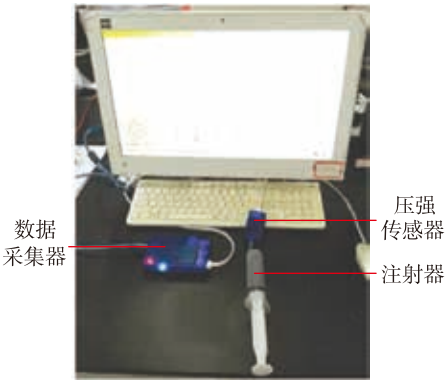


图2-4-1　方案一实验装置



▲ 图2-4-2 方案二实验装置

2. 方案二

如图 2-4-2 所示，用注射器密闭一定质量的气体并接入压强传感器，压强传感器通过数据采集器与计算机相连，由此计算机获得了气体的压强数值。从注射器壁上的刻度可直接读出气体的体积。启动相应程序，缓慢改变注射器内气体的体积，并将其输入程序中，即可得到所需的图线。

实验操作

1. 按照图 2-4-1（或图 2-4-2）所示连接装置，并仔细检查装置的密封性。

2. 把活塞顶端置于刻度“ 2 ”处（或某一刻度处），记下管内空气的体积 V 和对应的压强 p。

3. 缓慢推动活塞，用同样的方法得到多组体积和压强的测量值，将这些值填入表 2-4-1 中（或输入计算机）。

表2-4-1 实验数据

实验次数	1	2	3	4	5	6
V/cm^3						
$\frac{1}{V}$/cm^{-3}						
p/kPa						

4. 建立 p - $\frac{1}{V}$ 坐标系，根据表 1 的记录值将所测数据在坐标系中描点，在图 2-4-3 上作出 p - $\frac{1}{V}$ 图像（或在计算机中直接读取图线）。

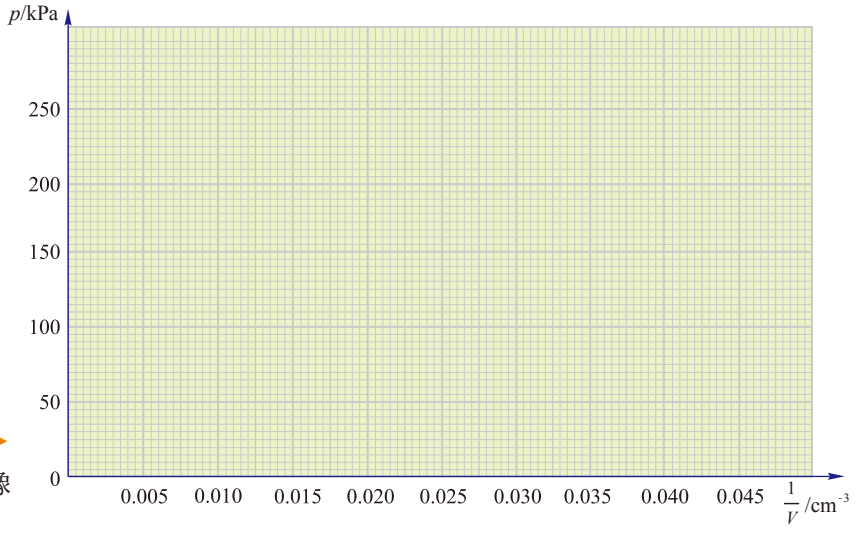


图2-4-3 p - $\frac{1}{V}$ 图像

实验分析与结论

讨论交流

1. 为什么在实验过程中装置必须密封？
2. 推动活塞时为什么要强调“缓慢”？快速推动会出现什么后果？
3. 推动活塞时受到摩擦力的作用，这对实验结果有影响吗？
4. 在方案一中可以直接作 p - V 图像得到实验结果吗？
5. 方案一和方案二各有什么优点和缺点？

实验表明：一定质量的某种气体，在温度保持不变的情况下，压强 p 与体积 V 成反比。其表达式为

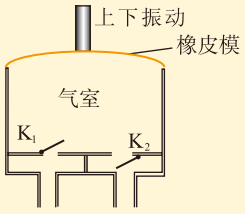
$$pV = 常量$$

自我评价

1. 从深水处的鱼的嘴里吐出一个小气泡。在小气泡向水面上升的过程中，气泡的大小会发生怎样的变化？为什么？（不考虑水温的变化）

2. 用手压一只打足了气的气球，往往在气球还没有被压扁时就爆了。请解释这一现象。

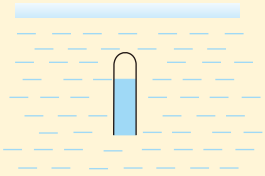
3. 人们常常用充气泵为鱼缸内的水补充氧气。图 2-4-4 为充气泵气室的工作原理图。设大气压强为 p_0，气室内气体的压强为 p，气室通过阀门 K_1、K_2 与空气导管相连接。则下列说法正确的是（　　）



▲ 图2-4-4

A. 向上拉橡皮膜时，$p > p_0$，K_1 关闭，K_2 开通
B. 向上拉橡皮膜时，$p < p_0$，K_1 关闭，K_2 开通
C. 向下压橡皮膜时，$p > p_0$，K_1 关闭，K_2 开通
D. 向下压橡皮膜时，$p < p_0$，K_1 关闭，K_2 开通

4. 如图 2-4-5 所示，一支开口向下的短试管在水内一定的深度处于静止状态，如果将它稍向上提起一些，放手之后，试管将如何运动？如果将它稍下压一些，放手之后，试管将如何运动？为什么？


▲ 图2-4-5

发展空间

课外阅览

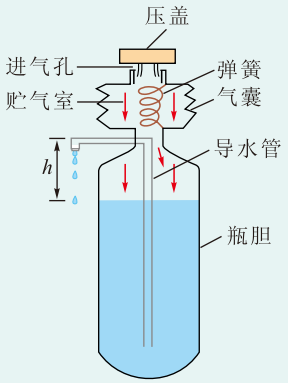
气压保温瓶的原理

在温度保持不变的条件下气体压强与体积的关系，具有实际的应用价值。气压保温瓶

就是应用这个关系的一个例子。

气压保温瓶的内部结构如图 2-4-6 所示，其工作过程如下：导水管插入瓶胆中，盖好瓶盖后，用力向下缓慢压瓶盖上端的压盖，使气囊上部的进气孔封闭，这时，瓶胆和贮气室中的空气和水蒸气由原来的开放系统变成封闭系统。压盖继续下压，则由软塑料（气囊）构成的贮气室被压缩，封闭气体的体积减小，压强从原来的 p_0（外界大气压）逐渐增大到 p，当封闭气体的压强 p 与外界大气压之差 $\Delta p = p - p_0 = \rho g h$（$h$ 为导水管出水口到瓶内水面的高度差）时，瓶内的水即从导水管流出。

当撤去加在压盖上的压力后，弹簧将使气囊恢复原状，同时打开进气孔，外界空气进入气囊，贮气室和瓶胆内的气体压强又恢复到与外界大气压相同，水就不再流出。



▲ **图2-4-6** 气压保温瓶的结构

5 气体的等容变化和等压变化

气体的等容变化

一定质量的气体，在保持体积不变的情况下，压强与温度的变化（即等容变化）遵循怎样的规律呢？

实验探究

如图 2-5-1 所示，玻璃管里封闭着一定质量的空气，旋紧紧固螺钉使活塞不能移动，可以保证气体状态变化时体积保持不变。

1. 将封闭气体的玻璃管一端浸入水中，一段时间后，封闭气体温度与水温相同。

2. 不断改变水温，读出对应于不同热力学温度时气体压强的大小。

3. 在表格中记录实验数据并进行分析处理，能够得出什么结论？



▲ **图2-5-1** 探究气体等容变化规律

序号	1	2	3	4	5
温度/ K					
压强/10^5 Pa					

实验表明 ：一定质量的某种气体，在体积不变的情况下，压强 p 与热力学温度 T 成正比。其表达式为

$$\frac{p}{T}=\text{常量}$$

气体的等压变化

把图 2-5-1 中的螺钉松开，使活塞能上下自由移动。同样把封闭气体的玻璃管一端浸入水中，经过一段时间，使封闭气体的温度与水温相同，并且气压表示数与开始时相同（若有差别，可用手缓慢调节活塞的位置），读出封闭气体的热力学温度 T 及体积 V 的值。改变水温，多做几次，可以得到 ：一定质量的气体，在保持压强不变的情况下，体积 V 与热力学温度 T 成正比，即

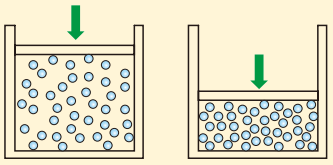
$$\frac{V}{T}=\text{常量}$$

这个结论表明了一定质量的气体等压变化的规律。

气体实验定律的微观解释

讨论交流

从微观角度来说，气体的压强由什么因素决定？如图 2-5-2 所示，一定质量的气体发生等温变化时，如果其体积压缩到原来的 n 分之一，气体的压强怎样变化？



▲ 图2-5-2　气体压缩时分子变密集

对一定质量的气体，温度不变时，意味着气体分子的平均动能是一定的。气体体积越小，分子的密集程度越大，单位时间内撞击单位面积器壁的分子数越多，气体的压强就越大，这就是对气体等温变化规律的微观解释。

一定质量的气体，体积保持不变，则单位体积中的分子数也保持不变。当温度升高时，分子热运动的平均动能增大，这使得单位时间内撞击到器壁单位面积上的分子数增多，同时也使得分子撞击器壁时对器壁的撞击力增大，从而使得气体的压强随之增大。这就是对气体等容变化规律的微观解释。

一定质量的气体，当温度升高时，气体分子热运动的平均动能增大，这会使气体对器壁的压强增大。要使压强保持不变，必须减小气体分子的密集程度，使单位时间内与单位面积器壁碰撞的分子数减少，这在宏观上就表现为气体体积的增大。这就是对气体等压变化规律的微观解释。

理想气体

三个气体实验定律，都是在压强不太大（相对大气压而言）、温度不太低（相对室温）的条件下通过实验总结出来的。当压强很大、温度很低时，由上述定律计算的结果与实际测量结果有很大的差别。尽管如此，很多实际气体，特别是那些不容易液化的气体，如氢气、氧气、氮气、氦气等，在通常的温度和压强下，其性质与实验定律的结论符合得很好。

正如我们以前建立的各种理想模型一样，为了概括和研究不同气体在一定条件下所遵守的共同规律，我们设想有一种气体，在任何温度、任何压强下都遵守气体实验定律，这样的气体称为**理想气体**（ideal gas）。理想气体也是一种理想模型。

讨论交流

理想气体在客观上真正存在吗？为什么？你可以参照建立质点、点电荷等理想模型的意义，谈谈建立理想气体模型的意义。

在温度不太低、压强不太大的条件下，一切实际气体都可以看作理想气体来处理，而不会出现太大的偏差。怎样从微观上解释这个现象呢？

如果温度不太低、压强不太大，气体都是“稀薄”的，即气体分子的间距远远大于分子本身的线度，分子本身的大小可以忽略，而且分子间除了相互碰撞的过程以外，相互作用力也可以忽略不计。气体实验定律正是在这样的条件下得出的。

如果温度很低、压强很大，气体分子热运动的激烈程度大大降低，气体分子的间距大大缩小，这时气体分子本身的大小已不能忽略，而且相邻分子间（除碰撞过程外）的相互作用力也不能忽略了，从而气体实验定律就完全不适用了。

由此说来，所谓理想气体，从微观上看，其分子都是不占有空间的质点，而且分子间除碰撞过程外完全没有相互作用力。正因为如此，理想气体才严格遵守气体实验定律。在压强很大的情况下，真实气体中气体分子靠得很近，分子占有的体积不能忽略，分子间的作用力也不能忽略，气体实验定律将不再适用。当温度很低时，气体可能液化，更谈不上遵守气体实验定律了。

例题示范

问题　一定质量的理想气体，由状态 A 经状态 B 变为状态 C，其中 A 到 B 过程为等压变化，B 到 C 过程为等容变化。已知 $V_A=0.3\ \mathrm{m}^3$，$T_A=T_C=300\ \mathrm{K}$，$T_B=400\ \mathrm{K}$。

（1）求气体在状态 B 时的体积大小；

（2）从微观的角度说明气体由状态 A 到 C 过程中压强如何变化。

分析　理想气体遵循气体实验定律。气体从状态 A 到 B 是等压变化，有 $p_A=p_B$。

解　（1）根据气体等压变化规律，有

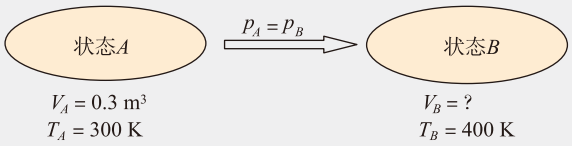
$$\frac{V_A}{T_A}=\frac{V_B}{T_B}$$

已知状态 A 的参量 V_A、T_A，状态 B 的参量 T_B，则

$$\begin{aligned} V_B&=\frac{T_B}{T_A}V_A\\ &=\frac{400}{300}\times 0.3\ \mathrm{m}^3\\ &=0.4\ \mathrm{m}^3 \end{aligned}$$

（2）气体从状态 A 到 B 是一个等压膨胀过程，由于气体体积增大，导致分子密集程度降低，因此单位时间内在单位面积器壁上的撞击次数就会减少。气体从状态 B 到 C 是一个等容降温过程，由于温度降低，分子的平均动能减小，导致大量分子撞击器壁过程中对器壁的平均作用力减小。综上所述，气体压强降低。

拓展 求解理想气体变化过程中的状态参量，除了正确选择气体实验定律外，更要理清每个状态的参量，包括已知和未知的，这样可以避免在复杂的状态变化中出现张冠李戴的现象。我们可以通过以下简单操作来理清状态参量（以本题为例）：



自我评价

1. 从微观角度来分析，气体的压强由什么因素决定？

2. 剩有半瓶热水的热水瓶经过一段时间后，拔瓶口的软木塞时觉得很紧，请分析产生这种现象的原因。

3. 什么是理想气体？试从宏观角度和微观角度分别说明。

4. 一定质量的气体，当温度保持不变时，压强随体积的减小而增大；当体积保持不变时，压强随温度的升高而增大。从微观角度看，这两个使压强增大的过程有何区别？

5. 氧气瓶在车间充好气，瓶内压强达到 $1.5\times10^7\ \mathrm{Pa}$。把氧气瓶运送到工地上，测得瓶内的压强为 $1.35\times10^7\ \mathrm{Pa}$。如果车间里的温度为 27 ℃，工地的温度为 -3 ℃。若忽略氧气瓶因热胀冷缩造成的容积偏差，试判断氧气瓶在运输过程中是否存在漏气现象。

6. 用打气筒给自行车打气，每按一次打气筒可打入压强为 $1.0\times10^5\ \mathrm{Pa}$ 的空气 $125\ \mathrm{cm}^3$，自行车的内胎容积是 2.0 L。假设车胎内原先没有空气，那么按了 20 次后，胎内空气的压强有多大？打气过程中温度变化忽略不计。

发展空间

课外阅览

理想气体状态方程

我们一般用 p、V、T 三个参量描述一定质量的某种理想气体的状态。前面的每个实验定律所谈的，都是当某一参量不变时另外两个参量的变化关系。在更多的变化过程中，三个参量都可能变化，它们会遵循怎样的关系呢？

假设一定质量的理想气体从某一状态 A（p_A，V_A，T_A）变化到任一状态 C（p_C，V_C，T_C）。我们可以找到一个中间态 B（p_B，V_B，T_B），使气体先从 A 态等温变化到 B 态（即 $T_B=T_A$），再从 B 态等容变化到 C 态（即 $V_B=V_C$）。根据气体实验定律，有

$$p_AV_A=p_BV_B$$

$$\frac{p_B}{T_B}=\frac{p_C}{T_C}$$

由第二式得 $p_B=\frac{p_C}{T_C}T_B$，代入第一式，有

$$p_AV_A=\frac{p_C}{T_C}T_BV_B$$

而 $T_A=T_B$，$V_B=V_C$，因此

$$\frac{p_AV_A}{T_A}=\frac{p_CV_C}{T_C}$$

也就是说

$$\frac{pV}{T}=C\text{（常量）}$$

上述关系被称为一定质量的某种理想气体的**状态方程**（equation of state）。其中的常量 C 与气体的种类及质量有关。

反思 · 小结 · 交流

• 学后反思

1. 物质中分子排列的状况决定了物质的存在状态，即固态、液态、气态。

2. 固体可分为晶体和非晶体。晶体微粒的内部是一个规则、周期排列的结构，所以在形状和物理特性（导热性能、机械强度、导电性能等）上区别于非晶体。半导体、纳米材料、液晶是当代社会令人瞩目的新型材料，成为当代材料革命的重要内容之一。

3. 在液体的表面层，由于分子之间的间距较大，分子之间的相互作用表现为引力，这是形成表面张力的原因。液体与固体之间的浸润与非浸润现象以及毛细现象等，都是液体与固体间的薄层分子间的相互作用造成的。

4. 气体的三个状态参量在温度不太低、压强不太大的情况下和实验定律非常接近，在低温或高压的情况下实验定律和实际情况出现了较大的偏差，为此人们建立了在任何温度、任何压强下都遵从气体实验定律的理想气体模型。

• 自主小结

1. 晶体和非晶体有哪些区别？分析其中的原因。
2. 纳米材料、液晶材料、半导体材料有什么物理特性？它们在实际中有哪些应用？
3. 液体为什么具有表面张力？能否列举出一些表面张力现象在实际中的应用实例？

4. 什么是浸润和不浸润？什么是毛细现象？各举几个实际例子。

5. 气体的状态变化过程中，三个状态参量间遵从什么规律？这些规律背后的微观本质又是什么？

• **相互交流**

1. 如果气体的质量也在变化，这时三个状态参量之间会遵从什么样的规律呢？

2. 分别从宏观和微观角度说明真实气体与理想气体的主要区别。

本章复习题

1. 晶体具有哪些宏观特征？其微观结构有哪些特点？

2. 新材料的开发与应用极大地满足了社会的需求，以下关于新材料的说法中，正确的是（　　）

A. 半导体可用来制作LED灯的发光部件

B. 从导电性能看，半导体的电阻率小于金属导体的电阻率

C. 利用液晶的光学特性，制造的显示器能显示出各种颜色

D. 在力学性能方面，纳米材料具有高强、高硬和良好的塑性

3. 把锋利的玻璃块尖端放在火焰上烧熔，它的尖端就变钝了，请解释这一现象的原因。

4. 液体表面张力产生的原因是（　　）

A. 表面层的液体分子受到空气分子吸引

B. 液体表面层中的分子间距离比内部小，分子间相互作用表现为引力

C. 液体表面层中的分子间距离比内部大，分子间相互作用表现为引力

D. 液体表面层中的分子间距离比内部大，分子间相互作用表现为斥力

5. 对于气体的压强，甲同学提出：气体压强是由气体分子间的斥力产生的；乙同学认为在失重的情况下，密闭容器内的气体对器壁没有压强。请判断两位同学的观点正确与否，说说你判断的依据。

6. 某容器的容积为5 L，里面的气体压强为5个标准大气压。如果保持温度不变，把容器开关打开后，容器中剩下的气体是原来的百分之几？剩下的气体密度大小又如何变化？已知外界压强为1个标准大气压。

7. 一定质量的气体，在保持体积不变的情况下，温度从27 ℃升高到127 ℃，其压强是增大还是减小？变为原来的多少倍？

8. 给汽车轮胎打气，使胎内的空气达到规定的压强，冬天和夏天打入胎内的空气质量是否相同？冬天还是夏天打入的多一些？

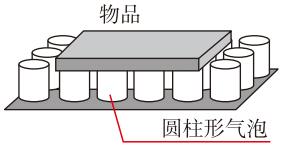
9. 对于一定质量的理想气体：

①在温度不变的情况下被压缩，气体的内能是否改变？

②在体积不变的情况下压强减小，气体的内能是否改变？怎样改变？

③在压强不变的情况下体积减小，气体的内能是否改变？怎样改变？

10. 如图所示的减震垫上布满了圆柱状薄膜气泡，每个气泡内充满体积为V_0、压强为p_0的气体。当平板状物品平放在气泡上时，气泡被压缩。若气泡内气体可视为理想气体，其温度保持不变，当每个气泡内的体积压缩到V时，每个小气泡与物品接触面的面积为S，求此时每个气泡内气体对接触面处薄膜的压力大小。



▲第10题图



第三章

热力学定律

主题一　热力学第一定律

- 热力学第一定律
- 能量守恒定律

主题二　热力学第二定律

- 热力学第二定律

天地万物，每时每刻都在变化，无不遵循能量守恒定律。时间之箭，一去不返，自然界一切自发的宏观过程都不能无条件地返回。

蓝天、白云、青山、绿水，是我们追求的理想的自然环境，呵护地球家园，是我们每个人的责任。

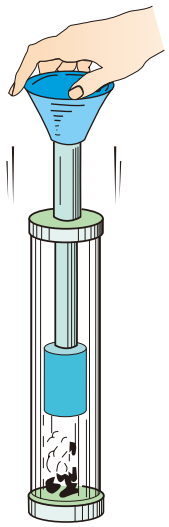
1 热力学第一定律

我们已经知道改变物体内能的两种方式——做功和热传递，它们对物体内能的改变是等效的。那么功、热量与内能之间有什么定量关系吗？

热力学第一定律

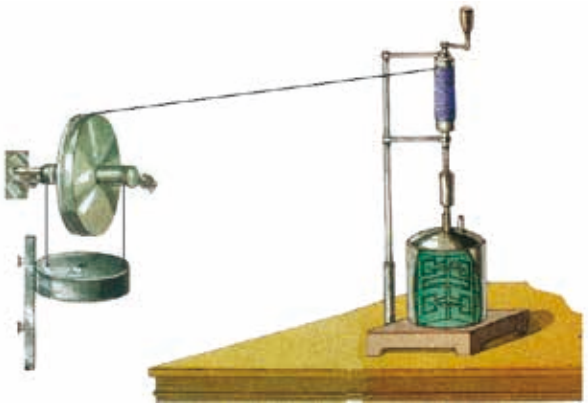
活动

如图3-1-1所示，在一个配有活塞的厚壁有机玻璃筒底放入一小团蘸了乙醚的硝化棉，用力迅速压下活塞，观察筒底硝化棉的变化，并解释原因。



▲ 图3-1-1 压缩气体做功

英国物理学家焦耳为了精确测定热量与功之间的数量关系，从1840年到1879年，一共做了400多个实验，其中有两个最具代表性。一个是桨叶搅拌实验，如图3-1-2所示。用绝热性能良好的材料将装水的容器包好，容器中安装由叶片组成的搅拌器，重物下落时带动搅拌器转动，叶片与水之间，以及水与水之间因摩擦而生热。在这个过程中，系统与外界之间没有热量的交换，只是通过外界做功的方式与外界交换能量，这种过程称为绝热过程。



▲ 图3-1-2 桨叶搅拌实验

焦耳的实验表明，改变重物质量和重物下落的高度，只要重力做功相等，水温升高都相等，即系统内能的变化是相同的。这说明在热力学系统的绝热过程中，系统内能的增加量ΔU等于外界对系统所做的功W，即

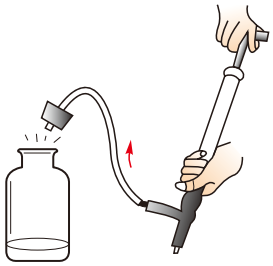
$$\Delta U=W$$

如果系统对外界做功，这时W取负值，ΔU也为负值，表示内能减少。

观察思考

如图3-1-3所示，广口玻璃瓶内装少量水，水面上方有无色的水蒸气，用带孔的橡皮塞塞住瓶口，给瓶内打气，当瓶塞“砰”地弹出时，观察瓶内的变化，并解释原因。

焦耳的另一个代表性实验是利用电流的热效应给水加热，如图3-1-4所示。下落的重物带动发电机转动发电，产生的电流通过浸没在水中的电阻丝，电流的热效应使容器中的水温升高。实验表明，不管电流大小和通电时间如何变化，只要产生的电热相等，系统升高的温度都相等，即系统内能的变化是相同的。这说明在外界没有对系统做功的过程中，系统内能的增加量ΔU等于系统从外界所吸收的热量Q，即

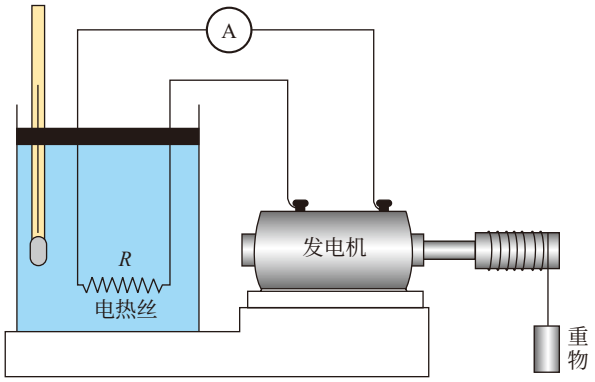


▲ **图3-1-3**　气体对外做功，本身内能减少

$$\Delta U=Q$$

如果系统向外界放热，这时Q取负值，ΔU也为负值，表示内能减少。

在系统跟外界同时发生做功和热传递的过程中，系统



▲ **图3-1-4**　功电热转换实验

内能的增加量 ΔU 等于系统从外界吸收的热量 Q 与外界对系统所做的功 W 之和。这个关系叫作**热力学第一定律**(first law of thermodynamics)，用公式表示为

$$\Delta U = Q + W$$

例题示范

问题 一定质量的气体从外界吸收热量3.2×10^5 J，对外做功4.0×10^5 J，气体的内能如何变化，变化了多少?

分析 气体从外界吸收热量，Q取正值；气体对外做功，W取负值。

解 根据热力学第一定律，气体内能的改变量为

$$\begin{aligned}\Delta U &= Q+W\\ &= 3.2\times10^5\,\text{J} - 4.0\times10^5\,\text{J}\\ &= -8\times10^4\,\text{J}\end{aligned}$$

ΔU为负值，表示气体的内能减少了，且减少量为8×10^4 J。

拓展 应用热力学第一定律解题时，首先要写出热力学第一定律的表达式，然后明确已知量（如ΔU、Q或W）的正负值，最后根据所求结果的正负值来确定系统的吸放热情况、做功情况或内能的增减情况。

第一类永动机不可能制成

随着人们在生产过程中对动力需求的日益增多，兴起了制造永动机的热潮。所谓永动机，即不需任何动力和燃料，能持续不断地对外做功的机器。人们也把这一类永动机叫作“第一类永动机”。

讨论交流

在20世纪20年代，德国发行了一张关于“第一类永动机”的明信片——“拿爱因斯坦开玩笑”，如图3-1-5所示。这种“永动机”为什么不能实现？理由是什么？

根据热力学第一定律，物体对外做功，即$W<0$；物体做功后回到原来的状态，即$\Delta U=0$；则物体一定要从外

界吸收热量，即$Q>0$。可见，要使物体既对外做功又不必吸收热量的第一类永动机是不可能制成的，因为它违背了热力学第一定律。因此，也有人将热力学第一定律表述为“第一类永动机是不可能制成的”。



▲ **图3-1-5**　关于永动机的明信片漫画

1755 年，法国科学院宣布：“本科学院从今以后不再审查有关永动机的一切设计。”

自我评价

1. 如果用 Q 表示物体吸收的热量，用 W 表示物体对外界做的功，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？

2. 用活塞压缩气缸里的气体，对气体做功 1200 J，同时气缸向外散热 300 J，气缸中气体的内能如何变化，变化了多少？

3. 一定质量的气体，从外界吸收了 6.2×10^5 J 的热量，内能增加了 3.5×10^5 J，是外界对气体做功还是气体对外界做功，做了多少功？

发展空间

走向社会

在日常生活、工农业生产等方面，我们会遇到很多有关热传递、做功使物体的内能变化的实例。通过调查，说出仅通过热传递使物体内能变化，或仅通过做功使物体内能变化，或同时发生热传递和做功使物体内能变化的实例。

2　能量守恒定律

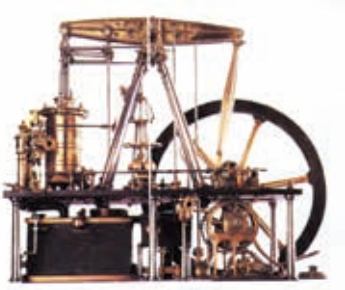
回顾物理学史，我们可以看到能量守恒定律的建立离不开自然哲学、物理实验和物理理论这三个方面的必要准备。

发现能量守恒定律的历史背景

17世纪，人们已经认识到与运动相联系的某个量是守

恒的。笛卡尔、莱布尼兹都提出了运动中守恒的量，但仅局限于机械运动，没有深入到其他运动。

18世纪初，英国的纺织、冶金、军火、造船等工业迅速发展，同时动力不足问题也日益尖锐。在这种社会需求的推动下，蒸汽机（图3-2-1）的发明和不断改进，成为英国工业发展的动力。到18世纪80年代，蒸汽机普遍使用，宣告了蒸汽机时代的来临。蒸汽技术的成就，令人信服地证明了内能可以转化为机械能，极大地推动了热学理论的发展。由此可见，技术的进步对科学的发展也是一种促进。



▲ **图3-2-1** 18世纪蒸汽机

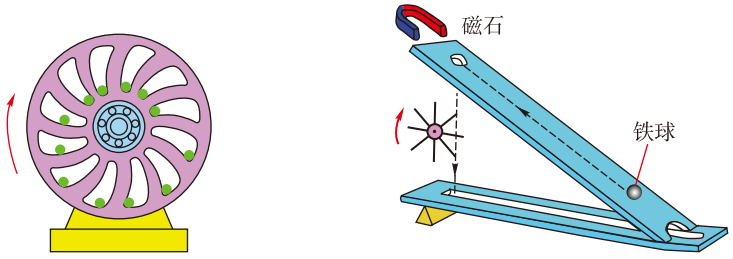
从18世纪末到19世纪初，各种自然现象之间的普遍联系相继被发现，能的概念被引入。电磁学、光学的迅速发展，使得热运动和其他运动形式之间的相互转化具有十分重大的理论和实际意义。化学和生物学的研究，使人们进一步认识到不同形式的能都是可以相互转化的。



▲ **图3-2-2** 卡诺（Sadi Carnot，1796—1832）

1800年，意大利物理学家伏打（A.Volta，1745—1827）发明了可将化学能转化为电能的伏打电池；8年后，英国化学家戴维（H.Davy，1778—1829）发明了电弧灯，实现了电能向光能的转化；1824年，卡诺（图3-2-2）通过对热机原理的研究，提出了热功转换的关系；1834年，法拉第（M. Faraday，1791—1867）发现了电化当量，找到了电能与化学能之间的定量转化关系……。所有这些运动形式之间的联系与转化为能量守恒定律的发现提供了基本的条件。

与此同时，由于英国及欧洲各国发展工业大生产，当时是通过烧煤把水加热来获得蒸汽，推动蒸汽机，蒸汽机带动各种机械做功。机器的大量使用，又使人们热衷于研究“永动机”（图 3-2-3）。“永动机”研制的无一成功，促使人们思考：“如果永恒的运动（永动机）是不可能的，那么各种自然力之间应该存在什么样的关系？”



▲ **图3-2-3** 形形色色的永动机

能量守恒定律的发现与确立

能量守恒的思想有悠久的历史渊源，能量守恒定律的发现与确立有许多方面的原因与条件。目前科学界公认，能量守恒定律的发现与确立，迈尔、焦耳和亥姆霍兹做出了卓越的贡献。

1839年，德国医生迈尔（图3-2-4）作为随船医生从荷兰前往爪哇。在船上，他发现船上病人在热带时的静脉血比在温带时要红。他分析，在热带由于气温高，人体散热少，人体只需吸收食物中较少的热量就够了，食物的“燃烧”过程明显减弱，致使热带地区人们静脉血中的氧气比较富裕，血液颜色就显得红些。从海员口中他还了解到，暴风雨中的海水比较热。

迈尔从自然哲学的思想出发，提出了能量守恒的观点。他认为，体力和体热都源于食物的化学能，机械能、内能、化学能是可以相互转化的，如果人体内的能量的输入和输出是平衡的，那么所有这些形式的能量就是守恒的，但是他的观点长期没有得到科学界的理解，反遭讥讽。直到19世纪60年代后，科学界才开始给予迈尔公正的评价。

英国物理学家焦耳（图3-2-5）历经40年，通过桨叶搅拌实验、磁电机实验、水通过多孔塞实验、空气压缩实验、空气稀释实验等，精确地测定了热与功间的定量关系，为能量守恒定律打下了牢固的实验基础，但是他的工作也没有引起应有的注意。

1847年，德国物理学家亥姆霍兹在柏林物理学会上宣读了自己的论文《论力的守恒》。他具体阐述了内能、功、化学能、电磁能、光能、机械能之间的相互转化和守恒规律，建立了能量守恒定律的数学表达式。但是，他的论文被认为是缺乏实验研究成果的一般的思辨性论文，不能在具有国际声誉的《物理学年鉴》上发表，最后只能自费出版为一本小册子。这本小册子后来被认为是能量守恒定律最早、最严谨、最全面的论证。1994年，德国为纪念亥姆霍兹逝世100周年发行了邮票，如图3-2-6所示。



▲ **图3-2-4**　迈尔（Julius Robert Mayer，1814—1878）



▲ **图3-2-5**　焦耳（James Prescott Joule，1818—1889）



▲ **图3-2-6**　1994年德国发行的纪念亥姆霍兹的邮票

大量事实表明，自然界中的一切物质都具有能量，能量是可以转化的，也是可以转移的，在转化和转移的过程中，能的总量不变。例如，压缩气体做功，对气体做了多少功，就有多少机械能转化为等量的内能；给导线通电，电流做了多少功，就有多少电能转化为等量的内能；将铁块浸入热水中，铁块吸收了多少热量，就有多少内能从水中转移到铁块上。

上节中以焦耳实验为基础的热力学第一定律就是内能与其他形式能量发生转化时的能量守恒定律。

能量守恒定律（law of energy conservation）可以表述为：**能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，它只能从一种形式转化为另一种形式，或者从一个物体转移到另一个物体，在转化或转移的过程中，能量的总量保持不变。**

能量守恒定律建立的意义

能量守恒定律的发现，对第一次产业革命（1760—1830）之后提高蒸汽机的性能，对第二次技术革命（1831—1888）与产业革命（1881—1914）过程中电机与内燃机的研制及改进起到了重要的指导作用。

能量守恒定律的确立，用能量这一物理量将各种自然现象的规律联系起来，也在极其广阔的领域中把自然界各种物质运动联系起来了，使不同领域的科学工作者具有一系列的共同语言，并取得许多重大成就。

能量守恒定律也为科学研究提供了方便。在涉及能量的研究中，可以只关注始末状态的能量，而避开中间复杂的变化途径和细节。能量守恒定律不仅适用于低速、宏观的情形，也适用于高速、微观世界，是最基本、最普遍的自然规律之一。

节约能源

目前，世界各国已充分认识到地球上有限的不可再生

能源储量已远远不能满足人类日益增长的长期需求，21世纪人类正面临着严重的传统能源枯竭的威胁。

发展是人类社会不断前进的永恒主题，可持续发展战略已成为全世界的共识。所谓可持续发展，是指既满足当代人的需求，又不对后代人满足其自身需求的能力构成危害的发展。能源问题在人类可持续发展中占有重要的位置。可持续发展战略的基本思想包括三点：一是鼓励经济增长，但要改变“高投入、高消耗、高污染”的生产模式和消费模式；二是利用科学技术及社会力量节约资源（含能源），大力发展资源的循环使用；三是利用科学技术，寻找新能源及开拓新的资源。

讨论交流

根据能量守恒定律可知，在能量的转化和转移过程中，能的总量是保持不变的，为什么我们还要提倡节约能源？

人类使用能源的过程实质上是能量转化和转移的过程。从宏观角度来看，人类使用能源的过程中能的总量是不变的，但能的品质降低了，能量从便于利用的形式变为不便于利用的形式。例如，燃煤发电时，释放出的内能只有一小部分转化为便于利用的能量——电能，大量的内能散失（如由废气、冷却剂带走）到周围的环境中。我们无法将散失到周围环境中的这些内能全部重新收集起来加以利用。虽然燃煤发电的过程中，能的总量不变，但便于利用的能源在不断减少。这就是提倡节约能源的真正原因。

利用物理学原理提升节能技术，促进能源利用的效率，可以达到节能目标。如利用超导技术输电，输电线路不产生焦耳热，可以降低电能传输的损耗；将固体燃料转化为液体燃料，可提高燃烧效率；在燃料中添加燃烧助剂，或加入磁性超微颗粒，也可以提升燃烧效率。

自我评价

1. 请说出在下列过程中的能量转化关系：

（1）在水平道路上行驶的汽车，发动机熄火后慢慢停下来；

（2）条形磁铁下落过程中穿过闭合线圈，线圈中产生感应电流；

（3）火药爆炸产生燃气，子弹在燃气的推动下从枪膛发射出去，射穿一块钢板后，速度减小。

2. 有一种“全自动”机械手表，既不需要给手表上发条，也不用装电池，却能不停地走下去。这是一种新的“永动机”吗？为什么？

3. 小明两手各持一条橡皮筋的一端，迅速拉了几下，然后将拉长的橡皮筋紧贴到额头，感到橡皮筋有点发热。请你利用所学的物理知识来解释这一现象。

发展空间

课外阅览

“拯救能量守恒定律”

1914年，英国物理学家查德威克在做放射性实验时，发现了一件奇怪的事情。原子核A放射出β粒子（即高速运动的电子）后，变成原子核B，原子核B与β粒子的总能量比变化前原子核A的总能量要小。这就是当时颇为轰动的“能量失窃案”。

丹麦物理学家玻尔根据实验事实，大胆地指出，在微观粒子领域内要放弃能量观点。他认为，在单个粒子的反应中能量是不守恒的。

奥地利物理学家泡利不同意玻尔的看法，他认为能量守恒定律是普遍适用的。为了拯救能量守恒定律，他提出在原子核里还有一种尚未发现的粒子，这种粒子不带电，静止质量为零，放射性实验中“失窃”的能量就是被这个粒子带走的。这种粒子后来被称为“中微子”。

1942 年，我国物理学家王淦昌在美国《物理评论》杂志上发表了《关于探测中微子的建议》一文。美国物理学家艾伦（J.S.Allen）按照这个方案进行了实验，但不是很成功。 1952 年，艾伦与罗德拜克（G.W. Rodeback）合作，成功地完成了该实验。 同年，美国物理学家戴维斯（R. Davis）也通过实验，得到了王淦昌预期的结果，间接地证明了中微子的存在。

1956年，美国物理学家莱茵斯和柯恩利用大型裂变反应堆首次成功捕捉到中微子。为此，莱茵斯获得1995年的诺贝尔物理学奖。 泡利拯救能量守恒定律的壮举终于成功了。

20世纪90年代，日本科学家梶田隆章（T.Kajita）和加拿大科学家阿瑟·麦克唐纳（A.B.McDonald）的发现证明了中微子振荡现象，揭示了中微子具有质量的事实。两位科学家由此获得了2015年诺贝尔物理学奖。

不管宏观世界还是微观世界，只要有能量转化，就一定遵守能量守恒定律。能量守恒定律是自然界最基本、最普遍的自然规律之一，它是人们认识自然和利用自然的有力武器。恩格斯对这一规律给予了极高的评价，他把能量守恒定律、细胞学说和达尔文的生物进化论并列为19世纪三个最伟大的科学发现。

3　热力学第二定律

日常生活中，我们经常与宏观热现象接触。观察这些与热现象有关的变化，你是否想过这些过程的方向性问题呢？

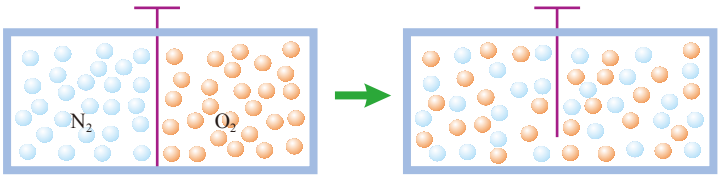
自然界中宏观过程的方向性

冰块放到热水中，冰块融化，热水降温。这是大家熟悉的事实。实验告诉我们，热量总是从高温物体传向低温物体，而不能自发地从低温物体传向高温物体，热传递具有方向性（图3-3-1）。

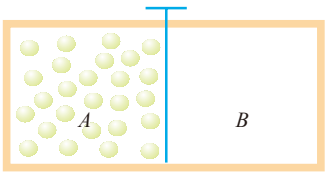


▲ **图3-3-1**　热水不断向外传递热量，直到与环境温度一致为止

一滴红墨水滴入清水中，墨水会自发地在清水中扩散，直到它们均匀地分散在水中为止。但是这些分散开的红墨水不会自发地聚集成红墨水滴。这表明扩散现象具有方向性。如图3-3-2所示，隔板上的小孔被打开，N_2分子和O_2分子会自动地相互扩散混合，最后成为均匀的混合气体，但混合均匀后的气体不能自发地分开，使氮气全部回到左边而氧气全部回到右边。这是气体扩散现象表现出来的方向性。



▲ **图3-3-2**　气体的混合



▲ **图3-3-3**　自由膨胀

气体的自由膨胀如图 3-3-3 所示。开始时气体集中在容器的 *A* 部，*B* 部为真空，打开隔板后，气体自由膨胀到 *B* 部。经过一段时间，气体均匀地分布在整个容器中。但气体分子不能自发地全部回到 *A* 部，使 *B* 部重新成为真空。气体的自由膨胀过程也是一种扩散现象，具有方向性。

一个物体在粗糙的水平面上运动，最后停了下来。在

这个过程中，物体的动能转化为物体、地面及周围空气的内能。但停下的物体、地面和周围的空气不能自发地释放内能，并将这些内能全部转化为物体的动能，使停下来的物体重新运动起来。这表明机械能与内能之间的转化具有方向性。

活动

具有方向性的过程在我们的日常生活中广泛地存在着，列举几种过程，并说明其进行的方向。

例如，有机物的燃烧过程和炸药的爆炸过程也具有方向性，其相反的过程不可能自发地发生。一切与热现象有关的宏观自然过程都具有方向性，其相反的过程是不可能自发产生的。能够揭示宏观自然过程方向性规律的是**热力学第二定律**（second law of thermodynamics）。



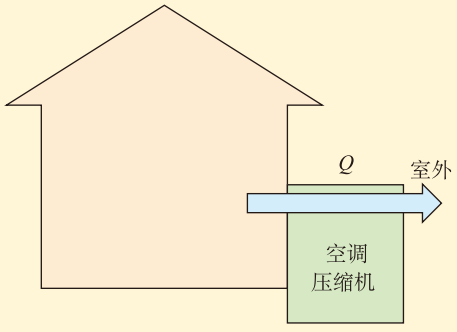
▲ **图3-3-4** 克劳修斯（Rudolf Clausius，1822—1888）

热力学第二定律的克劳修斯表述

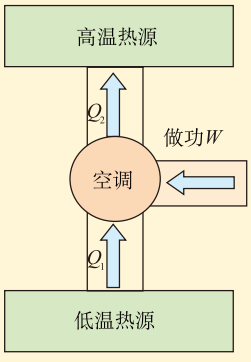
1850年，德国物理学家克劳修斯（图3-3-4）根据热传递过程的方向性提出了热力学第二定律的一种表述：**热量不可能自发地从低温物体传递到高温物体**。需要注意的是，热量可以从低温物体传递到高温物体，但一定需要第三方的介入。

讨论交流

夏天空调制冷时，热量能够从温度较低的室内传递到温度较高的室外，如图3-3-5所示。这个过程是否违背了热力学第二定律的克劳修斯表述？我们应如何理解定律中“自发”二字的含义？



▲ **图3-3-5** 室内空调制冷



▲ **图3-3-6** 空调制冷的原理

事实上，空调制冷必须依靠压缩机做功，如图3-3-6所示。一旦切断电源，压缩机停止做功，空调制冷立即中止。如果切断电源，制冷过程仍能进行，这样的过程才是“自发”的过程。显然，空调制冷并不满足“自发”这个条件，它没有违背热力学第二定律。

热力学第二定律的开尔文表述

1851年，英国物理学家开尔文（图3-3-7）根据功热转化的方向性指出：**不可能从单一热源吸收热量，使之全部变成功，而不产生其他影响**。



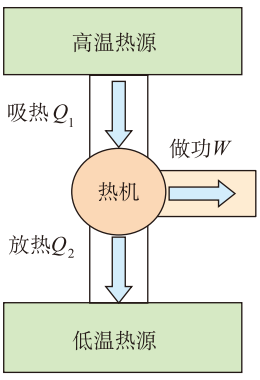
▲ **图3-3-7**　开尔文（Lord Kelvin，1824—1907）

在初中我们学过，四冲程内燃机的每个循环过程都包括吸气、压缩、做功、排气四个冲程。每辆汽车都有排气管，在排气冲程中排出热的废气，带走了一部分的热量，如图3-3-8所示。即使是一个不计摩擦、不会漏气、没有热量损失的理想热机，其工作物质从高温热源吸收热量Q_1，排出废气时向低温热源放出热量Q_2，其对外做功$W=Q_1-Q_2<Q_1$，热机的效率$\eta=\frac{W}{Q_1}<100\%$。因此，热机的效率不可能达到100%，如图3-3-9所示。

热力学第二定律的表述并非只有上述两种形式，对任何一种宏观自然过程方向性的说明，都可作为热力学第二定律的表述。因而，热力学第二定律的表述不是唯一的。进一步的研究表明，热力学第二定律的各种表述都是等价的，并可从一种表述导出另一种表述。



▲ **图3-3-8**　汽车排气管



▲ **图3-3-9**　理想热机的工作原理

讨论交流

有人设想了一种利用地热能的方式：将地面上的水通入温度高的地热异常区汽化，所吸收的热量除用于克服摩擦做功外全部用来对外做功。这种机器被称为“第二类永动机”。

“第二类永动机”有可能实现吗？它是否违背能量守恒定律和热力学第二定律？应如何理解定律中“不产生其他影响”的含义？

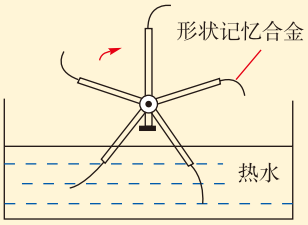
自我评价

1. 消耗的机械能可以全部转化为物体的内能，但物体减少的内能不能全部转化为机械能。这种说法正确吗？请说明理由。

2. 课桌上的课本掉落到地面的过程中，能量是否守恒？这个过程可以反向发生吗？

3. 地球表面的大部分被浩瀚的海洋所覆盖，如果海洋的温度能自动地降低1 ℃，由此释放出的热量全部转化为机械功足够全世界使用4000年，这个设想能够实现吗？为什么？

4. 如图3-3-10所示，老师做了一个实验。转轮由5根轻杆和转轴构成，轻杆的末端装有形状记忆合金制成的叶片，轻推转轮后，进入热水的叶片因伸展而“划水”，推动转轮转动。离开热水后，叶片形状迅速恢复，转轮因此能较长时间转动。小明说，老师的这个装置就是一个“第二类永动机”，它能从单一的热源——热水中吸收热量并全部用于做功，使它不断地发生转动。对此，你的意见如何？



▲ 图3-3-10

发展空间

课外阅览

熵的初步认识

我们在前面学习“温度”时了解了热力学系统。自然界中存在三种系统：第一种是孤立系统，这种系统与外界既无能量交换又无物质交换；第二种称封闭系统，该系统与外界有能量交换而无物质交换；第三种称开放系统，该系统与外界同时有能量与物质交换。

对于一个孤立系统，物理学上，为描述该系统的无序程度，引入一个物理量，叫作**熵**（entropy）。系统的熵值直接反映了它所处状态的均匀程度。

在图 3-3-2 中，抽掉挡板后，气体自由扩散，直到 N_2 分子和 O_2 分子均匀分布，扩散现象停止。在这个过程中，任何时刻容器中分子的无序程度是不一样的，即任何时刻容器系统的熵值不同，直到宏观的扩散现象消失（分子无序程度最大），系统熵值不再变化，达到最大。由此可见，系统中的每一个熵值对应着一种微观态，熵是一个“态函数”。

系统熵值增大，意味着系统无序（混乱）程度提高；熵值减少，系统无序（混乱）程度降低，有序程度提高。

如图3-3-11所示，图书馆书架上的图书按一定顺序排放。如果不小心把书架弄倒了，图书全部掉到地上而变得杂乱无章，把它重新排列起来需要花费不少时间和精力。想一想，假如我们用熵来描述图书的有序程度，那么书架的倾倒是熵增加的过程还是熵减少的过程？为了让这个过程反方向进行，需要付出什么？



▲ **图3-3-11**　图书馆的书籍有序排放

熵是一种世界观

一位名叫麦克斯·格拉克曼的人类学家曾经说："科学是一门学问，它能使这一代的傻瓜超越上一代的天才。"热力学第一定律与第二定律早已编入物理学基础教程，它们所表达的内容现在看来不过是简单明了的常识而已。然而将它们最终明白无误地表达出来，却经过了一段曲折的路程；许多天才为之呕心沥血，提出过大量复杂的理论。奇怪的是，虽然科学家们多少年来为这两个定律的真正含义绞尽脑汁，地球上各民族文化的民谚却早已悟出其中意味。我们都听说过这些说法："你不可能不劳而获"，"覆水难收"或者"天网恢恢，疏而不漏"。如果这些谚语对你来说不算陌生，而且在日常生活中你也反复有过这样的亲身体验的话，那么，你就懂得了热力学第一定律和第二定律。

热力学概念乍听起来有些深不可测，其实是最简单而又给人印象最深的科学概念。热力学的两个定律可以用一句简短的句子来表达：宇宙的能量总和是个常数，总的熵是不断增加的。这也就是说我们既不能创造，也不能消灭能量。宇宙中的能量总和一开始便是固定的，而且永远不会改变。

我们应该牢记的最重要的一点，就是我们不能创造能量。从来就没人创造过能量，也永远不会有人能创造。我们力所能及的只是把能量从一种形式转化成另一种形式。要理解这一点不甚容易，特别是考虑到一切都是由能量所生成的，世间万物的形态、结构和运动都不过是能量的不同聚集与转化形式的具体表现而已。一个人、一幢摩天大楼、一辆汽车或一棵青草，都体现了从一种形式转化成另一种形式的能量。高楼拔地而起，青草的生长，都耗费了在其他地方聚集起来的能量。高楼夷为平地，青草也不复生长，但它们原来所包含的能量并没有消失，只是被转移到同一环境的其他部分去了。

如果我们需要考虑的仅仅是热力学第一定律，那我们滥用那万世不竭的能源也没有什么可指责的了。然而我们知道世界并非如此。比如我们烧掉一块煤，它的能量虽然并没有消

失，但却经过转化随着二氧化碳和其他气体一起散发到空间中去了。虽然燃烧过程中能量并没有消失，但我们却再也不能把同一块煤重新烧一次来做同样的功了。热力学第二定律解释了这个现象。它告诉我们每当能量从一种形式转化为另一种形式时，我们就损失了一部分可供利用的能量。

熵的增加就意味着有效能量的减少。每当自然界发生任何事情，一定的能量就被转化成了不能再做功的无效能量。被转化成了无效状态的能量构成了我们所说的污染。既然根据热力学第一定律，能量既不能被产生又不能被消灭，而根据热力学第二定律，能量只能沿着一个方向——耗散的方向——转化，那么污染就是熵的同义词（图3-3-12）。它是某一系统中存在的无效能量。



▲ **图3-3-12** 污染是无序的排放

反思 · 小结 · 交流

• 学后反思

1. 能量守恒定律是最基本、最普遍的自然规律之一，是在自然哲学、物理实验、物理理论的基础上逐渐建立的。事实表明，任何违背能量守恒定律的事情都是不可能发生的。

2. 在第一类永动机研制失败的过程中，人们发现了热力学第一定律。在研究与热现象有关的宏观自然过程中，人们发现了热力学第二定律。热力学第二定律的各种表述是等价的。任何遵守能量守恒定律但违背热力学第二定律的事情也是不可能发生的。

3. 地球上不可再生能源的储量是有限的，它的使用对环境产生了影响（如温室效应、酸雨、放射性污染等）。能源的使用过程降低了能量的品质，因此人们需要节约能源。

• 自主小结

1. 有人认为，热力学第一定律就是能量守恒定律。你认为这种说法是否妥当？请说明理由。

2. 热力学第二定律有多种表述，实质上说的是同一件事情，你认为这个定律的实质是什么？

3. 从能源消耗的角度来看，随着社会的发展，人口的增长，当我们使用地球上的能源时，总有一天会耗尽地球上不可再生的所有能源。请提出相关的论据加以说明。

• 相互交流

1. 从能量的观点分析，地球绕太阳运行时，为什么它在近日点的速度大于远日点的速度？

2. 用能量守恒的观点解释潮汐现象。

3. 自然界中的能量不可能消失，为什么会有能源危机？

本章复习题

1. 举几个实例说明做功可以改变系统的内能，热传递也能改变系统的内能。做功和热传递对改变系统的内能在什么意义下具有等效性？

2. 夏天，将室内电冰箱的门打开，接通电源，紧闭门窗，经过一段时间，能否使室内的温度降低？为什么？

3. 一个与外界没有热量交换的气缸中密封有一定质量的气体，现用外力压缩活塞，使活塞对气体做功 $W=2\times10^5$ J，气体的内能将如何改变，改变多少？

4. 空调机中的压缩机在一次压缩过程中，对被压缩的气体做了 1.0×10^3 J 的功，同时气体的内能增加了 0.6×10^3 J。该过程中，气体是吸热还是放热？吸收或放出的热量是多少？

5. 一定质量的理想气体在某一过程中，从外界吸收热量 2.5×10^4 J，气体对外界做功 1.0×10^4 J，则该理想气体的（　　）

   A．温度降低，密度增大

   B．温度降低，密度减小

   C．温度升高，密度增大

   D．温度升高，密度减小

6. 在一个标准大气压下，1 g 100 ℃的水吸收 2264 J 的热量变为同质量的 100 ℃的水蒸气，在这个过程中，以下四个关系中正确的是（　　）

   A. 水蒸气的内能与水的内能之差等于 2264 J

   B. 水蒸气的内能与水的内能之和等于 2264 J

   C. 水蒸气的内能与水的内能之差小于 2264 J

   D. 水蒸气的内能与水的内能之差大于 2264 J

7. 下列过程能自发地逆向进行吗？为什么？

   ①热量从高温物体传递到低温物体；

   ②把不同温度的两种液体在绝热容器里进行混合；

   ③两种不同的气体通过扩散成为一种均匀的混合气体；

   ④在一绝热的容器里盛有某种液体，不停地晃动液体，使液体的温度升高。

8. 在制冷机的运转中，热量是从热区流向冷区还是从冷区流向热区？这种流动是自发的还是需要外界的帮助？是否违反热力学第二定律？

9. 某校中学生参加中央电视台“异想天开”栏目的活动，他们提出了下列四个设想方案。从理论上讲可行的方案是（　　）

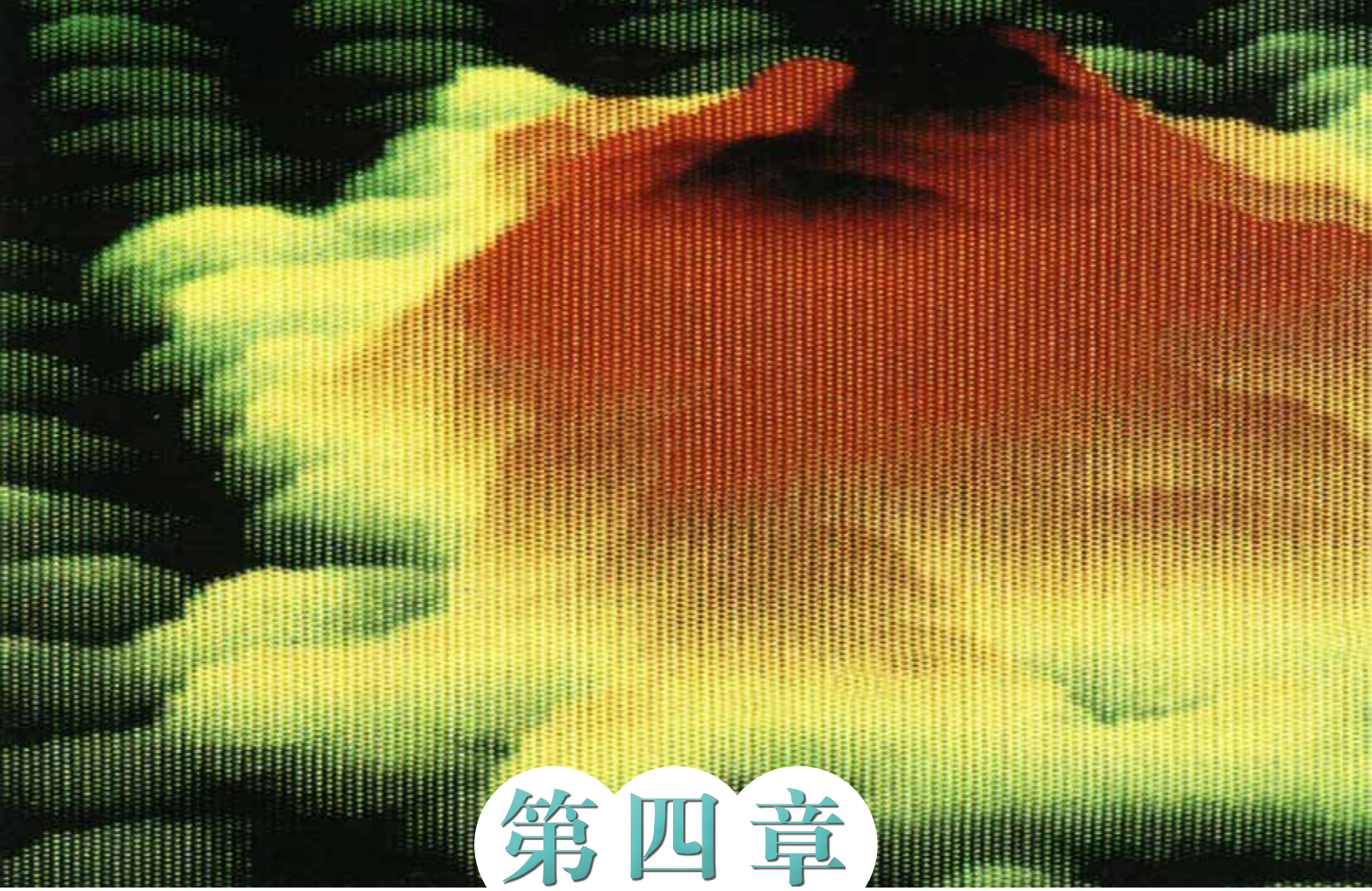
   A．城市上空的气温比周围环境要高，利用城市上空的热源来进行发电

   B．在繁华的马路上设计一种装置，使行人走路时的一部分能量转化为电能

   C．将屋顶都盖上太阳能板，可直接用太阳能来解决家庭照明和热水供应问题

   D．想办法使汽车尾气中的各类有害气体自发地分离开，再将干净的气体排到空气中

10. 一般小汽车的汽油消耗量约为 10 L/100 km，1 L 汽油完全燃烧能释放 3.3×10^7 J 化学能，那么小汽车行驶 100 km 消耗能量约为 3.3×10^8 J，这相当于消耗多少千瓦时的电能？目前我国小汽车的拥有量迅速上升，这对能源、交通、环境等将产生怎样的影响？



第四章

原子结构

主题一　原子的核式结构

- 电子的发现
- 原子的核式结构模型

主题二　玻尔的原子模型

- 光谱　氢原子光谱
- 玻尔的原子模型　能级

《庄子·天下篇》有言："一尺之棰，日取其半，万世不竭。"这句话说的是：物质是连续的，无限可分。古希腊人德谟克利特则说："万物是由不可再分的原子构成的。"

东西方的先哲们对世界构成的不同观点，两千多年来一直启示着人们对这一问题的探幽索隐。

1 电子的发现

从德谟克利特（约前 460—前 370）提出原子的猜想和假说，到 18 世纪下半叶道尔顿（J.Dalton）关于原子的大量化学实验，漫长的 20 多个世纪中，人们一直坚信原子是组成物质的最小单元。原子是可以被打碎的吗？存在比原子更小的粒子吗？直到 19 世纪末，人们因对阴极射线的研究，引发了原子物理领域的三大发现，物理学家才进入了一个既陌生又奇特的原子世界。

阴极射线



▲ 图4-1-1 阴极射线实验

19 世纪中后期，科学家在研究稀薄气体放电时，发现真空度很高的玻璃管阴极会发射出一种射线。这种射线沿直线传播，撞击到玻璃壁上会产生黄绿色的荧光，科学家们把这种射线称为**阴极射线**（cathode ray）。阴极射线究竟是什么？是一种电磁辐射，还是带电微粒？这些问题引起了物理学家的极大兴趣。

实验探究

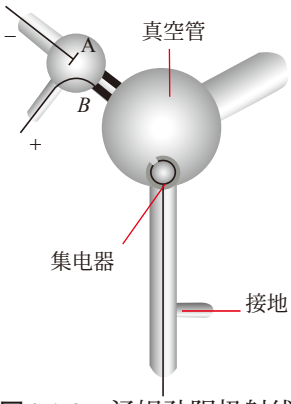
如图 4-1-1 所示，给阴极射线管加上高压，会看到阴极射线的径迹。将条形磁铁的一个磁极靠近阴极射线管，会有什么现象产生？把另一个磁极靠近射线管，射线的偏转情况是否相同？

你认为射线的偏转是什么原因造成的？想一想，根据观察到的现象，你能断定阴极射线的带电性质吗？你还能设计出其他实验方案验证粒子的带电性质吗？

汤姆孙的伟大不仅仅在于测出了阴极射线中粒子的比荷，而在于他敢于同旧的传统观念决裂，第一个大胆承认了比原子小得多的微粒存在。可见，观念的改变是多么重要。

英国物理学家汤姆孙（J.J.Thomson）正是通过气体放电管中阴极射线在磁场或电场中产生偏转，来确定射线微粒的带电性质的。图 4-1-2 为汤姆孙阴极射线实验装置示意图，从阴极 A 发出的射线穿过小孔 *B*，射到管壁产生荧

光斑点。用磁铁使射线发生偏转，进入集电器，用静电计检测的结果表明，收集到的是负电荷。

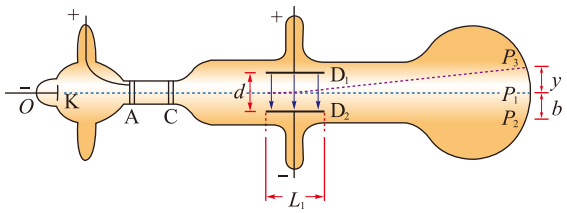


▲ **图4-1-2**　汤姆孙阴极射线实验装置

微粒比荷的测定　元电荷

要进一步搞清这种带负电粒子的性质，就要测量出阴极射线中一个带电粒子的质量和电荷量，但这种粒子的质量太小，无法直接称量。汤姆孙通过实验测量出粒子所带电荷量 q 与质量 m 的比 $\left(\frac{q}{m}\right)$，再测出电荷量 q，从而求出粒子的质量 m。带电粒子的电荷量与质量之比称为**比荷**（specific charge），比荷是带电微粒的基本属性之一。

如图 4-1-3 所示，阴极 K 发出的微粒经加速后，穿过小孔 A、C，沿中心轴线 OP_1 进入到两块水平正对放置的极板 D_1、D_2 间的区域，射出后到达右端的荧光屏上形成光点。当 D_1、D_2 两块金属极板之间不加电压时，射线打到荧光屏上的中心 P_1 点。当 D_1、D_2 间加上方向向下的电场 E 时，带电粒子将会向上偏转。为了抵消射线由于电场作用产生的偏转，再在 D_1、D_2 两块金属极板之间加上一个大小为 B、方向垂直纸面向里的磁场，使射线又重新回到 P_1 点。



▲ **图4-1-3**　测定微粒比荷的实验原理示意图

当运动电荷受到的电场力与洛伦兹力平衡时，有

$$qE = qvB$$

由此确定带电粒子的运动速率 v。然后去掉 D_1D_2 之间的电场 E，只保留原磁场 B，带电粒子在磁场区域内做圆周运动，其半径为 R，则有

$$qvB = \frac{mv^2}{R}$$

由以上两式可得

$$\frac{q}{m} = \frac{E}{RB^2}$$

代入实验数据，求得这种粒子的比荷约为 10^{11} C/kg。

1897 年，汤姆孙根据对阴极射线管中微粒流在电场、磁场中的偏转情况的计算，发现这种粒子的比荷是氢离子比荷的 1000 多倍。进一步的实验证实，阴极射线粒子的电荷与氢离子的电荷大小基本上是相同的。由此可断定这种粒子的质量不到氢原子的 1/1000，是比原子更小的“微粒”！汤姆孙将这种粒子命名为**电子**（electron）。目前测量到的电子静质量为 $9.109\ 381\ 88（72）\times10^{-31}$ kg。

汤姆孙在实验中又变换了几种阴极的材料，发现实验结果是相同的，他推定电子广泛地存在于各种不同的原子之中。电子的发现使人们认识到原子是可分的，传统的物质观念终于被否定了。汤姆孙对阴极射线的研究敲开了原子的大门，这标志着人类对物质结构的认识进入了一个崭新的阶段。

电子电荷量的测量最早（1913 年）是由美国科学家密立根采用“油滴实验”实现的。密立根通过带电油滴在电场力与重力作用下的平衡，测量出油滴的电荷量。

密立根测定了数千个带电油滴的电荷量，发现各个油滴所带电荷量是不连续的，它们都是某一最小电荷的整数倍，这个能独立存在的最小电荷被称为元电荷，电子所带的电荷就是元电荷。目前精确测定的元电荷电荷量 $e=1.602\ 176\ 462（63）\times10^{-19}$C，通常可以取 $e=1.6\times10^{-19}$ C。

《物理 必修 第三册》第一章第6节“发展空间·课外阅览”。

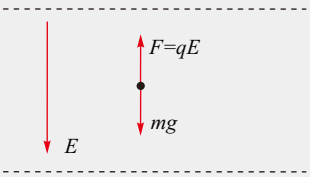
例题示范

问题1 一个半径为 1.64×10^{-4} cm 的带负电的油滴，在电场强度大小为 1.92×10^{5} N/C 的匀强电场中，如果油滴受到的电场力恰好与重力平衡，问：

（1）电场方向如何？

（2）这个油滴带有几个电子的电荷量？（已知油的密度为 0.851×10^{3} kg/m^3）

分析 重力方向竖直向下，电场力与重力平衡，说明电场方向竖直向下。已知油滴的体积与密度，可求出重力，从而利用受力平衡的条件，求得油滴所带电荷量。



▲ 图4-1-4

解 （1）如图 4-1-4 所示，电场力与重力为二力平衡，

负电荷所受电场力方向与电场方向相反，因此电场方向竖直向下。

（2）由二力平衡，有

$$mg=qE$$

即

$$\frac{4\rho\pi r^3 g}{3}=qE$$

代入数据解得油滴所带电荷量

$$q=8.189\times10^{-19}\,\mathrm{C}$$

该油滴所带电量相当于有 n 个电子的电荷量

$$n=\frac{q}{e}$$
$$=\frac{8.189\times10^{-19}\,\mathrm{C}}{1.6\times10^{-19}\,\mathrm{C}}$$
$$=5\text{（个）}$$

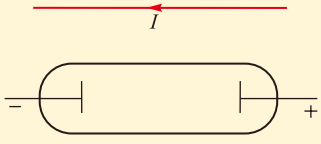
该油滴带有 5 个电子的电荷量。

拓展　电场存在于图4-1-4中两条虚线之间的区域，即带相反电荷的平行金属板之间。倘若上方金属板开有小孔，油滴从上方滴落，在重力作用下加速，并从上金属板的小孔进入电场，调节电场强度的大小，直到油滴在电场中匀速下落，即可测出油滴所带的电荷量。

自我评价

1. 19 世纪，对阴极射线的本质的认识有两种观点：一种观点认为阴极射线是电磁辐射，另一种观点认为阴极射线是带电微粒。如果阴极射线是带电微粒，用什么方法能够判断？

2. 如图 4-1-5 所示，在阴极射线管正上方平行放一通有强电流的长直导线，则阴极射线将向哪个方向偏转？



▲ 图4-1-5

3. 在阴极射线管内两电极之间的电压为 $3\times10^3\,\mathrm{V}$，如果电子离开阴极表面时速度可以忽略，试求电子到阳极时的速度。

4. 通过图书馆或互联网等渠道进行查询，简要叙述电子的发现对人类科学发展进程的影响。

发展空间

课外阅览

第一个粒子

20 世纪是科学技术的革命世纪，它发端于世纪交替时期的物理学革命，也是 19 世纪末物理学危机的必然产物。它改变了人类的自然观，特别是人类对物质世界的基本认识。而 1895—1897 年连续出现的三大发现（X 射线、放射性和电子），使人类的认识第一次深入到原子内部，从此，一个全新的时代开启了。

电子的发现是历时 40 年的阴极射线研究的直接结果，它最后搞清了阴极射线的本性问题。阴极射线究竟是什么？德国物理学家倾向于阴极射线不可能是粒子，而只是一种“以太波”；美国物理学家却坚持认为阴极射线是一种带电的粒子流，但当时认为这种粒子是气体离子。

1896 年，汤姆孙成功地引进电场而使阴极射线发生偏折。他测量了偏折和速度，用不同的材料如铝、铜、锡、铂等作为阴极进行测试，还把不同的气体如空气、氢和二氧化碳充入射线管里试验，得到的所有数据都相同。1897 年，汤姆孙满意地离析出了“负微粒”，他相信这就是物质的组成部分，是比原子小得多的粒子，原子是可分的！ 2000 多年来认为“原子是组成一切物质的不可分的基元”的传统观念被颠覆了。

这种“负微粒”被称作电子，电子带有负电荷，但物质不显电性，因此原子一定具有某种带正电的内部结构来抵消电子的负电荷。1904 年，汤姆孙提出了他的“枣糕模型”，作为原子结构的模型。

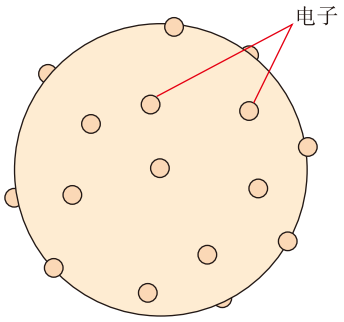
2 原子的核式结构模型

电子的发现使人们认识到原子不是组成物质的最小微粒，物质中的电子是带负电的，而通常情况下物质都呈现电中性。这个事实使人们推测原子是否应当由两部分组成：一部分是电子，带负电；另一部分则带正电，而且其所带的正电荷应与电子所带的负电荷相等。原子在整体上呈电中性。

汤姆孙原子模型

19 世纪末至 20 世纪初，电子、X 射线、放射性元素

的发现，成为人们构思原子模型的依据。当时科学家曾想出了许多原子模型。1904 年汤姆孙根据已知的实验现象和认识提出了影响较大的“ 枣糕模型 ”，如图 4-2-1 所示，假想正电荷构成一个密度均匀的球体，电子“ 镶嵌 ”其中，并分布在一些特定的同心圆环或球壳上。汤姆孙的“ 枣糕模型 ”在解释电子轨道半径与电子数目的关系、元素的周期性方面取得了一定的成功，也能定性地解释原子的光辐射现象。



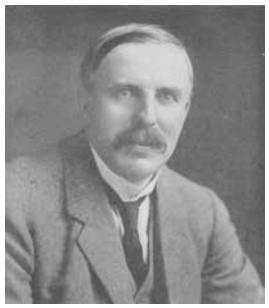
▲ 图4-2-1　枣糕模型

讨论交流

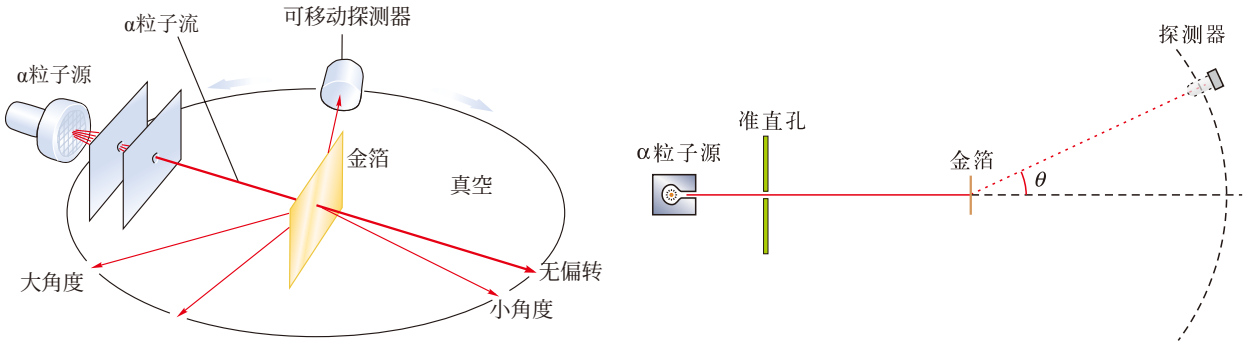
物理模型在物理学研究中具有重要的地位，科学家建立一个物理模型的依据是什么？而检验一个物理模型是否正确的依据又是什么？

α粒子散射实验

1909 年，卢瑟福（图 4-2-2）和他的助手盖革（H.W. Geiger）、马斯登（E.Marsder）用 α 粒子轰击金箔，研究 α 粒子散射的情况，其实验装置如图 4-2-3 所示。α 粒子源封装在铅盒中，铅盒壁上有一个小孔，α 粒子可以从小孔中射出，打到前方的金箔中心。探测器可以绕着金箔中心点做圆周运动，从 α 粒子源到探测器之间是真空的。被金箔向各个方向散射的 α 粒子打在探测器上时会发出荧光，从而被探测到。沿圆周移动探测器，就可以探测 α 粒子在各个方向上的散射情况。



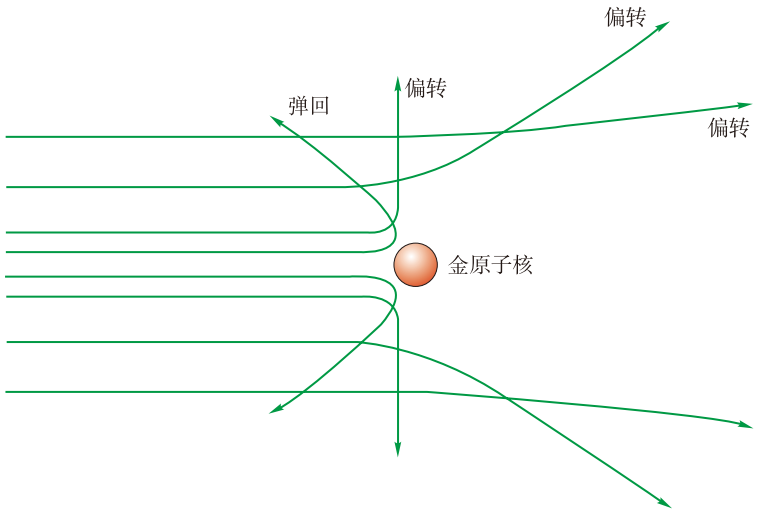
▲ 图4-2-2　卢瑟福（Ernest Rutherford，1871—1937）



▲ 图4-2-3　α粒子散射实验装置示意图

α 粒子是一种带正电荷的粒子，它的电荷是电子电荷的 2 倍，质量大约是电子质量的 7300 倍。某些放射性元素放出的 α 粒子具有很大的动能。

实验中发现，绝大多数 α 粒子穿过金箔后仍沿原来的方向前进或只发生很小的偏转，少数 α 粒子发生了较大的偏转，大约 1/8 000 的 α 粒子偏转角度超过了 90 °，极少数 α 粒子甚至被“ 弹 ”回来（图 4-2-4）。这是一个令人震惊的现象，因为按照汤姆孙的模型，α 粒子在轰击金箔时，不可能发生大角度的散射，而且无论是电子，还是均匀分布的正电荷都不足以把 α 粒子反弹回来。α 粒子散射实验的结果是令人惊讶的，原子内部的实际结构应该与汤姆孙建立的“ 枣糕模型 ”不符。



▲ 图4-2-4　α粒子的散射

原子核式结构模型

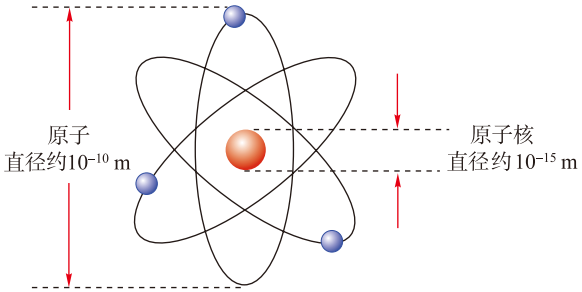
讨论交流

在 α 粒子散射实验中，绝大多数 α 粒子几乎不偏转，只有少数粒子发生了较大角度的偏转，你认为这些偏转是由电子造成的吗？用“枣糕模型”能解释这个实验现象吗？原子中的正电荷怎样分布才能出现少量粒子大角度偏转的现象？

卢瑟福认为少数 α 粒子发生大角度偏转，极少数被“ 弹回 ”，不可能是电子造成的，因为电子的质量只有 α 粒子的几千分之一，当 α 粒子撞击电子时，其运动方向不会发生明显的改变。卢瑟福经过深思熟虑和仔细计算之后，认为原子内部应该非常“ 空旷 ”，原子中带正电部分体积很

小，但几乎占有原子的全部质量，称之为**原子核**（atomic nucleus）。只有极少数的 α 粒子有机会从离核很近的地方经过，受到较大的斥力，才会发生大角度的偏转。绝大多数 α 粒子从离核较远的地方经过，受到的排斥力很小，因而几乎不发生偏转。最后，卢瑟福否定了汤姆孙的“枣糕模型”，提出了新的原子结构模型，认为原子中间有一个体积很小、带正电荷的核，而电子在核外绕核运动。这种结构模型被称为原子的“核式结构模型”。

卢瑟福推算出原子核的直径约为 10^{-15} m，只有原子直径的十万分之一（图 4-2-5）。如果把原子线度放大到 1000 m，原子核的线度只有约 1 cm。卢瑟福还指出，原子核几乎集中了原子的所有质量，其密度大得惊人。对于中性原子，所有电子带的负电荷之和等于原子核所带的正电荷。这个原子模型类似于行星绕太阳运动的太阳系，所以也称作原子的行星模型。



▲ **图4-2-5**　核式结构模型示意图

讨论交流

如果整个原子有足球场这么大的话，原子核将会有多大？根据所掌握的知识，估算一下原子核密度的数量级是多少。

原子核式结构模型的局限性

卢瑟福通过 α 粒子散射实验解决了原子中正负电荷的排布问题，建立了与 α 粒子散射实验相符合的核式结构模型，使人们认识到原子中的正电荷集中在原子中间很小的核上，认识到高密度原子核的存在，提出了以核为中心的概念，从而将原子分为核内与核外两部分，为原子物理的

进一步研究提供了坚实的基础。

但是，原子核式结构模型与经典理论之间存在一定的差异。在核式结构模型中，电子绕原子核做圆周运动，电子具有加速度。根据经典电磁理论，带电粒子做加速运动时，要向外发射电磁波，要辐射能量。因此，绕核运动的电子将不断地向外辐射电磁波，能量不断减少，轨道半径会越来越小，经计算大约只需 10^{-11} s，电子就会沿螺旋轨道坠入原子核内，原子将不复存在！这个推论明显与事实不符，因为宇宙万物中的原子结构大都是稳定的。

讨论交流

汤姆孙对阴极射线的研究，发现了电子，提出了原子结构的“枣糕模型”。卢瑟福根据对 α 粒子散射实验的研究，否定了汤姆孙的原子结构模型，提出了原子“核式结构模型”。但是卢瑟福的原子结构模型也具有局限性，这说明自然科学的研究具有怎样的特点？

自我评价

1. 在 α 粒子散射实验中，使少数 α 粒子产生大角度偏转的作用力是（　　）

A. 原子核对 α 粒子的万有引力　　B. 原子核对 α 粒子的库仑斥力

C. 原子核对 α 粒子的磁场力　　D. 核外电子对 α 粒子的引力

2. 关于 α 粒子散射实验，下列说法正确的是（　　）

A. 实验中观察到的现象是绝大多数 α 粒子穿过金箔后，仍沿原来方向前进，少数发生了较大偏转，极少数偏转超过 90°，有的甚至被弹回，偏转接近 180°

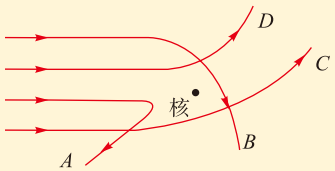
B. 原子中心有一个极小的核，它占有原子体积的极小部分

C. 原子中心的核带有原子的绝大部分正电荷

D. 原子中心的核集中了原子的绝大部分质量

3. 当 α 粒子被重核散射时，如图 4-2-6 所示的运动轨迹哪些是不可能存在的？为什么？

4. 在 α 粒子散射实验中，如果只考虑 α 粒子与金原子核的相互作用，则一个 α 粒子在穿越金原子的过程中，其所受的库仑力、它的动能以及它与金原子核组成的系统的势能和总能量各如何变化？



▲ 图4-2-6

发展空间

课外阅览

近代原子核物理之父——卢瑟福

欧内斯特·卢瑟福，20 世纪伟大的实验物理学家。1871 年，卢瑟福出生于新西兰纳尔逊的一个手工业工人家庭。1895 年大学毕业后，卢瑟福获得英国剑桥大学的奖学金进入卡文迪许实验室，成为汤姆孙的研究生。1919 年，他接替汤姆孙担任卡文迪许实验室主任。1925 年卢瑟福当选为英国皇家学会会长，1931 年受封为纳尔逊男爵，1937 年因病去世，享年 66 岁。

卢瑟福一生在多个领域对科学发展做出了贡献，其中放射性实验与理论、原子物理与核物理是他一生研究的最重要方面，被誉为近代原子核物理之父。

1902 年，卢瑟福首先提出了放射性半衰期的概念，证实放射性涉及从一个元素到另一个元素的衰变。因为对元素衰变及放射性的研究，他获得了 1908 年诺贝尔化学奖。

1911 年，卢瑟福根据 α 粒子散射实验现象提出原子核式结构模型。该实验被评为“十大最美物理实验”之一。

1919 年，卢瑟福用高能 α 粒子轰击氮原子时，飞出了两种碎片，经检测小的碎片是质子，大的碎片就是氧原子。这是第一次发现质子，同时这也是人类第一次实现了元素的人工转变。

卢瑟福还是一位伟大的教育家，培养了一批优秀的科学家，他的学生和助手多人获得了诺贝尔物理和化学奖。获诺贝尔化学奖的有索迪（1921 年）、阿斯顿（1922 年）；获诺贝尔物理学奖的有玻尔（1922 年）、威尔逊（1927 年）、查德威克（1935 年）、布莱克特（1948 年）、科克拉夫特和瓦耳顿（1951 年）、卡皮茨（1978 年）。

为了纪念卢瑟福，他的头像出现在新西兰货币的最大面值——100 元上面（图 4-2-7），以示国家对他最崇高的敬意。



▲ 图4-2-7

3　光谱　氢原子光谱

物体发出的光，通常不是单色光，而是由许多不同波长的光组成的复色光。复色光通过分光镜后，分解为一系列单色光，而且按波长的顺序排列成一条光带，称为**光谱**（spectrum）。如太阳光经过分光镜后形成按红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫次序排列的光谱，称为太阳光谱，如图 4-3-1 所示，人类研究光谱已有几百年的历史。



▲ 图4-3-1 太阳光谱

光谱的几种类型



▲ 图4-3-2 分光镜

分光镜是一种能获得光谱、观察光谱的仪器，如图4-3-2所示是一种分光镜，由平行光管、三棱镜、望远镜组成。它的原理是利用不同频率的光折射率不同，将复色光分解成若干单色光。利用分光镜可以观察到各种光谱。

活动

使用分光镜，分组进行下面的活动。

1. 准备一个白炽灯泡，让其发出强光，使光线通过一个狭缝进入分光镜的平行光管，记录通过望远镜观察到的现象。

2. 在暗室中点燃酒精灯，在火焰上撒一些钠盐，使用分光镜观察火焰发出的光。记录观察到的现象。

3. 用弧光灯发出的白光，照射钠蒸气（在酒精灯的灯芯上撒上一些钠盐，钠盐受热分解产生钠蒸气），用分光镜观察通过钠蒸气后的强光。记录观察到的现象。

在以上三个活动中，所观察到的光谱有什么不同？

在“活动1”中，观察到的是如图4-3-3所示的连续彩色光带。这种光带称为**连续光谱**（continuous spectrum），它是由波长连续分布的光组成的。

在“活动2”中，可以观察到在较暗的连续光谱的背景上出现一些分立的彩色亮线，如图4-3-4所示，这种光谱称为明线光谱。而这些亮线称为光谱线，它对应一定波长的单色光，不同原子的明线光谱是不同的。两条相距很近的黄色谱线是钠原子谱线的典型特征，这两条谱线的波长分别为589.0 nm和589.6 nm。

连续光谱和明线光谱都是由发光物质所发的光直接产生的，所以也称为**发射光谱**（emission spectrum）。炽热的



▲ 图4-3-3　连续光谱



▲ 图4-3-4　钠的明线光谱（片段）



▲ 图4-3-5　钠的吸收光谱（片段）

固体、液体及高压气体发光产生的光谱一般为连续光谱，而稀薄气体发光产生的光谱多为明线光谱。

在“活动 3”中，可以观察到在较强的连续光谱的背景上有一些分立的暗线，如图 4-3-5 所示。这是由于被火焰加热的钠盐产生的蒸气吸收了弧光灯发出的白光中的一些特定频率的光而形成的谱线。这类光谱称为**吸收光谱**（absorption spectrum），也称暗线光谱。

对于某一种原子，发射光谱和吸收光谱都是分立的谱线，称为**线状谱**（line spectrum）。人们通过大量的实验观察发现，同一种原子发射光谱中的明线与吸收光谱中暗线的位置是相同的，称为这种原子的特征光谱，这样的光谱称为**原子光谱**（atomic spectrum）。不同原子的特征光谱不同，它只决定于原子的内部结构。图 4-3-4 和图 4-3-5 分别是钠原子的发射光谱和吸收光谱。

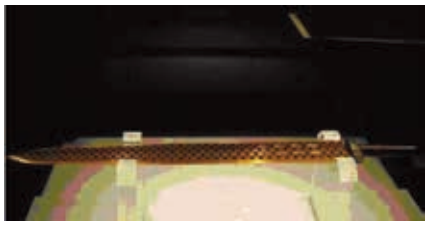
光谱分析的应用

由于原子发光的频率只与原子结构有关，因此光谱就成了该元素的特征了，就像人类的“指纹”一样。利用原子光谱可以来鉴别物质的化学组成中是否存在这种元素、含量有多少等，这种方法叫作**光谱分析**（spectral analysis）。光谱分析在化工、材料、医疗等领域具有广泛的应用。

光谱分析极为灵敏，它的精确度远高于化学分析和其他分析手段。光谱分析的另一个特点是它可以在不破坏、不接触研究对象的情况下，获取其内部信息，这使得它成为科研领域的一种重要研究手段。考古学家利用光谱分析的方法对文物进行无损伤的检测（图 4-3-6 和图 4-3-7）。应用光谱分析，科学家发现了许多当时未知的元素，如铯、铷、铊、铟、氦等，还准确地测出了 1.50×10^{8} km 之外的太阳外层大气的元素组成。



▲ 图 4-3-6 河姆渡出土的“朱漆碗”，外壁均涂有一层朱红色涂料，经光谱分析鉴定为生漆

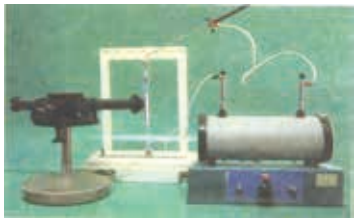


▲ 图4-3-7 考古学家运用光谱检测仪对越王勾践剑进行无损科学检测

在医学上，光谱分析被用来分析药物的组成、血液的成分以及对肿瘤进行诊断，为治病救人提供依据。在食品检测中，借助光谱分析可以检测食品中添加剂、重金属的含量，为我们的健康保驾护航。光谱分析还可用来分析空气质量，探测环境污染等，在生产生活和科研的各个领域发挥重要作用。

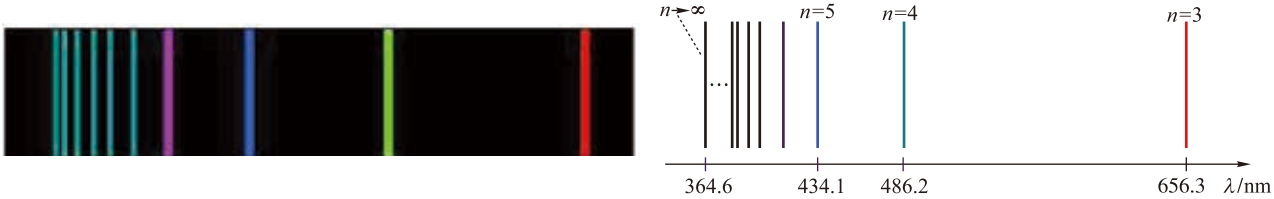
天文学家利用光谱分析，在弥漫天宇的星云里找到了有机分子，这一重要发现暗示着茫茫太空中可能存在着生命。利用光谱分析还发现遥远的星体发出的光谱有所谓“红移”现象，据此伽莫夫提出了宇宙起源的大爆炸学说。

氢原子光谱



▲ 图4-3-8 通过仪器观察氢原子光谱

如图 4-3-8 所示，在真空管中充入稀薄的氢气，两极加上 2 ～ 3 kV 的高压，在电场的激发下，氢原子就会发光，通过分光镜就可以观察到氢原子光谱。氢原子光谱在可见光范围内存在 4 条分立的谱线。图 4-3-9 为氢原子光谱的片段。



▲ 图 4-3-9 氢原子光谱的片段（右图上的“n”就是巴尔末公式中的“n”）

巴尔末是瑞士的一位中学教师，他在 1885 年将已发现的氢光谱的可见光部分的 4 条谱线的波长归纳为一个数学公式

$$\lambda = B\frac{n^2}{n^2-4}\quad (n=3,\ 4,\ 5,\ 6)$$

其中 B 是一个常量，其值为 $B=3.65\times10^{-7}\ \mathrm{m}$。这个公式被称为巴尔末公式。巴尔末后来发现，氢光谱紫外部分谱线的波长，若 $n=7$，8，9，10，11，也可以用上式表示。

1895 年，里德伯将巴尔末公式改写为

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\mathrm{H}}\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right)\quad (n=3,\ 4,\ 5,\ 6)$$

在此研究的基础上，科学家又在紫外区和红外区发现了一些新的氢原子谱线系。经过多年的努力，人们终于找到了描述氢谱线的简洁而优美的公式，称之为广义巴尔末公式 ：

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\mathrm{H}}\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right)\quad (m=1,\ 2,\ 3,\ \cdots\ ;n=m+1,\ m+2,\ m+3,\ \cdots)$$

式中 R_{H} 称为**里德伯常量**（Rydberg constant），对于氢原子，实验测得 $R_{\mathrm{H}}=1.10\times10^{7}\ \mathrm{m}^{-1}$。此后一些描述其他元素谱线的公式陆续被发现。

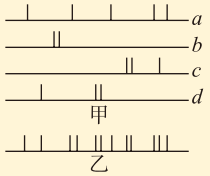
当科学家们为这些发现而欣喜的同时，也为无法说明这些谱线产生的原因而苦恼。根据卢瑟福的核式结构模型和经典电磁理论，电子绕核运动所辐射的电磁波频率应当是连续分布的，即形成一个连续的频谱。但是实际观察到的却是只存在某些特定的分立的频率，形成的是线状谱。面对这些问题，丹麦物理学家玻尔进行了深刻的思考，由此提出了新的原子结构理论。

物理公式携带物理“图像”，一个物理学家要学会勘破物理公式里的奥秘，端详出物理公式中的物理内涵。

自我评价

1. 把光谱按形成原因划分，可分为哪两类？发射光谱按形状分布特点划分，可分为哪两类？

2. 如图 4-3-10 甲所示的 a、b、c、d 为四种元素的特征谱线，图乙为某矿物的线状谱，通过光谱分析可以确定该矿物中缺少哪一种元素？



▲图4-3-10

3. 观察氢原子的光谱，发现它只有几条分离的不连续的亮线，其原因是氢原子（　　）

A. 有时发光，有时不发光

B. 只能发出平行光

C. 辐射的光子能量是不连续的

D. 发出的光互相干涉的结果

发展空间



课外阅览

原子结构和原子光谱

自 19 世纪初，伍朗斯顿（W.H.Wollaston，1766—1828）和夫琅禾费（J.Fraunhofer，1787—1826）注意到太阳光谱中的某些暗线与火焰光谱中一些亮线的位置一致以后，有关它们的起源的问题就提出来了。这个问题在 1859 年由海德堡的物理学家基尔霍夫（G.Kirchhoff，1824—1887）和化学家本生（R.Bunson，1811—1899）合作基本上得到解决——暗线中的那些离散谱线被太阳大气吸收。但仍有两个问题需要解决：

1. 原子或原子的聚集体（分子）吸收（也发射，如基尔霍夫假设的）这些谱线吗？

2. 吸收（和发射）离散谱线的机制是什么？

为了回答这两个问题，虽然人们付出了相当大的努力，但在普朗克（Planck）于 1900 年引入量子假设时，还不能认为找到了答案。

一年后，普朗克认为：“在光学和电动力学里以往所提出的问题中，关于光谱中光的本性的问题算得上是最困难和最复杂的。”也许这种问题也需要在量子观念的帮助下才能得到解决。

“自从发现光谱分析以来，任何有见识的人都不会怀疑，只要学会理解光谱语言，原子问题就能够解决……它是那台神秘的乐器，大自然在它上面演奏光谱音乐，并按照它的韵律组织原子和原子核的结构。”阿诺德·索末菲（A.Sommerfeld，1865—1951）在他那本名著《原子结构和光谱》的前言中这样写道。

4 玻尔的原子模型　能级

玻尔（图 4-4-1）了解到卢瑟福的原子模型所遇到的困难，但他认为其中的原因不在于模型本身，而在于经典

理论，应当对这一理论进行改进。正当玻尔在为改进经典理论而苦思冥想时，他见到了简洁的巴尔末公式，并深受启发。后来他不止一次地说过："当我一看到巴尔末公式，整个事情就豁然开朗了。"



▲ **图4-4-1**　玻尔（Niels Bohr，1885 — 1962）

玻尔的原子结构理论

玻尔把原子的核式结构模型、原子光谱和普朗克量子概念结合起来，用来阐明原子结构。1913 年，玻尔提出了著名的原子结构和氢光谱理论，他的论著成为原子物理的划时代文献。玻尔的原子结构理论主要有以下两方面的内容。

第一，电子围绕原子核运动的轨道不是任意的，而是一系列分立的、特定的轨道，围绕原子核运动的电子轨道半径的大小只能是符合一定条件的，我们称之为轨道量子化。如氢原子中电子的轨道半径可以是 0.053 nm，0.212 nm，0.477 nm，…，电子可以在这些轨道上运行，但是不能在介于这些特定半径之间的轨道运行，如图 4-4-2 所示。



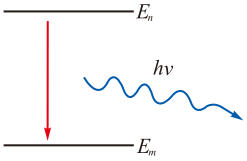
▲ **图4-4-2**　玻尔的氢原子模型

不同的轨道实际对应着原子的不同状态，不同状态的原子具有不同的能量。因此，原子的能量也是量子化的，这些不同的能量值就称为**能级**（energy level）。当电子在这些轨道上运动时，原子是稳定的，不向外辐射能量，也不吸收能量，这些状态称为**定态**（stationary state）。能量最低的状态称为**基态**（ground state），其他状态称为**激发态**（excited state）。

第二，电子以 r_n 的轨道半径绕核运动时，原子的能量用 E_n 表示，n 称为**量子数**（quantum number）。当原子中的电子从能量较高的定态 E_n 跃迁到另一能量较低的定态 E_m 时，就会发射一个光子，如图 4-4-3 所示。光子的能量

$$h\nu = E_n - E_m$$

这被称为玻尔频率条件。反之，当电子吸收某一能量的光子后会从低能级状态跃迁到高能级状态，吸收的光子的能



▲ **图4-4-3**　电子跃迁示意图

量也由玻尔频率条件决定。这里的“跃迁”可以理解为电子从一个能量状态到另一个能量状态的突变。

用玻尔的原子结构理论解释氢原子光谱

玻尔根据自己的原子结构理论，导出氢原子的能级公式

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

$$E_1=-13.6\ \text{eV},\ E_2=-3.4\ \text{eV},\ \cdots$$

对应的轨道半径是

$$r_n=n^2r_1\quad (n=1,\ 2,\ 3,\ \cdots)$$

$$r_1=0.53\times10^{-10}\ \text{m},\ r_2=0.212\times10^{-9}\ \text{m},\ \cdots$$

根据以上结果，可以得到如图 4-4-4 所示的玻尔原子模型示意图。

由于氢原子的能量是分立的，氢原子从高能级向低能级跃迁时发出的光子的能量也是分立的，因此氢原子发光的光谱也是分立的（图 4-4-5）。由频率条件和上述能级公式，可得光子能量

$$h\nu=E_n-E_m=E_1\left(\frac{1}{n^2}-\frac{1}{m^2}\right)$$

由于光子频率$\nu=\frac{c}{\lambda}$，因此上式可写成

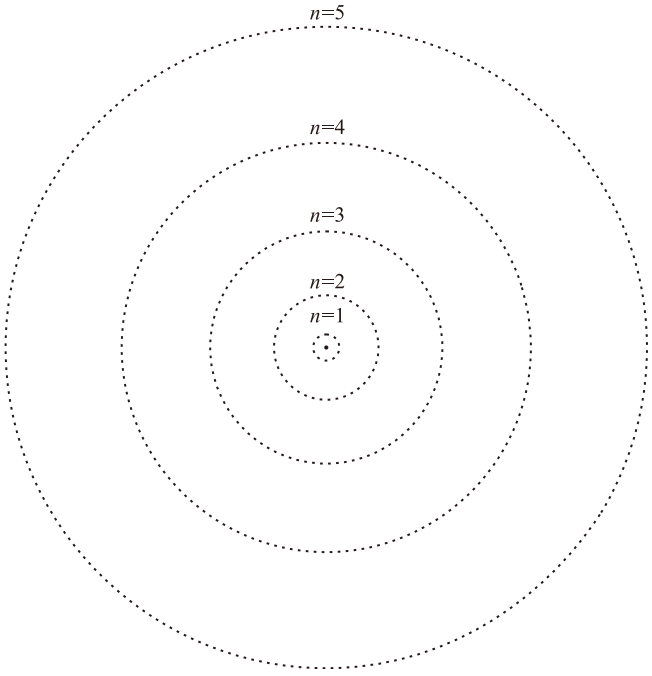
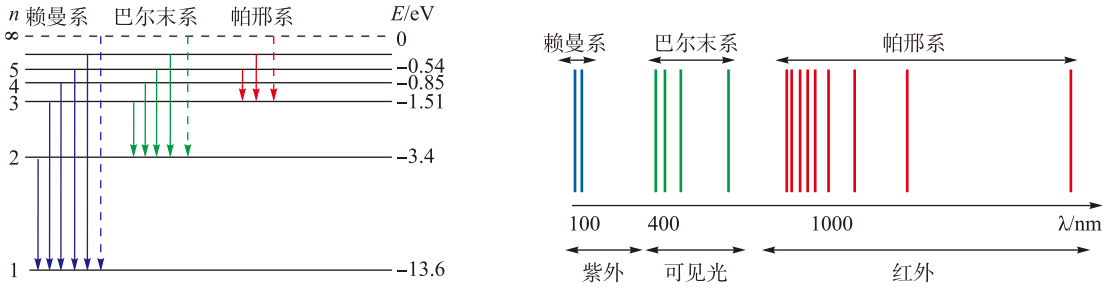


图4-4-4 玻尔原子模型示意图

$$\frac{1}{\lambda}=-\frac{E_1}{hc}\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right)$$

用实际数据代入计算，$\left(-\frac{E_1}{hc}\right)$ 与上一节巴尔末公式中的里德伯常量相当吻合。玻尔理论除了成功地解释了已知的氢原子谱线，也预言了当时未发现的氢原子的其他谱线，进一步证明微观世界是量子化的。

从玻尔理论来看，赖曼系谱线是电子由 $n>1$ 的轨道跃迁到 n=1 的轨道时向外辐射的光子形成的；巴尔末系谱线是电子由 $n>2$ 的轨道跃迁到 $n=2$ 的轨道时向外辐射的光子形成的；帕邢系谱线是电子由 n>3 的轨道跃迁到 $n=3$ 的轨道时向外辐射的光子形成的（图 4-4-6）。



▲ **图4-4-5**　氢原子能级和谱线图

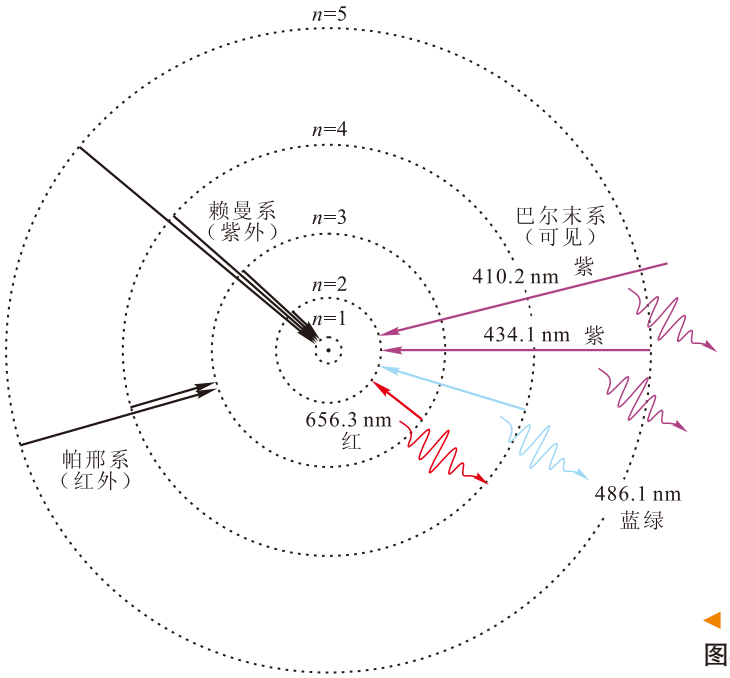


图4-4-6　用玻尔理论解释氢光谱

玻尔原子结构理论的意义

成功地解释了某些实验现象并不是一个理论正确的充分条件。

玻尔的原子结构理论冲破了旧理论的桎梏，将量子概念引入原子模型，成功地解释了氢光谱。他用能级跃迁理论阐明了光谱的吸收和发射，进一步揭示了微观世界中的“量子”现象，由此推动了量子理论的发展。但是，玻尔原子结构理论还不能解释谱线的强度和偏振情况。在解释有两个以上电子的原子的复杂光谱时也遇到了困难，这说明玻尔的理论是不完善的。

自我评价

1. 用玻尔理论解释：为什么原子的发射光谱都是一些分立的亮线？
2. 在玻尔原子模型中氢原子的能级是怎样随量子数 n 的增加发生变化的？
3. 关于玻尔的原子模型，下列说法正确的是（　　）

A. 该模型是基于能量量子化、轨道量子化和跃迁假说而提出来的

B. 它彻底否定了卢瑟福的核式结构学说

C. 它完全抛弃了经典的电磁理论

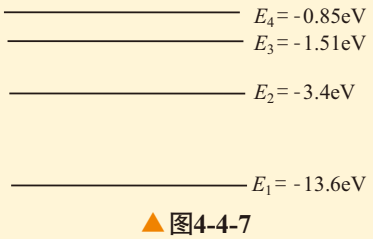
D. 玻尔理论还没有完全揭示微观粒子运动的规律，它是一种半经典的量子论

4. 氢原子的基态能量为 E_1，激发态能量为 $E_n=\frac{E_1}{n^2}$，其中 $n=2, 3, \cdots$ 用 h 表示普朗克常量，c 表示真空中的光速，能使氢原子从第一激发态电离的光子的最大波长为多大？

5. 如图 4-4-7 所示为氢原子最低的四个能级，其中 E_1 为基态，若氢原子 A 处于激发态 E_2，氢原子 B 处于激发态 E_3，问：

（1）原子 A、B 各自可能辐射出多少种频率的光子？

（2）原子 B 能够吸收原子 A 发出的光子并从基态跃迁到能级 E_4 吗？为什么？



▲图4-4-7

发展空间

课外阅览

玻尔原子理论的困难与量子力学

玻尔的原子理论第一次将量子观念引入原子领域。1914 年，也就是玻尔原子理论提出后的第二年，德国物理学家弗兰克和赫兹通过实验证实了原子分立能态的存在，为玻尔假设提供了有力的证据，使卢瑟福 - 玻尔原子模型以及能量量子化、能级、跃迁等概念得到承认。

然而，玻尔原子理论无法计算光谱的强度。玻尔原子理论在解释核外只有一个电子的氢光谱上获得了成功，但是用来解释具有两个以上电子的比较复杂的原子光谱（包括氦原子光谱）时却遇到了困难，理论推导出来的结论跟实验事实出入很大。这是因为玻尔还是过多地保留了经典物理理论，仍然把电子的运动看作经典力学描述下的轨道运动。而建立在量子力学基础上的原子理论告诉我们，核外的电子并没有确定的轨道，我们只能知道核外电子在原子内各处出现的概率，电子在核外的运动情况，通常用“电子云”来形象地描述。玻尔的电子轨道，只不过是电子出现概率最大的地方。

1925 年海森伯通过对玻尔理论的深入研究，创立了量子理论的矩阵力学，1926 年薛定谔源于德布罗意物质波的观念，创立了量子理论的波动力学。两者形式不同，实际上是相通的，合称量子力学。薛定谔从麦克斯韦光的电磁学说得到启发，认为电子的德布罗意波也可以用类似于光波的方式来描述，于是写出了描述物质波的方程。在薛定谔方程中，只有原子中的电子具有某些不连续的能量值时，这个方程才有解。由薛定谔方程解出的氢原子中电子能量的可能值，正好就是由玻尔原子理论给出的值。玻尔理论的基本假设，正是量子力学理论上推导出来的必然结果。从解薛定谔方程得到的结果，不但成功地解释了玻尔原子理论所能解释的现象，而且能够解释大量与玻尔原子理论不符的实验事实。

反思 · 小结 · 交流

• 学后反思

1897 年，汤姆孙发现了比原子更小的“微粒”——电子，并且推定它广泛地存在于各种原子内部，从而打破了原子不可分的观念。卢瑟福基于 α 粒子散射实验的事实提出了原子的核式结构模型。

玻尔通过对氢原子光谱的研究，提出了玻尔的原子理论，用玻尔的原子理论可以很好地解释氢原子及其他类氢原子的光谱规律，但它也有局限性。这一系列的理论进化，彰显了人类认识物质世界的历程中所蕴含的艰辛与智慧。

• 自主小结

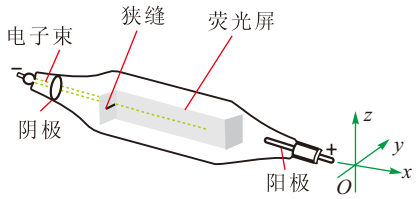
1. 汤姆孙是如何证明阴极射线是比原子更小的带负电的微粒的？
2. 卢瑟福为什么要否定汤姆孙提出的原子的“枣糕模型”，提出原子的“核式结构模型”？
3. 氢原子光谱特征的发现，对经典物理学理论提出了怎样的挑战？
4. 玻尔的原子结构理论能否成功解释氢原子光谱？

• 相互交流

通过本章的学习，你对物理实验与建立物理模型之间的关系有怎样的认识？

本章复习题

1. 如图所示是阴极射线管的示意图。接通电源后，阴极射线由阴极沿 x 轴方向射出，在荧光屏上会看到一条亮线。要使荧光屏上的亮线向下（z 轴负方向）偏转，可以通过怎样的方式实现？



▲第 1 题图

2. 如果 α 粒子以速度 v 与静止的电子发生弹性正碰，则碰撞后 α 粒子的速度变化多大？并由此说明：为什么原子中的电子不能使 α 粒子发生明显的偏转？

3. 根据原子的核式结构模型，下列说法中正确的是（　　）

A. 原子核的直径大约是 10^{-10} m

B. 原子的质量几乎全部集中在原子核内

C. 原子的全部正电荷都集中在原子核里

D. 电子在核外旋转，库仑力提供向心力

4. 下列有关光谱问题的论述中，正确的是（　　）

A. 熔化的钢水发出的光通过分光镜所得到的是连续光谱

B. 气体发出的光只能产生明线光谱

C. 光谱分析的优点是非常灵敏与迅速

D. 进行光谱分析，可以用连续光谱，也可以用吸收光谱

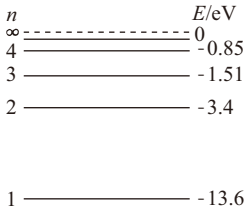
5. 判断下列有关氢原子光谱的说法是否正确，并说明理由：

(1) 氢原子光谱说明氢原子只能发出特定频率的光；

(2) 氢原子光谱说明氢原子能级是分立的；

(3) 氢原子光谱线的频率与氢原子能级的能量无关。

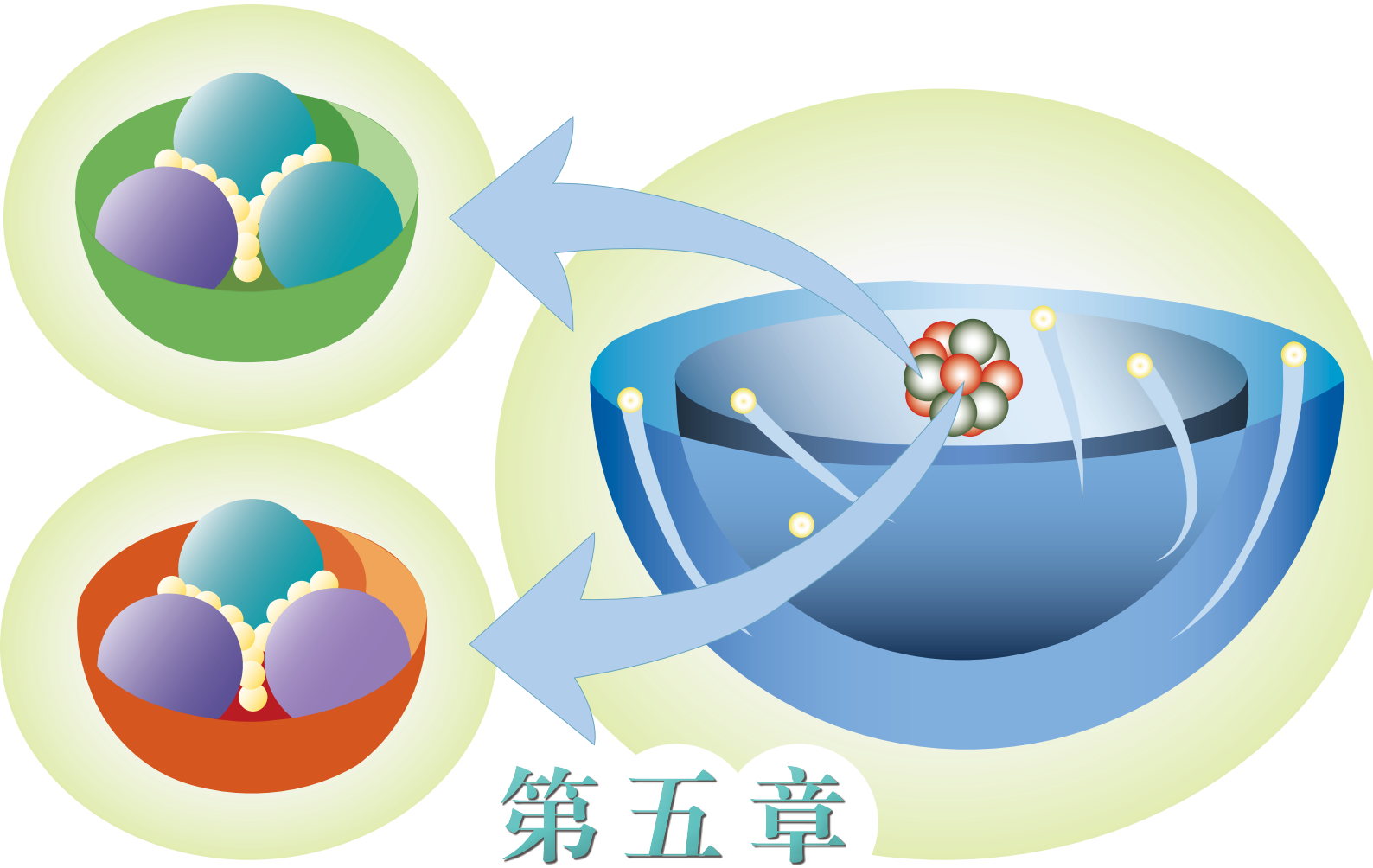
6. 氢原子部分能级如图所示，已知可见光的光子能量在 1.62 ～ 3.11 eV 之间。通过计算说明氢原子从 $n = 3$ 能级向 $n = 2$ 能级跃迁时发出的光是可见光。



▲第 6 题图

7. 氢原子处于基态的能量为 $E_1 = -13.6$ eV，一个氢原子从基态跃迁到 $n = 2$ 的激发态，需要吸收多少能量？如果用可见光照射，能发生这样的跃迁吗？

8. 氢原子能级如第 6 题图所示，一群处于 $n = 4$ 能级的氢原子，放出的光子的最大能量有多大？



第五章

原子核与基本粒子

- 原子核的组成
- 放射性元素的衰变
- 核反应　结合能
- 核裂变　核聚变
- 粒子物理学发展概况

今天，人类已经具备探测大到10^{26} m，小到10^{-19} m的世界的能力。这里精彩纷呈，变化万千。

1 原子核的组成

原子核的概念是卢瑟福及其合作者，在 α 粒子散射实验中建立起来的。通过 α 粒子对金箔的散射，卢瑟福发现原子全部的正电荷以及几乎全部的质量集中在原子中心一个非常小的区域内，这个带正电荷的部分就是原子核。

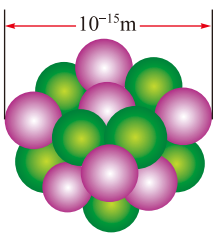
原子核的组成

玻尔的原子模型建立后，科学家接着就思索这样的问题：原子核还能不能再分？若能再分，那么原子核又是由什么构成的呢？

1919 年，卢瑟福用 α 粒子轰击氮原子核，发现了氢原子核，即**质子**（proton）从氮原子核中被打了出来。后来，人们用同样的方法使氟、钠、铝等核发生了类似的转变，并且都产生了质子。由于从各种原子核里都能打出质子来，可以证实质子普遍存在于原子核之中，是原子核的组成成分。

发现了电子和质子之后，人们最初猜测原子核就是由电子和质子组成的。实验结果显示，带正电的质子的质量大体上只占原子核质量的一半。卢瑟福在 1920 年提出猜测：核内可能还存在一种电中性的粒子。

英国物理学家查德威克（J. Chadwick，1891—1974）一直在想方设法寻找这种电中性粒子。1932 年，当他用 α 粒子轰击铍时，得到了一种不带电的粒子，它的质量几乎与质子相等。查德威克意识到这种粒子可能就是卢瑟福所预言的中性粒子，他将这种粒子命名为**中子**（neutron）。如果将原子核看成是由质子和中子组成的，则原子的质量可以得到解释，因此这一看法很快得到了公认。人们将质子和中子统称为**核子**（nucleon）。



▲ **图5-1-1** 原子核的直径只有大约10^{-15}m

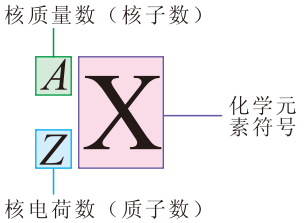
中子不带电，因此，原子核所带的电荷数就等于它的质子数，原子序数为 Z 的原子核中有 Z 个质子。原子核中的中子数 N 和质子数 Z 的和用 A 表示，即

$$A = Z + N$$

A 叫原子核的**质量数**（mass number），核的质量几乎就等于 A 乘以一个核子的质量。

原子核通常用符号${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$表示，如图 5-1-2 所示。其中 X 表示该核所属的化学元素符号，在元素符号的左下角和左上角分别标出它的电荷数和质量数。例如，${}^{4}_{2}\mathrm{He}$代表电荷数为 2、质量数为 4 的氦核；又如${}^{235}_{92}\mathrm{U}$代表电荷数为 92、质量数为 235 的铀核。质子就是氢核，通常用符号${}^{1}_{1}\mathrm{H}$或${}^{1}_{1}\mathrm{p}$表示。中子用符号${}^{1}_{0}\mathrm{n}$表示。

原子核的质量常用原子质量单位u（atomic mass unit）来表示。按照1960年和1961年两次国际会议规定，它等于碳最丰富的同位素${}^{12}\mathrm{C}$原子质量的1/12，也即同位素${}^{12}\mathrm{C}$的原子质量恰好为12 u。原子质量单位与国际单位制单位的换算关系为$1\,\mathrm{u} = 1.660559 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$。用这个单位来度量原子核时，其质量都接近于某个整数。这个整数就是原子核的质量数A。

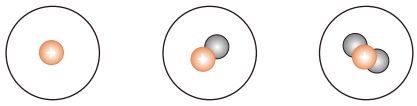


▲ **图5-1-2**　原子核的表示

同位素

实验发现，原子序数相同的原子核并不总是具有相同的质量，它们的中子数可以不同，这些原子序数相同而中子数不同的原子核互称为**同位素**（isotope）。例如，氢有三种同位素，叫作氕（氢）、氘（重氢）、氚（超重氢），分别用${}^{1}_{1}\mathrm{H}$、${}^{2}_{1}\mathrm{H}$、${}^{3}_{1}\mathrm{H}$来表示（图 5-1-3）。

质子数相同而中子数不同的原子核叫作**同位素**，“同位”取在周期表中位置相同之意。



▲ **图5-1-3**　氢的三种同位素

同位素具有相同的化学性质，但由于中子数不同，它们的某些物理性质会有所不同，因此用途也有所不同。例如${}^{235}_{92}\mathrm{U}$和${}^{238}_{92}\mathrm{U}$，都是铀元素，前者是核电站的关键原料，而后者往往是核电站的废料。

核力

除氢原子外，其他原子的核内有不止一个质子，它们之间距离很小，因此库仑斥力很大。为什么它们能结合在一起，成为一个稳定的原子核？

活动

试估算两个质子之间的万有引力和库仑力的大小。假设两个质子间的距离为 $8\times10^{-16}\,\mathrm{m}$，质子的质量大约是电子的 1800 倍，已知电子质量约为 $9.1\times10^{-31}\,\mathrm{kg}$，引力常量 $G=6.7\times10^{-11}\,\mathrm{Nm^2/kg^2}$，静电力常量 $k=9.0\times10^{9}\,\mathrm{Nm^2/C^2}$，基本电荷 $e=1.6\times10^{-19}\,\mathrm{C}$。万有引力能将核子聚集在一起吗？

我们已经知道，质子带正电荷，中子不带电。因此，原子核中的粒子（即核子）之间必须有一个强大的作用力才能将它们结合在一起，否则质子之间的库仑斥力会使原子核裂开。显然，这个强大的作用力不可能是万有引力，因为从估算的结果可以看出，库仑力比万有引力大许多个数量级。可见，能将原子核中的核子结合在一起的是另一种力。

这种核子之间的相互作用力，称为**核力**（nuclear force），它属于四种基本相互作用中的强相互作用。

在原子核中，质子之间除了有核力外，还有正电荷之间的库仑斥力，而中子与质子之间只有核力，没有库仑斥力，从而缓解了质子之间库仑斥力的影响。因此质子越多的原子核，就需要有更多中子来维持核的稳定，在大而稳定的原子核中，中子的数量多于质子。例如 $^{197}_{79}\mathrm{Au}$有 79 个质子和 118 个中子，$^{238}_{92}\mathrm{U}$ 有 92 个质子和 146 个中子。

有关核力的性质及本质，目前仍在进一步研究之中。

自我评价

1. 原子核非常小，无法直接观察，科学家怎么知道原子核的构成？
2. 计算$^{237}_{93}\mathrm{Np}$核里有多少个质子，多少个中子？$^{30}_{15}\mathrm{P}$的核里有多少个质子，多少个中子？
3. 试写出铀的 2 种同位素，它们有何异同？
4. 为什么在质量较大的原子核中，中子数往往大于质子数？
5. 现在，科学家们正在设法探寻“反物质”。所谓“反物质”是由“反粒子”构成的。带电的“反粒子”与其对应的正粒子具有相同的质量和相同的电荷量，但电荷的符号相反。据此，若有“反 α 粒子”，它的质量数和电荷数为多少？

发展空间

课外阅览

汤川秀树与π介子理论

中子 - 质子组成原子核的模型被确定后，人们面临这样一个问题：在原子核中，直径为 10^{-15}m 范围内聚集着几十、甚至上百个核子，是什么样的力使这么多的粒子安于束缚在如此小的一个核内？

在海森伯、狄拉克的交换相互作用概念和塔姆、伊凡年科对核力研究的启示下，1935 年，汤川秀树（Yukawa Hideki）提出自己的核力场量子假说。他利用符合实验的短程核力势，算得核力场量子（称为“介子”）的质量 m 大约是电子质量 m_e 的 200 倍。质子和质子间、质子和中子间、中子和中子间都有一种由于交换介子而相互吸引的作用力。在近距离时，远比电荷间的库仑作用力强，但在稍大距离时即减弱为零，这种作用就是核力。10 年后，英国物理学家鲍威尔（C.F.Powell）在宇宙射线的乳胶底片上发现了一个新粒子（π 介子）。经证明，π 介子就是汤川秀树在 1935 年提出的介子。

从汤川秀树的核力理论的提出，到 π 介子的发现，人类对物质的认识向前跨进了一步，开辟了一个新的领域，即从认识原子核深入到认识基本粒子的领域。

2　放射性元素的衰变

关于原子核内部的信息，最早来自天然放射现象。1896 年，法国物理学家亨利·贝克勒尔（H. Becquerel，1852—1908）发现铀化合物能放出某种射线，使密封完好的照相底片感光。这一发现虽然没有像伦琴发现 X 射线那样轰动一时，但意义却更为深远。这种辐射后来被人们称为“贝克勒尔辐射”。

天然放射性

居里夫人（图 5-2-1）认为贝克勒尔发现的现象具有普遍性，她首先使用了“放射性”一词来描述物质的这种性质。她与丈夫皮埃尔·居里（Pierre Curie，1859—1906）一起，经历了艰苦的提纯工作，于 1898 年从沥青铀矿盐中分离出一种放射性比铀强得多的新金属元素“钋”



▲ **图5-2-1**　居里夫人（Marie Curie，1867—1934）

（Polonium）。1902 年，居里夫妇又证实了另一种放射性更强的金属“镭”（Radium）的存在。因为发现放射性，贝克勒尔和居里夫妇分享了 1903 年诺贝尔物理学奖。

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

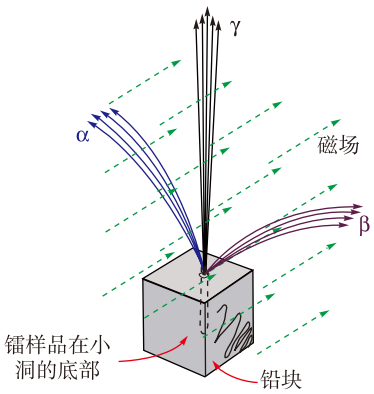
射线的性质

发现天然放射现象以后，人们就在想，这些射线到底是什么？有什么性质？

讨论交流

我们已经知道射线能使照相底片感光，那么，我们用什么方法知道这些射线是否带电？以及带何种电荷？

卢瑟福设计了一个实验，他在铅块上钻了一个小孔，孔内放一点镭，使射线只能从这个小孔里发出。随后他将射线引入强磁场中，发现一束射线分成了三束，其中两束左右分开，分别向相反的方向偏转，另外一束不偏不倚一直向前（图 5-2-2）。卢瑟福将它们分别命名为 α 射线（α-ray）、β 射线（β -ray）和 γ 射线（γ-ray）。

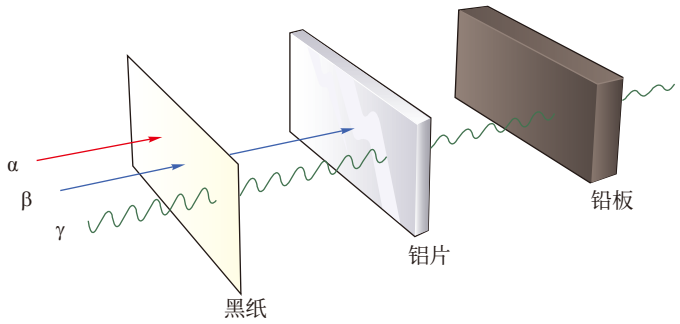


▲ **图5-2-2** 磁场对α、β和γ射线的作用

实验证明，α 射线其实就是 α 粒子（氦原子核）流。α 粒子带正电，速度只有光速的 10%，穿透能力弱，容易被物质吸收。一张薄薄的铝箔，或一层包裹底片的黑纸，甚至人体皮肤的角质层，都能将它挡住（图 5-2-3）。

β 射线是带负电的电子流，它的速度很快，穿透力强，在空气中可以走几十米远，而碰到几毫米厚的铝片就不能穿过了。

γ 射线本质上是一种波长极短的电磁波，波长约是 X 射线波长的 1%，穿透力极强，能穿过厚的混凝土和铅板。



▲ 图5-2-3　α射线、β射线和γ射线的穿透能力比较

人工放射性同位素

有些同位素具有放射性，称为放射性同位素。1934年，约里奥·居里夫妇发现经过α粒子轰击的铝片中含有放射性磷 ${}^{30}_{15}\mathrm{P}$，即

$$ {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{27}_{13}\mathrm{Al} \longrightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} $$

自然界没有天然的 ${}^{30}_{15}\mathrm{P}$，它是通过核反应生成的人工放射性同位素。在这之前人们只知道有铀、钍、镭、钋等天然存在的放射性元素，这些元素都是位于元素周期表末尾的重核元素。

天然放射性同位素不过40多种，而今人工制造的放射性同位素已达3000多种。与天然放射性物质相比，人工放射性同位素的放射强度容易控制，还可以制成各种所需的形状。特别是，它的半衰期（后文会学习到）比天然放射性物质短得多，因此放射性废料容易处理。

活动

观看视频，查阅资料，调查了解放射性同位素的广泛应用以及放射线的危害与防护。

衰变

放射性元素是不稳定的，会自发地蜕变为另一种元素，同时放出射线，我们称这种现象为**放射性衰变**（radioactive decay）。在衰变过程中，有些放射性元素放

出 α 射线，有的放出 β 射线，有些还伴随着 α 或 β 射线而放出 γ 射线。

例如，$^{238}_{92}U$核放出一个 α 粒子后就变为 $^{234}_{90}Th$核。我们把这种放出 α 粒子的衰变叫作 α 衰变。这个过程可以用下面的方程式表示

$$^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$$

在这个衰变过程中，衰变前核的质量数之和等于衰变后各原子核的质量数之和；衰变前的电荷数之和等于衰变后各原子核的电荷数之和。大量实验表明，原子核衰变前、后电荷数和质量数均守恒。

原子核放出一个电子后，其电荷数增加 1，变成原子序数增加 1 的另一种原子核。例如，$^{234}_{90}Th$能放出一个 β 粒子（电子）而变为$^{234}_{91}Pa$。由于电子的质量比核子的质量小得多，我们可以认为电子的质量数为零，表示为$^{0}_{-1}e$。这样，上述过程可以表示为

$$^{234}_{90}Th \longrightarrow {}^{234}_{91}Pa + {}^{0}_{-1}e$$

这种放出 β 粒子的衰变叫作 β 衰变。

原子核的能量与原子的能量一样，其变化是不连续的，也只能取一系列不连续的数值，因此也存在着能级，同样是能级越低越稳定。放射性元素的原子核在发生 α 衰变、β 衰变时，蕴藏在核内的能量会释放出来，除了发射的粒子带走的能量外，产生的新核常常处于较高能级，这时它要向低能级跃迁，能量以 γ 光子的形式辐射出来。

2个中子和2个质子能十分紧密地结合在一起。在一定条件下它们会作为一个整体从较大的原子核中穿越出来，放射性元素就发生了α衰变。

原子核里没有电子，β衰变中的电子来自哪里？进一步的研究发现，β衰变的实质在于核内的中子（$^{1}_{0}n$）转变成了一个质子和一个电子，其反应方程是

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}H + {}^{0}_{-1}e + \bar{\nu}_e$$

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

$\bar{\nu}_e$是反电子中微子，它的质量比电子还要小得多，且不带电。

半衰期

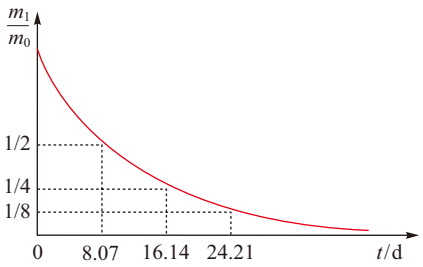
放射性元素原子核的衰变是遵循统计规律的。例如，碘核（$^{131}_{53}I$）经过 β 衰变成为氙核（$^{131}_{54}Xe$），如果隔一段时间测量一次剩余碘核的数量就会发现，每过 8.07 天就有一半的碘核发生了衰变。也就是说，经过第一个 8.07 天，剩有一半的碘核；经过第二个 8.07 天，剩有 1/4 的碘核；再经过 8.07 天，剩有 1/8 的碘核……，如图 5-2-4 所示（图中纵坐标表示的是任意时刻碘核的总质量 m 与 $t = 0$ 时碘核的总质量 m_0 的比值）。

放射性元素的衰变规律也可以用下面的方式表示。某一放射性物质所含的放射性粒子在最初即 t=0 时的数目为 N_0，经过衰变后在 t 时还没有衰变的粒子数目为 N，则有

$$N=N_0e^{-\lambda t}$$

式中的 λ 称为衰变常数，它是反映粒子衰变性质的常数，表示一个原子核在单位时间内发生衰变的概率。

因此，我们可以用“半衰期”来表示放射性元素衰变的快慢。放射性元素的原子核由于衰变而数目减少至原来一半所需的时间，叫作这种元素的**半衰期**（half life）。



▲ **图5-2-4**　碘核的衰变

单个放射性元素的衰变完全是一种随机事件。在足够多的原子核中，某个原子核在什么时刻发生衰变是不能预知的，但众多原子核在一个半衰期中有一半发生衰变是确定的。放射性元素的半衰期，描述的就是这样的统计规律。放射性元素衰变的半衰期是由核内部自身的因素决定的，跟原子所处的化学状态和外部条件（压力、温度等）没有关系。不同的放射性元素的半衰期不同，而且差别可能很大，从 10^{-6}s（甚至更小）到 10^{10}a（甚至更长）都有。表 5-2-1 中列出了一些放射性元素的半衰期数据。

表5-2-1　半衰期数据

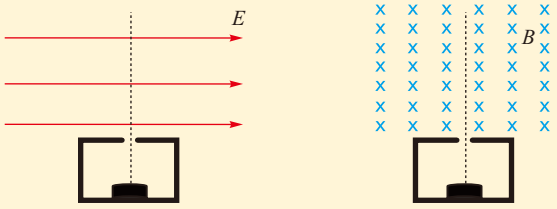
核	半衰期	核	半衰期	核	半衰期
自由中子	887s	$^{60}_{27}$Co	5.2714a	$^{237}_{93}$Np	2.14×10^{6}a
$^{199}_{79}$Au	3.139d	$^{228}_{88}$Ra	5.75a	$^{235}_{92}$U	7.038×10^{8}a
$^{224}_{88}$Ra	3.66d	$^{226}_{88}$Ra	1600a	$^{238}_{92}$U	4.468×10^{9}a
$^{131}_{53}$I	8.02d	$^{14}_{6}$C	5730a	$^{232}_{90}$Th	1.405×10^{10}a

注：表中s表示秒，d表示日，a表示年。

自我评价

1. 列表比较 α、β 和 γ 三种射线的组成、射出速度和穿透能力。

2. 如图 5-2-5 所示，铅盒内装有能释放 α、β 和 γ 射线的放射性物质，在靠近铅盒的顶部加上电场 E 或磁场 B，在图中画出射线的运动轨迹示意图。



▲ **图5-2-5**

3. 写出下列衰变方程：（1）碘（$^{131}_{53}$I）发生 β 衰变；（2）氡（$^{222}_{86}$Rn）衰变成钋（$^{218}_{84}$Po）。

4. 一个镎（$^{238}_{93}$Np）的半衰期是 2.0 天，8.0g $^{238}_{93}$Np 经过 6 天后衰变掉的质量是多少？

5. 如果 $^{14}_{6}C$ 的半衰期是 6000 年，起初有 100 g 纯 $^{14}_{6}C$，18000 年后还剩余多少？若只剩余 3 g，大约过去了多长时间？

发展空间

课外阅览

放射性同位素电池

放射性同位素电池简称“同位素电池”（Nuclear battery 或 Atomic battery），它的热源是放射性同位素。作为同位素电池的能量来源，同位素放射源必须满足以下条件：半衰期长（以保证电池的长寿命）、功率密度高、放射性危险性小、容易加工、造价低廉和易于屏蔽等。现有的放射性同位素超过 3000 种，其中可用于同位素电池的核素有近 10 种，如 ^{90}Sr、^{147}Pm、^{238}Pu、^{60}Co、^{63}Ni 等。它们在衰变过程中不断放出射线，射线携带的能量比一般化学反应释放的能量大得多。如图 5-2-6 所示的同位素电池，把放射性同位素（核燃料）放在电池中心，周围用热电元件包覆，放射性同位素发射高能量的 α 射线，使电池内部温度升高，在热电元件中将内能转化成电能。

大海的深处，是同位素电池的用武之地。用它做海底潜艇导航信标，能保证航标每隔几秒钟闪光一次，几十年内不用换电池。人们还将同位素电池用作水下监听器的电源，用来监听敌方潜水艇的活动。同位素电池还可以用作海底电缆的中继站电源，它既能耐五六千米深海的高压，安全可靠地工作，又少花费成本，令人十分称心。在医学上，同位素电池已用于心脏起搏器和人工心脏中。



▲ 图5-2-6 放射性同位素电池

3 核反应 结合能

衰变是原子核的自发变化，科学家更想人工控制原子核的变化。用 α 粒子、质子、中子、光子或高能电子去轰击一些原子核，可以制造出一些新的元素及新的放射性同位素，实现了原子核结构的人工转变。

核反应

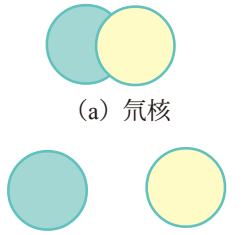
1919 年，卢瑟福用 α 粒子轰击氮原子核发现了质子的同时，发现氮原子变成了氧原子，产生了氧的一种同位素——$^{17}_{8}\mathrm{O}$，即

$$^{4}_{2}\mathrm{He}+{}^{14}_{7}\mathrm{N}\longrightarrow{}^{17}_{8}\mathrm{O}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

这是人类历史上第一次实现了原子核结构的人工转变。

原子核与原子核，或者原子核与其他粒子相互作用产生新核的过程，叫作**核反应**（nuclear reaction）。大量实验表明，在核反应中，质量数和电荷数都守恒。

原子核结合能


（a）氘核

（b）分开后的质子和中子

▲ 图5-3-1

在一个原子核里，核力将核子紧密结合在一起，例如氘核就是靠核力把一个质子和一个中子结合起来，要把它分离为孤立的质子和中子必须要施力并做功。那么图 5-3-1 中，是氘核具有较多的能量，还是氘核分离以后的质子和中子具有较多的能量？

试图将原子核中的核子拆散为质子和中子，要克服核力做巨大的功。同样，要把两个分散的核子聚集到强相互作用力的作用范围，结合成一个原子核，核力做功而释放出巨大的能量。这种由分散的核子结合成原子核的过程中所释放出的能量称为原子核的**结合能**（binding energy）。例如，对于核反应

$$^{1}_{0}\mathrm{n}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}\longrightarrow{}^{2}_{1}\mathrm{H}+\gamma$$

反应过程中要放出 2.22 MeV 的能量，这个能量就是 $^{2}_{1}\mathrm{H}$ 的结合能，它以光子（γ 射线）的形式辐射出去。我们知道，每个碳原子在燃烧时释放出的化学能不过 4eV，对比可知，原子核的结合能是非常巨大的。

科学家研究证明在核反应过程的前后，原子核的总质量并不相等，通过精确计算表明，氘核的质量比一个中子和一个质子的质量之和要小一些，这种现象叫作**质量亏损**（mass defect）。

把任何惯性质量理解为能量的一种贮藏，看来要自然得多。

——爱因斯坦

原子核的结合能很难直接测量。爱因斯坦从狭义相对论得出质量亏损 Δm 与释放的能量 ΔE 之间存在着如下的关系

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

由于单个的质子、中子的质量已经精确测出，只要测定某种原子核的质量，与同等数量的质子、中子的质量之和相比较，求出质量亏损，就可以计算出该原子核的结合能。

把上面的式子进行扩展，即如果质量为 m 的物体，其质量完全“亏损”，则它可以释放的能量 E，满足下面的关系

$$E = m \cdot c^2$$

这个方程就是爱因斯坦关于质量与能量之间联系的方程，简称质能方程。式中 m 是物体的质量，E 是它蕴含的能量，c 是真空中的光速。该方程表明，物体所具有的能量跟它的质量成正比。由于 c^2 这个数值十分巨大，因而物体所蕴含的能量十分可观。例如质量为 1 kg 的物体，所蕴含的能量为 9×10^{16} J，这个数值相当于一个装机容量 100 万千瓦的发电厂 3 年的总发电量。

例题示范

问题 氘核是由1个中子和1个质子构成的，它们的静质量可分别取为：m_p（质子质量）= $1.672\ 6\times10^{-27}$ kg，m_n（中子质量）= $1.674\ 9\times10^{-27}$ kg，m_H（氘核质量）= $3.343\ 6\times10^{-27}$ kg。试计算中子和质子结合成氘核过程的质量亏损以及氘核的结合能。

分析 结合能是核子在结合成原子核的过程中释放的能量，爱因斯坦质能方程是解决这类问题的钥匙。

解 在这一过程中的质量亏损为

$$\begin{aligned}\Delta m &= (m_p + m_n) - m_H \\ &= 1.672\ 6\times10^{-27}\,\text{kg} + 1.674\ 9\times10^{-27}\,\text{kg} - 3.343\ 6\times10^{-27}\,\text{kg} \\ &= 3.9\times10^{-30}\,\text{kg}\end{aligned}$$

根据质能方程可知

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

$$= 3.9 \times 10^{-30} \times (3.0 \times 10^{8})^{2}\ \text{J}$$
$$= 3.51 \times 10^{-13}\ \text{J}$$
$$\approx 2.2\ \text{MeV}$$

所以氘核的结合能约为2.2 MeV。

拓展　质量和能量都是物质存在的形式，质能方程把它们联系在一起。凡是释放能量的过程都有质量亏损出现。例如燃烧等释放化学能的过程中，同样会出现质量亏损，只是亏损量很小，因此很难测量出来。而在核反应中释放的能量巨大，质量亏损不能忽略。

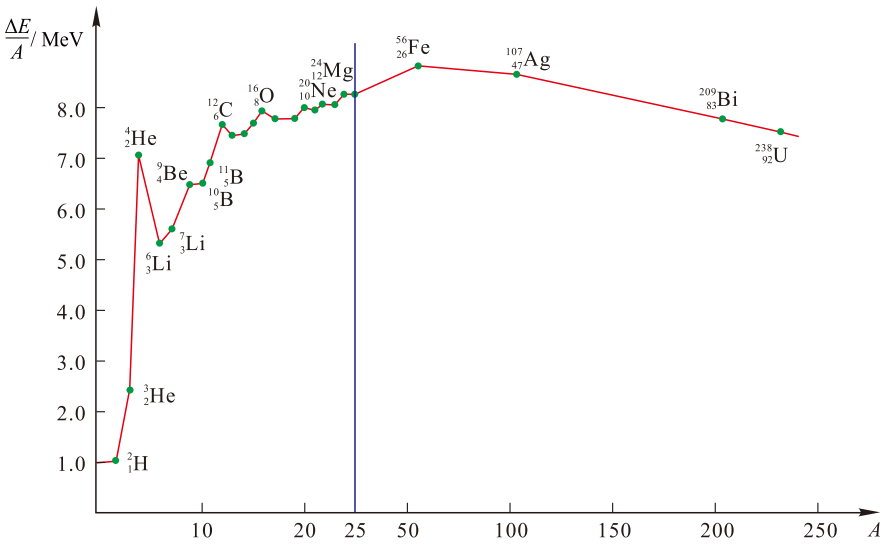
当一个电子与质子组成氢原子时，放出 13.6 eV 的能量，这些能量只有中子和质子组成氘核时放出能量的百万分之六。可见，核子结合时放出的能量是相当巨大的。

比结合能曲线

不仅质子和中子结合成氘核要释放能量，质子和中子结合成其他原子核时也要释放能量。不同核的结合能不相同，一般来说，组成原子核的核子数越多，其结合能也越大。但人们更关注的是这种原子核的平均结合能，即对一个原子核来讲，核中平均每个核子的结合能是多少。

把原子核的结合能 ΔE 除以核子数 A，即 $\frac{\Delta E}{A}$，称为原子核的**比结合能**（specific binding energy），也叫平均结合能。比如氘核的比结合能为 1.1 MeV，${}^{9}_{4}\text{Be}$核的比结合能约 6.4 MeV。不同种类的原子核其比结合能不同，比结合能越大，核就越稳定。比结合能是原子核稳定程度的量度。图 5-3-2 给出的曲线表示了原子核比结合能随核子数变化的情况，这一曲线也称比结合能曲线。

图 5-3-2 告诉我们，曲线中间高两头低，中等质量的原子核（A = 40 ～ 120）的比结合能较大，这表明中等质量的核最稳定。质量较大的重核（A > 120）和质量较小的轻核（A < 40）比结合能都较小，且轻核的比结合能曲线还有较大起伏。



▲ **图5-3-2** 比结合能曲线

在图5-3-2中，为更清晰地展示比结合能随质量数的变化，蓝色竖线右侧区域的横坐标标度是左侧区域横坐标标度的5倍。

两个轻核结合成较重的单个原子核的过程叫作核聚变。核聚变的过程中会释放能量。比结合能曲线在 Fe 附近发生了转折，重核中核子的比结合能较小，因此将一个重核分裂为两个（或多个）中等质量的核时也可以释放出核能，我们把这样的过程称为核裂变。

轻核的聚变和重核的裂变是人类利用核能的两种方式。在 20 世纪 20 年代，人们已经知晓，只是在当时还无法实现。

自我评价

1. 完成下列核反应方程式。

（1）$^{11}_{5}\mathrm{B}+(\quad)\longrightarrow{}^{14}_{7}\mathrm{N}+{}^{1}_{0}\mathrm{n}$　　（2）$^{6}_{3}\mathrm{Li}+(\quad)\longrightarrow{}^{3}_{1}\mathrm{H}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}$

（3）$^{27}_{13}\mathrm{Al}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}\longrightarrow(\quad)+{}^{1}_{0}\mathrm{n}$　　（4）$^{235}_{92}\mathrm{U}+{}^{1}_{0}\mathrm{n}\longrightarrow{}^{141}_{56}\mathrm{Ba}+{}^{92}_{36}\mathrm{Kr}+(\quad)$

2. 原子物理中常用一个特殊的质量单位，即“原子质量单位”，符号为 u，1 u =1.6605 × 10^{-27} kg。试证明，1u 相当于 931.5 MeV 的能量。已知光速 $c=2.997\,9\times10^{8}$ m/s，元电荷 $e=1.6022\times10^{-19}$ C。

3. $^{9}_{4}$Be 核由 4 个质子和 5 个中子构成，已知 $^{1}_{1}$H 的质量为 1.6726×10^{-27} kg，$^{1}_{0}$n 的质量为 1.6749×10^{-27} kg，Be 核的质量为 14.9607×10^{-27} kg。计算 $^{9}_{4}$Be 核的结合能以及它的比结合能。

4. 已知两个氘核发生如下的核反应：$^{2}_{1}\mathrm{H}+{}^{2}_{1}\mathrm{H}\longrightarrow{}^{4}_{2}\mathrm{He}$，根据图 5-3-2 的比结合能曲线，你认为核反应的过程是放出能量还是吸收能量，为什么？如果一个重核（如$^{238}_{92}\mathrm{U}$）可以分裂为两个中等质量的核，反应的过程是放出能量还是吸收能量？

5. 历史上第一次利用加速器实现的核反应，是用加速后动能为 0.5 MeV 的质子 $^{1}_{1}$H 轰

击静止的 ${}^{7}_{3}\mathrm{Li}$ 核，生成两个动能均为 8.9 MeV 的 ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$。（1 MeV = 1.6×10^{-13}J）

（1）写出核反应方程；

（2）计算核反应中的质量亏损。

发展空间

物理在线

爱因斯坦质能方程的证实

2008 年 11 月 25 日，著名的爱因斯坦质能方程 $E=mc^2$ 最终得以确证（图 5-3-3），这要归功于法国、德国和匈牙利物理学家的共同努力。

利用世界上计算能力最强大的超级计算机，一个由法国理论物理中心劳伦·勒鲁奇领导的团队测算出了质子、中子及原子核中其他粒子的质量。根据传统的粒子物理学模型，质子和中子由更小的被称为“夸克”的粒子构成，夸克则受胶子束缚。但令科学家们不解的是，胶子的质量为零，夸克的质量也只占 5%，那还有 95% 在哪里呢？据美国《科学》杂志刊登的一项研究，另外 95% 的质量存在于夸克和胶子的运动以及相互作用中。

请通过图书馆或互联网查询资料，了解支持质能方程的各类证据。



▲ **图5-3-3** 以爱因斯坦质能方程为造型的建筑装饰物

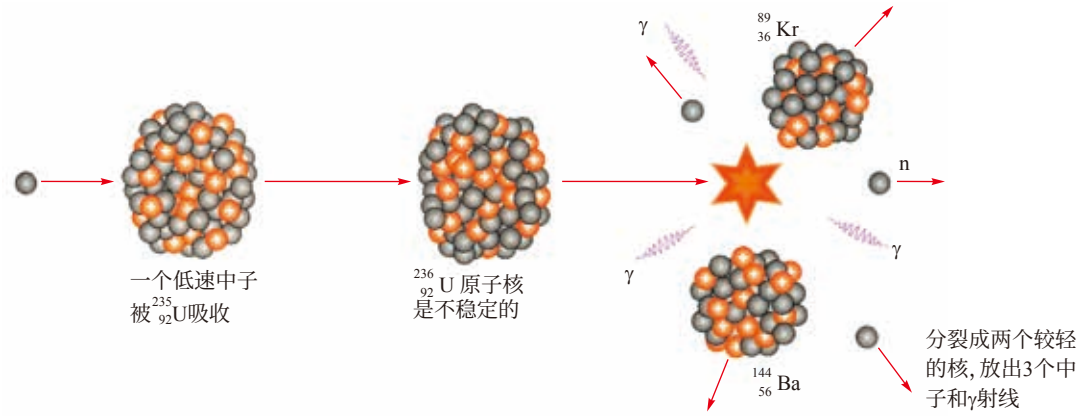
4　核裂变　核聚变

1938 年，德国放射化学家哈恩（O.Hahn）和他的助手斯特拉斯曼（F. Strassmann）发现用中子轰击铀核的产物中含有中等质量的原子核钡和氪。正是这个重大的发现改变了人类历史。

核裂变

1947年，我国著名物理学家钱三强、何泽慧夫妇首先观察到中子轰击铀核的三分裂、四分裂现象,其概率大约是分裂为两部分的概率的千分之三。

奥地利物理学家迈特纳（L.Meitner）和弗里施（O.R.Frisch）对哈恩等人的发现做出了解释：铀核在被中子轰击后分裂成两块质量差不多的新核。弗里施借用细胞分裂的生物学名词，把重核分裂成几个中等质量原子核的核反应现象称为**核裂变**（nuclear fission）。后来人们发现铀核裂变的产物其实是多样的，分裂成钡和氪同时放出 3 个中子只是其中一种典型的铀核裂变，如图 5-4-1 所示。



▲ **图5-4-1** 铀235的裂变

这个核裂变过程的核反应方程式是：

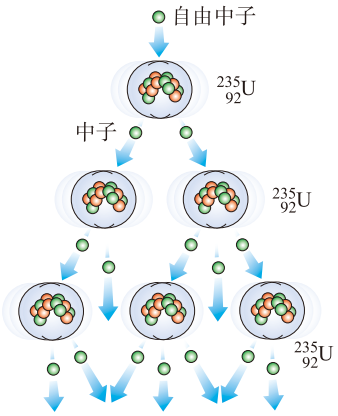
$$^{235}_{92}\mathrm{U}+{}^{1}_{0}\mathrm{n}\longrightarrow{}^{144}_{56}\mathrm{Ba}+{}^{89}_{36}\mathrm{Kr}+3{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

链式反应

如果一个反应过程的产物能够再次引发这种反应，从而使反应一旦开始后就能自动延续下去，这样的反应称为**链式反应**（chain reaction）。

实验发现，用慢中子（能量约为 0.025 eV 的中子）轰击 $^{235}_{92}\mathrm{U}$，$^{235}_{92}\mathrm{U}$ 会发生裂变，而且每次裂变可以放出 2 个以上的中子和巨大的能量，而这些放出的中子又会引起其他的铀核裂变。这样裂变就会持续进行下去，释放出越来越多的核能，这就是重核裂变的链式反应，如图 5-4-2 所示。

链式反应的维持需要一定的条件，铀块的体积对于维持链式反应是很重要的。因为原子核非常小，如果铀块的体积太小，裂变过程产生的大部分中子就会直接从铀块表面穿出而不能碰到铀核，因而不可能将链式反应维持下去。为了保证裂变时产生的中子不会轻易逃逸出去，必须使铀块有足够大的体积。我们把能够发生链式反应的裂变物质的最小体积叫作**临界体积**（critical volume）。对于铀 235 来说，其临界体积如柚子般大小，与临界体积相对应的临界质量为 15 kg 左右。



▲ **图5-4-2**　链式反应

1 g 铀 235 完全裂变释放的能量相当于燃烧约 3 t 煤放出的化学能，而且这么多能量是在短短不到 1 s 的时间之内释放出来的。原子弹之所以具有巨大的破坏力，就是因为在发生链式反应的瞬间释放出了巨大的能量（图 5-4-3）。巨大的核能如果能为人类和平利用，将意味着一场能源革命的到来。可是，怎样才能控制链式反应的速度，使核能平稳地释放出来而不至于引起核爆炸呢？在核电站中的核反应堆，核能可以平稳地释放并转化为电能。



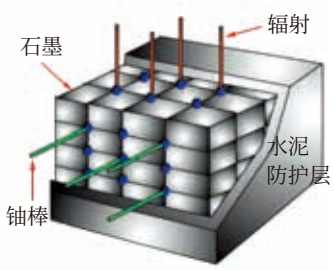
▲ **图5-4-3**　原子弹爆炸会释放出巨大的能量

核反应堆

核反应堆（nuclear reactor）是一种人为可控的核裂变链式反应装置。核反应堆按引起裂变的中子能量可分为慢中子（能量约在 0.1e V 以下）反应堆和快中子（能量约在 1.1MeV 以上）反应堆。如图 5-4-4 所示的慢中子反应堆属于第一代实用核反应堆。

核反应堆中，核反应主要是铀 235 吸收慢中子后发生的裂变，由于天然铀中铀 235 的含量只有 0.7%，反应堆中使用的核材料往往是经过浓缩的铀 235，其含量提升到 3% ～ 4%，并制成铀棒形式。

铀 235 具有能俘获慢中子，而不易俘获快中子的特点。核裂变时产生的中子速度都很快，不易被铀 235 俘获。为此在铀棒周围放置减速剂，快中子跟减速剂的原子核碰撞后能量损失，变成慢中子。常用作减速剂的物质有普通水（也叫轻水）、重水和石墨，根据减速剂的不同，又把慢中



▲ **图5-4-4**　慢中子反应堆示意图

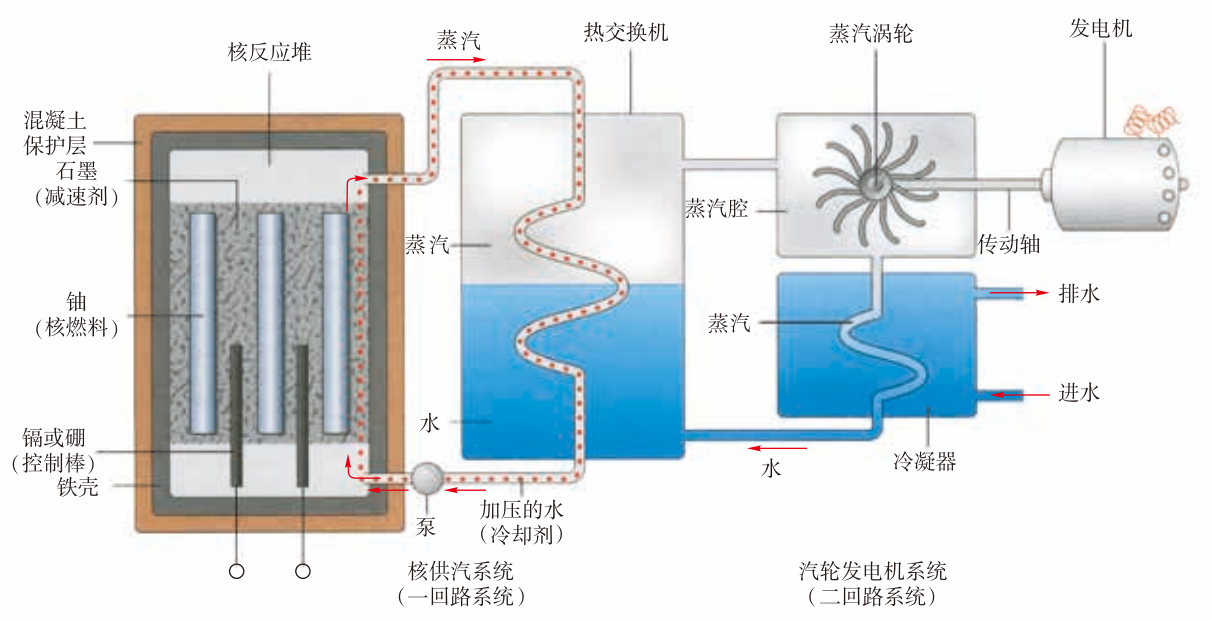
子反应堆分为轻水堆、重水堆和石墨堆等。目前已运行的核电站以轻水堆居多。

为了调节中子数目以控制反应速度，还需要在铀棒之间插入一些控制棒。制造控制棒的材料是镉或硼等能强烈吸收中子的物质，当反应过于剧烈时，就把控制棒插入得深一些，让它多吸收一些中子，链式反应的速度就会慢一些。反之则把控制棒向外拔出一些。

核电站

核能发电指利用核反应堆中核裂变所释放出的核能进行发电。这些核能先转变成水的内能，使水变成高温高压的蒸汽，去推动汽轮发电机发电。

核电站的内部通常由一回路系统和二回路系统组成，如图 5-4-5 所示。核反应堆是核电站的核心设施。核反应堆工作时放出的热量，由一回路系统的冷却剂（通常是水或液态的金属钠等）带出，产生高温高压的蒸汽。因此，整个一回路系统被称为“核供汽系统”，它相当于火电厂的锅炉系统。为了确保安全，整个一回路系统装在一个被称为安全壳的密闭厂房内，这样，万一在一回路系统



▲ **图5-4-5** 核电站示意图

发生事故时不会影响外界安全。由蒸汽驱动汽轮发电机组进行发电的二回路系统，与火电厂的汽轮发电机系统基本相同。

目前，核电已成为“中国品牌”家族里一张耀眼的名片。

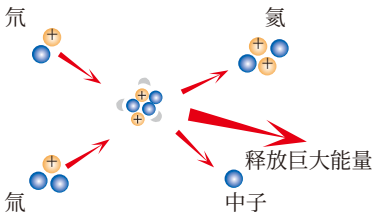
发电能力同为10^6kW的火电站与核电站一日燃料运输量的对比：

火电站，5 802.2 t

核电站，0.082 t

核聚变

把轻原子核聚合成较重原子核的反应称为聚变反应，简称**核聚变**（nuclear fusion）。在聚变反应中，要使两个带正电的轻核聚合成一个质量较大的核，必须使它们具有足够的动能去克服库仑斥力，进入到核力作用范围（10^{-15}m）内，然后通过核力的作用结合发生聚变。核聚变反应一旦发生，就不再需要外界继续提供能量，靠自身产生的能量就可以使反应继续进行下去。例如，一个氘核和一个氚核聚变成一个氦核，同时放出一个中子，如图 5-4-6 所示，这个核聚变的核反应方程是



▲ 图5-4-6　核聚变

$$ {}_1^2\mathrm{H} + {}_1^3\mathrm{H} \longrightarrow {}_2^4\mathrm{He} + {}_0^1\mathrm{n} $$

在这个过程中要释放 17.60MeV 的能量，平均每个核子放出的能量在 3 MeV 以上，是核裂变反应中平均每个核子放出的能量的 3 倍多。计算表明，要启动上述核聚变反应，必须要上亿摄氏度的温度，使${}_1^2$H核和${}_1^3$H核具有足够的动能克服库仑斥力进入到核力作用范围之内。因此，核聚变反应也称**热核反应**（thermonuclear reaction）。

核聚变反应和核裂变反应相比，具有很多优越性。首先，在消耗相同质量的核燃料时，核聚变反应比核裂变反应能释放更多的能量；其次，核裂变反应时产生放射性废料，处理起来比较困难，而核聚变反应没有放射性废料产生；最后，核聚变反应所用的燃料氘，在地球上的储量非常丰富，每升海水含 0.03 g 氘，如果用来进行核聚变反应，放出的能量约和燃烧 300 L 汽油相当。地球上蕴藏的可利用的核聚变能约为蕴藏的可利用的全部核裂变能的10^7 倍，几乎可以说是用之不竭的能源。

氘虽然在自然界中不存在，但通过中子同锂作用可以产生，而海水中含有大量的锂。

受控热核反应

人类迄今所能掌握的核聚变反应就是氢弹爆炸，其能量是在瞬间一次性爆发，只能作为武器产生巨大的破坏力。人类要想和平利用核聚变的能量，就必须使核聚变的反应过程实现可控。

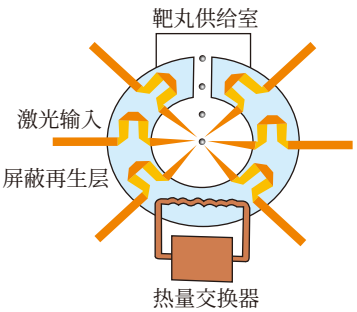
实现可控核聚变反应的难点就在于把这个高达上亿摄氏度的反应体放在何处。迄今为止，人类还没有造出能经受 1 万摄氏度的物质结构，更不用说上亿摄氏度了。为了解决这一难题，科学家设想了两种方案，即磁约束和惯性约束。

带电粒子在均匀磁场中运动会受洛伦兹力作用而不飞散，因而有可能利用磁场来约束参加反应的物质，这就是磁约束。苏联科学家于 20 世纪 60 年代建立了一种环形磁约束受控热核反应装置，也叫环流器或托卡马克（tokamak 的音译）。在这种装置中，等离子体（原子经过充分电离形成的自由电子和离子的混合态）被不同方向的磁场约束在一个环管状的金属反应室中，用电磁感应产生的强大电流对等离子体进行加热，从而实现等离子体热核燃料的“点火”。2012 年 7 月 10 日，经过长达 4 个多月的科学实验，我国“东方超环”超导托卡马克装置（EAST，图 5-4-7）科研项目获得了多项重大成果，创造了两项托卡马克运行的世界纪录：一是获得超过 400 s 的 2 000 万摄氏度的高参数偏滤器等离子体；二是获得稳定重复超过 32 s 的高约束等离子体放电。



▲ **图5-4-7** 我国自行设计建成的全超导托卡马克核聚变装置

激光惯性约束是实现可控核聚变的另一种方式，产生于 20 世纪 60 年代。我国是最早开展此项研究的少数几个国家之一，2000 年我国的激光惯性约束研究取得重要进展，建立了“神光”系列和“天光”系列装置。而这一切成就离不开激光惯性约束的创始人——物理学家王淦昌。惯性约束示意图如图 5-4-8 所示，由于聚变反应的时间非常短，聚变物质因自身的惯性还来不及扩散就完成了核反应。所以，在惯性约束下，可以用激光从各个方向照射参加反应的物质，使它们“挤”在一起发生反应。



▲ **图5-4-8** 惯性约束示意图

真正实现受控热核反应服务于人类，是科学工作者的共同理想，目前看来仍任重而道远。

讨论交流

核电站可以解决能源问题，也会带来风险。如果政府决定在你的家乡建设一座核电站，以解决当地的电力短缺问题，你会支持还是反对？说出你的理由。

自我评价

1. 为使链式反应平稳进行，可采用下列办法中的（　　）

A. 铀块体积尽量制得小些

B. 通过慢化剂将产生的中子减速

C. 用镉棒作为慢化剂使中子减速

D. 铀核裂变释放的中子直接去轰击另外的铀核

2. 关于核电站与火力发电站，下列说法正确的是（　　）

A. 核电站是利用原子的核裂变反应产生的能量发电的

B. 核能发电所用的核燃料及其裂变产物无任何污染性，可以随意处理

C. 火力发电会产生大量的温室气体，需要增加脱硫设施，核电站没有这个问题

D. 目前，核电站的能量主要来自轻核聚变

3. 若 $^{235}_{92}\mathrm{U}$ 俘获一个中子裂变成 $^{90}_{38}\mathrm{Sr}$ 和 $^{136}_{54}\mathrm{Xe}$ 两种新核，且三种原子核的质量分别为 235.043 u、89.9077 u 和 135.9072 u，中子的质量为 1.0087 u（1 u = 1.6606×10^{-27} kg，1 u 相当于 931.50 MeV）。

（1）写出上述铀核裂变的核反应方程；

（2）计算反应中释放的核能。

4. $^{235}_{92}\mathrm{U}$ 受中子轰击发生裂变，产生 $^{141}_{56}\mathrm{Ba}$ 和 $^{92}_{36}\mathrm{Kr}$，同时释放 200MeV 的能量。现要建设 1.0×10^{6} kW 的核电站，用铀 235 作为核燃料，假设核裂变释放的能量 40% 被用来发电，则该核电站每天需要纯铀 235 的质量是多大？（阿伏伽德罗常量取 6.02×10^{23} /mol^{-1}）

5. 原子核聚变有望给人类未来提供丰富的洁净能源。当氖等离子体被加热到适当高温时，氖核参与的几种聚变反应可能发生，放出能量。这几种反应的总效果可以表示为 $6\,{}^{2}_{1}\mathrm{H}\longrightarrow k\,{}^{4}_{2}\mathrm{He}+d\,{}^{1}_{1}\mathrm{H}+2\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}+43.15\ \mathrm{MeV}$，由平衡条件计算 k、d 的值。

6. 太阳因核聚变释放出巨大的能量，同时其质量不断减少。太阳每秒钟辐射出的能量约为 4×10^{26}J，试根据爱因斯坦质能方程估算太阳每秒钟减少的质量。

7. 海水中含有丰富的氘，总蕴藏量约有 2×10^{13} t。已知两个氘核可结合成一个氦核并放出一个中子，中子、氘核和氦核的质量分别为 $m_{\mathrm{n}}=1.0087$ u，$m_{\mathrm{D}}=2.0136$ u，$m_{\mathrm{He}}=3.0150$ u。

（1）写出核聚变的方程并算出释放的核能；（已知 1 u 相当于 931.5 MeV 的能量）

（2）若每升海水中含氘量为 0.03 g，让其全部发生核聚变释放的能量和完全燃烧多少千克汽油放出的热量相当？（汽油的热值 $q=4.6\times10^{7}$ J/kg）

发展空间

课外阅览

“人造太阳”

人们梦想着创造一颗“恒星”，在地球上复制出太阳和其他恒星通过核聚变产生能量的方式。如果这一梦想成为现实，人类将会获得取之不尽、用之不竭的能量，再也不需要依赖化石燃料来产生电力了，能源问题将彻底得到解决。

2006 年，参与国际热核聚变实验堆计划（ITER）的 7 方（欧盟、俄罗斯、中国、印度、美国、韩国、日本）签署了《联合实施国际热核聚变实验堆计划建立国际聚变能组织的协定》和《联合实施国际热核聚变实验堆计划国际聚变能组织特权和豁免协定》，ITER 计划正式实施。

ITER 计划是当前世界上规模最大的国际科技合作项目。由于 ITER 计划的实验堆跟太阳释放光和热的原理一样，均是通过核聚变产生能量，因此也被称为“人造太阳”。我国作为该计划的主要参与国之一，在计划实施中发挥了重要作用。我国独立自主设计研制的可控核聚变实验装置 EAST，是世界上首个该类型全超导实验装置。虽然 EAST 在体积和参数上低于 ITER 实验堆，但其独特的设计对 ITER 实验堆具有重大参考意义。2017 年 7 月，EAST 实现了等离子体放电稳定运行 101.2 s，创造了新的世界纪录。



▲图5-4-9 中国的“人造太阳”实验装置——EAST

5 粒子物理学发展概况

1932 年，中子被发现，人们终于明白了原子是由原子核和电子组成，原子核是由质子和中子组成的。这样，质子、中子、电子再加上光子等，就成为组成一切物质的基本单元，它们被称为基本粒子。

然而，人类探索微观世界的脚步并未停止，很快科学家们就发现这些所谓的基本粒子并不“基本”。首先，更多的新粒子陆续被发现，它们并不是由电子、质子和中子组成的；其次，质子、中子本身就不“基本”，它们自己

具有复杂的结构。因此，人们去掉“基本”二字，把研究物质更深层次结构的物理学分支称为“粒子物理学”。

加速器和对撞机

发现新的粒子、研究物质更深层次的结构，加速器和对撞机的发展发挥了巨大的作用。

1. 带电粒子加速器

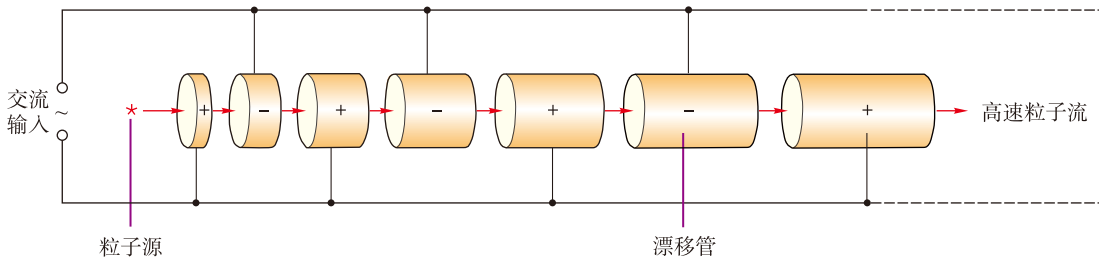
20 世纪 20 年代以前，人们利用天然放射性物质放出的 α 粒子去“轰击”原子核，用以研究原子核的结构，发现了质子和中子。但天然放射性物质放出的粒子能量不高，不能满足科研的需要，这就要设法把带电粒子加速到更高的能量，加速器应运而生，并不断改进。目前，加速器已能将电子、质子等带电粒子加速到接近光速的水平，这些高能量的粒子成为人们探索物质深层结构的主要工具。

带电粒子在电场中受到电场力作用而被加速，这就是加速器的基本原理。但由于加速电场的电压不可能加到太高，因此一次电场的加速粒子的能量达不到要求，分段多次加速成为必然的选择。

目前通用的加速器有 20 多种，按照粒子加速过程中的路径大致可以分为两类：一类是直线加速器，另一类是回旋加速器。

直线加速器是一种用高频电场加速带电粒子的谐振加速器，结构如图 5-5-1 所示。粒子的运动轨迹是一条直线，其中的一系列金属圆管称为漂移管，每个漂移管的长度依次递增，排列在奇数位置及偶数位置的漂移管各自连接成

在直线加速器中，漂移管的长度与高频电场变化频率之间的关系，就类似于共振现象中固有频率与驱动力频率之间的关系。只有“合拍”，粒子才能不断加速。

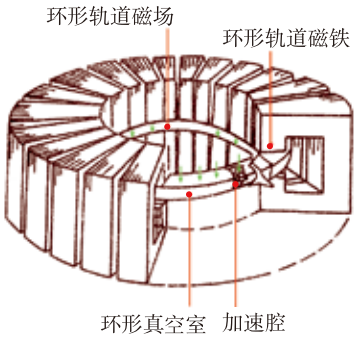


▲ **图5-5-1**　直线加速器装置示意图

一组，分别与高频振荡器的两端连接。漂移管内部电场为零，带电粒子只有在各漂移管的间隙处被电场加速。为了保证粒子每次经过两管间隙处都被加速，漂移管的长度有严格的要求，以保证粒子每次从漂移管出来时，电场已经改变方向，粒子被加速。这样经过电场的多次加速，粒子获得较高的能量。

回旋加速器的原理在《物理 选择性必修 2》中已经介绍，它的主体部分是两个 D 形的金属盒，盒内电场被屏蔽，但存在着匀强磁场，带电粒子在盒内受洛伦兹力作用而做圆周运动，在两盒间隙处被电场加速。回旋加速器带电粒子被加速后的能量受 D 形盒半径的制约，不可能很大。

环形同步加速器是在一定的环形轨道上用固定频率的高频电场加速带电粒子的装置，针对不同的带电粒子有不同的设计。电子环形同步加速器如图 5-5-2 所示，它用 C 形磁铁（可用电磁铁）组成环形结构，环形真空室位于各磁铁的磁场中，室内装有加速电极或谐振腔，高频电源产生固定频率的变化电场，用来加速电子。由于电子的静止质量很小，在能量大于 2MeV 时，速度已经接近光速，再经电场加速，能量提高，但速度变化很小，电子做圆周运动的半径和转动周期基本保持不变，因此高频电源的频率可保持不变。一般先用直线加速器把电子加速到某一数值，再注入环形加速器中加速。大型电子同步加速器常采用多个环形轨道组合，各环之间用直线轨道连接。



▲ **图5-5-2** 环形同步加速器示意图

2. 对撞机

让两束高能粒子流实现对撞的装置，称为对撞机，它是在高能同步加速器的基础上发展起来的。如果用高能粒子“轰击”静止的原子核，能量利用率较低，利用两束相对运动的粒子流对撞，就能把全部能量利用上，这是建造对撞机的原因。参与对撞的粒子不同，对撞机的设计也不相同。一般来说，对撞部分的结构与同步加速器类似，呈圆环形，沿环安装磁铁，使用高频电源对粒子加速。电荷相反、静止质量相同的两束带电粒子（例如正、负电子），可以在同一个环内沿相反方向回旋，进一步加速并对撞，两束不同的带电粒子要在不同的环内加速，然后在两环交

又部分实现对撞。

我国的北京正负电子对撞机（BEPC）于 1988 年建成（图 5-5-3），最高能量为 2×2.8 GeV。2004 年 4 月 30 日，北京正负电子对撞机正式结束运行，标志着 BEPC 胜利结束实验任务。随后的 5 年中，北京正负电子对撞机进行重大改造。2009 年 5 月 13 日，BEPC Ⅱ达到验收指标，开启了它的新里程。



▲ **图5-5-3**　1988年北京正负电子对撞机首次对撞成功

目前已建成的最高能量的对撞机，是位于法国与瑞士边境的欧洲核子研究组织 CERN 的对撞型粒子加速器——大型强子对撞器（LHC，图 5-5-4），它于 2008 年 9 月 10 日开始运转。2010 年 3 月 20 日首度成功进行了粒子撞击实验，创造了高达 7 TeV 的能量。2015 年 5 月，大型强子对撞机实现亚原子粒子对撞，创造了新的纪录。



▲ **图5-5-4**　这是LHC 的鸟瞰示意图，它的周长达27 km。ATLAS、CMS、ALICE和LHCb分别是不同的粒子探测器，安装在四个地下巨洞中，分布在LHC 周围

粒子“全家福”

20 世纪 30 到 60 年代，科学家们陆续发现了更多的粒子，如 μ 子、π 介子、奇异粒子等。随着 20 世纪 50 年代各种粒子加速器和粒子探测器的快速发展，人们进入了用粒子加速器和对撞机研究基本粒子的新时期。

目前已经在实验中被发现、可以自由状态存在的粒子，按照它们参与相互作用的性质，分类如表 5-5-1 所示。

粒子都有它的反粒子。对于带电粒子来说，正、反粒子的质量和电荷量都相等，只是电荷的符号相反，正电子是电子的反粒子，也是第一个被发现的反粒子。反质子是带负电的质子。不带电的粒子，例如中子，它的反粒子是

表5-5-1 粒子的分类

类别		粒子	统计性	相互作用
规范玻色子		$\gamma/W^{\pm}$，Z^0/g	玻色子	电磁/弱/强
轻子	带电	$e^{\pm}$，$\mu^{\pm}$，$\tau^{\pm}$	费米子	电磁，弱
	中微子	ν_e，$\overline{\nu}_e$，ν_μ，$\overline{\nu}_\mu$；ν_τ，$\overline{\nu}_\tau$	费米子	弱
强子	介子	$\pi^{\pm}$，π^0（$K^{\pm}$，K^0，$\overline{K}^0$）	玻色子	强，电磁，弱
	重子	p，n，$\overline{p}$，$\overline{n}$（奇异粒子 Λ，Σ，Ξ，Ω 等）	费米子	强，电磁，弱

注：什么是玻色子？什么是费米子？你将会在高等学校的量子物理课程中学习到。

反中子，反中子与中子的质量和自旋相同，只是磁矩方向相反。表 5-5-1 中的 $e^{\pm}$，表示正电子和电子，p、n 和 $\overline{p}$、$\overline{n}$ 分别表示质子、中子及它们的反粒子。光子的反粒子就是它自己。

正电子和电子如果相碰，会发生“湮灭”，变成两个高能量的光子，这两个光子的总能量可用爱因斯坦质能方程 $E=mc^2$ 进行计算。

完全由反粒子组成的物质称为反物质，例如由反质子和反中子组成原子核，再加上正电子，即构成反物质的原子，它也能稳定地存在，但只要遇到正物质，就会发生“湮灭”。

夸克模型

目前研究表明，光子和轻子没有其内部结构，有点像“基本粒子”，但强子的种类这么多，是不是都是“基本粒子”？它有没有内部结构呢？20 世纪 70 年代初，用极高能量（超过 1 GeV）的电子轰击质子，电子发生了大角度散射，这表明质子内部含有一些半径很小的散射中心，或者说质子是由一些“硬心”组成的。以上迹象告诉人们，强子的内部不是均匀的，是有结构的。

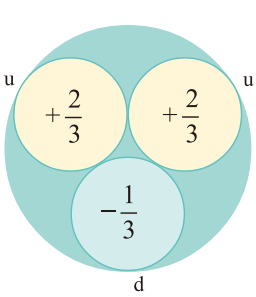
1964 年美国物理学家盖尔曼和茨威格各自独立提出了强子结构的夸克模型（1965 年前后，我国物理工作者

独立提出了层子模型，对强子结构进行了研究）。他们认为强子是由 3 种更基本的粒子组成的，并称这些粒子为**夸克**（quark）。这 3 种粒子是 ：上夸克（u）、下夸克（d）和奇异夸克（s）。各种夸克都有相应的反夸克。强子由这 3 种夸克和相应的反夸克组成。每个夸克的电荷量不是 e（元电荷）的整数倍，而是 e 的$\frac{1}{3}$或$\frac{2}{3}$（表 5-5-2）。

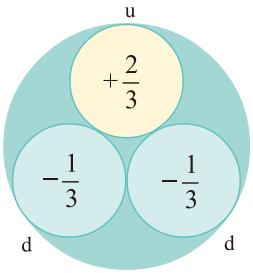
表5-5-2　6 种夸克

名称	u	d	s	c	b	t
电荷	$\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{2}{3}e$

此外，还有粲夸克（c）、底夸克（b）和顶夸克（t）以及它们的反夸克。按夸克模型，质子由 3 个夸克（uud）组成，所带电荷量恰好是 e。中子也由 3 个夸克（ddu）组成，总电荷量为零（图 5-5-5）。



（a）质子由 2 个 u 夸克和 1 个 d 夸克组成，整体电荷量为 $+e$



（b）中子由 1 个 u 夸克和 2 个 d 夸克组成，整体电荷量为零

▲ **图5-5-5**

夸克还有一种叫“ 色荷 ”的性质。色荷共分三种，可标示为“ 蓝 ”“ 绿 ”“ 红 ”，每一种色荷都有其对应的反色荷——“ 反蓝 ”“ 反绿 ”“ 反红 ”。每一个夸克都带一种色，而每一个反夸克则带一种反色，所以夸克共有 36 种。

夸克模型的提出是物理学发展的里程碑，它打破了最小电荷量就是电子所带电荷量的说法，认为电子电荷不再是电荷量的最小单元，而存在着分数电荷。目前，人们对夸克的认识还只是起步阶段，科学家迄今为止还没有捕捉到单个的自由夸克。

宇宙的演化

现代宇宙学家将广义相对论和量子理论结合起来研究宇宙的起源和演化，进一步完善了大爆炸学说，为我们书写出这样一部宇宙起源演化简史。

宇宙从超高密度、超高温度和尺度小于 10^{-33}cm 的超微观状态开始的大爆炸，发生在距今 100 亿～ 200 亿年之间。大爆炸初期，科学家还无法了解那时的空间、时间和物质形态等情况。那时，时间和空间都小于普朗克尺度，时空还没有独立形成，不能区分引力、电磁力与强相互作用与弱相互作用这四种基本相互作用，称为普朗克时期。

大爆炸后，引力被分离出来，其余的三种作用力 ：电磁力、强相互作用与弱相互作用还统一在一起，称为“ 大统一 ”时期。此时引力极强，引力能转化为粒子。接着重子（包括质子、中子和各种质量更大的超子）不对称形成，即重子数比反重子数多，结果导致了今天的正物质比反物质多。如果当时重子数与反重子数相等，在宇宙冷却过程中重子与反重子就会全部湮灭，就不会有今天的物质世界。

宇宙在膨胀过程中曾经历了大大高于正常速度的暴胀时期，暴胀的结果使宇宙在极短的时间内尺度扩大了 10^{43} 倍，强相互作用被分离出来，但电磁力与弱相互作用还尚未分离。后来电磁力与弱相互作用分离，至此，引力、电磁力、强相互作用与弱相互作用这四种决定宇宙演化进程的基本相互作用全都被分离出来了。

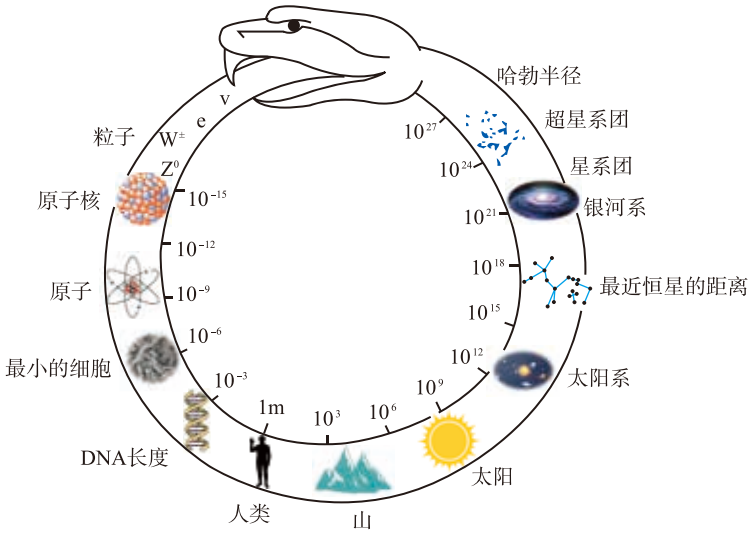
大爆炸后 10^{-6}s，参与强相互作用的基本粒子，即强子，包括重子、π 介子及其反粒子占了优势。宇宙进入强子时期。

到大爆炸后 10^{-4}s，光子碰撞产生正反粒子与正反粒子湮灭产生光子的反应处于平衡状态，光子数与粒子数一样多，强子破碎为夸克，夸克处于渐近自由状态。于是，轻子，包括电子、μ 子、中微子及其反粒子占了优势，宇宙进入轻子时期。随后，质子和中子产生。

宇宙最初元素合成时期（核形成时期）发生在强子和轻子时期后，此时宇宙中最初的氦、氘（重氢）和一些锂核创生。起初，宇宙中辐射密度大于物质密度，后来物质密度超过辐射密度。

大爆炸 30 万年后，化学结合作用使电子与原子核结合成中性的原子。光不再有足够的能量将电子撞离原子核和质子。从此一直被电子搅乱的光能够以直线方式前进，于是宇宙放晴。宇宙主要成分为气态物质。宇宙中的物质密度并不完全均匀，密度大的部分因引力而收缩。大约 10 亿年后，物质成团，形成原始星系和类星体等天体，合成重核。接下来就是包括银河系在内的其他星系陆续形成。 随后太阳系诞生，地球形成，生命诞生。

宇宙诞生之初，物质的密度和温度都很高，既没有原子和分子，更没有恒星与星系，有的只是高温下的高能粒子，早期的宇宙也就成了粒子物理学的研究对象。同时，粒子物理学家也希望从宇宙早期演化的观测中获得信息来验证高能量下的粒子理论。因此宇宙学和粒子物理学也就成了密不可分的姊妹学科，就像如图 5-5-6 所示的蟒蛇咬住自己的尾巴。



▲ **图5-5-6**　宇宙学和粒子物理学更深层次的关系

自我评价

1. 氦原子核由两个质子与两个中子组成，这两个质子之间存在着万有引力、库仑力和核力，将这三种作用力从小到大进行排列。

2. 所谓“反物质”是由“反粒子”组成的，如 α 粒子的符号为 ${}_{2}^{4}\mathrm{He}$，试写出 α 粒子的反粒子的符号。

3. β 衰变伴随着中微子放出，而中微子在实验中很难被探测。1953 年，莱尼斯和柯文建造了一个由大水槽和探测器组成的实验系统，利用中微子与水中 ${}_{1}^{1}\mathrm{H}$ 的核反应，间接地证

明了中微子的存在。现已知中微子与水中的 ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ 发生核反应，产生中子（${}^{1}_{0}\mathrm{n}$）和正电子（${}^{0}_{+1}\mathrm{e}$），即中微子 $+{}^{1}_{1}\mathrm{H}\longrightarrow{}^{1}_{0}\mathrm{n}+{}^{0}_{+1}\mathrm{e}$，则中微子的电荷数是多少？

发展空间

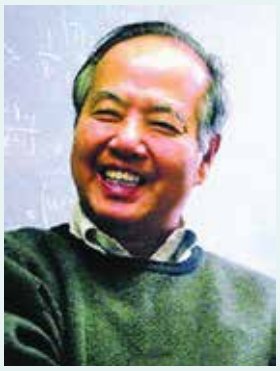
课外阅览

华人科学家在粒子物理领域的杰出贡献

在粒子物理发展历程中，华人科学家做出了巨大的贡献。

李政道

李政道（1926—）（图 5-5-7），苏州人，生于上海，美籍华人物理学家，美国哥伦比亚大学教授、美国国家科学院院士、中国科学院首批外籍院士。主要的贡献有：李模型、高能重离子物理、量子场论的非拓扑性孤立子和孤立子星以及破解粒子物理中的 θ-τ 之谜。31 岁时与杨振宁一起因发现弱作用中宇称不守恒而获得诺贝尔物理学奖（此发现由吴健雄的实验证实）。



▲图5-5-7 李政道

李政道的研究领域很宽，在量子场论、基本粒子理论、核物理、统计力学、流体力学、天体物理等方面均颇有建树。

杨振宁

杨振宁（1922—）（图 5-5-8），安徽合肥人，美国普林斯顿大学教授、美国国家科学院院士、中国科学院首批外籍院士，曾任全美华人协会会长，1954 年发布杨 - 米尔斯方程，成为整个粒子物理标准模型的基础。作为 20 世纪观念上的杰作，它解释了原子内部粒子的相互作用，很大程度上重构了近 40 年来的物理学和现代几何学。这个理论模型，已经排在牛顿、麦克斯韦和爱因斯坦的工作之列，并必将对未来产生很大影响。杨振宁和李政道合作的成果获得了诺贝尔物理学奖。



▲图5-5-8 杨振宁

2017 年 2 月，已放弃外国国籍成为中国公民的杨振宁正式转为中国科学院院士。

丁肇中

丁肇中（1936—）（图 5-5-9），实验物理学家，祖籍山东省日照市。1963 年获福特基金会奖学金，并到瑞士日内瓦欧洲核子研究中心（CERN）工作。1964 年起在美国哥伦比亚大学工作。1965 年成为哥伦比亚大学讲师。1967 年起任麻省理工学院物理学系教授。他的研究方向是高能实验粒子物理学，包括量子电动力学、电弱统一理论、量子色动力学的研究。因发现 J 粒子，于 1976 年获得诺贝尔物理学奖。



▲图5-5-9 丁肇中

吴健雄



▲图5-5-10　吴健雄

吴健雄（1912—1997）（图 5-5-10），生于江苏省苏州市，美籍华人物理学家，美国哥伦比亚大学教授、美国科学院院士、中国科学院首批外籍院士，1975 年获美国最高科学荣誉——国家科学勋章。吴健雄是美国物理学会（APS）历史上第一位女性会长，也曾参与过“曼哈顿计划”，是世界上最杰出的实验物理学家之一，她最知名的学术工作包括 1957 年用 β 衰变实验证实了在弱相互作用中的宇称不守恒，1963 年通过实验证明了核 β 衰变中的矢量流守恒定律等。此外，吴健雄在量子力学基本理论的验证、穆斯堡尔效应、β 衰变、μ 子、介子和反质子物理等方面均有实验研究，并对多种核辐射探测器的开发和改进做出了贡献。

反思 · 小结 · 交流

• 学后反思

1. 爱因斯坦的质能方程 $E=mc^2$，实际上把质量和能量都看成是物质存在的形式，这大大地改变了人们对物质世界的认识。以前我们学习的质量守恒定律和能量守恒定律是独立的两条定律，现在则统一起来了，守恒的是质量和能量的总和。

2. 质能方程还为人类利用核能打开了大门，它告诉我们，核反应过程的质量亏损，将释放出巨大的原子核能。原子核发电站、核动力舰船……慢慢被人类所掌握，大大缓解了能源的危机。

3. 科学既是促进技术发展、社会进步的有力工具，但也可能危害人类，甚至造成毁灭人类自己的灾难。核武器的研发是科学技术取得的重大成果，但也是酿成几十万人瞬间死亡、整座城市瞬时毁灭的大规模杀伤性武器，不得不引人深思。

• 自主小结

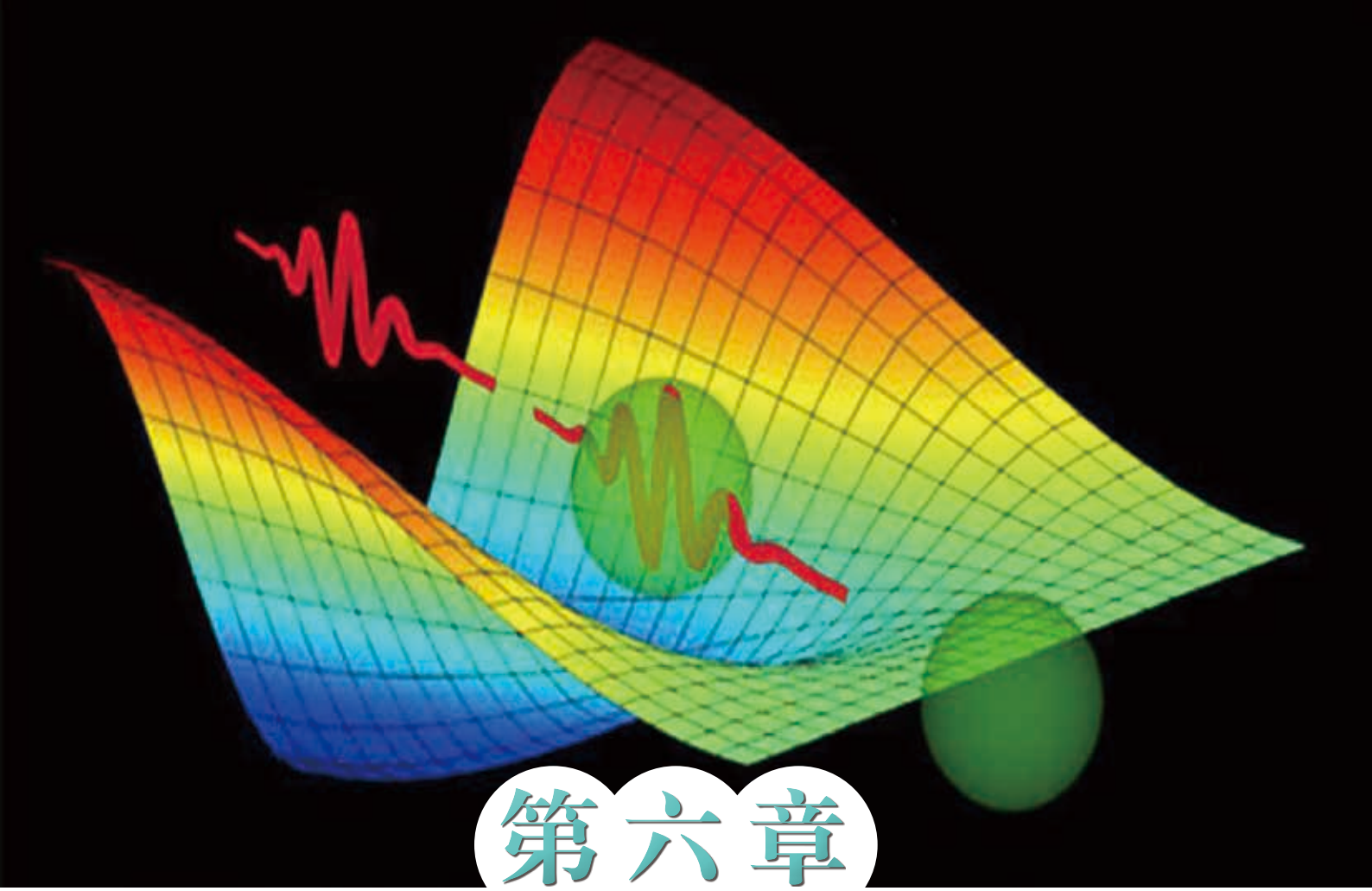
1. 质子和中子的发现都利用了什么方法？粒子物理学研究的主要实验手段是什么？
2. 放射性元素衰变过程中会释放出哪些粒子？有什么规律？
3. 原子核释放能量的方式有哪几种？机理各是什么？
4. 按粒子参与相互作用的性质可以把粒子分为哪几类？为什么说宇宙学和粒子物理学是密不可分的姊妹学科？

• 相互交流

科学技术的应用在造福人类的同时，也可能带来复杂的社会问题，科学研究必须有合理的伦理规范和道德约束，必须有强烈的社会责任感。对此，请和同学交流，谈谈你的认识。

本章复习题

1. 人类认识原子核的复杂结构并进行研究，是从（　　）
   A. 发现电子开始
   B. 发现质子开始
   C. 发现天然放射现象开始
   D. α粒子散射实验开始
2. 带电验电器在放射线照射下电荷很快消失，这是为什么？
3. 在生产和科研中凡用到射线时，绝大多数是用人工放射性同位素，而不用天然放射性物质，人工放射性同位素与天然放射性物质相比，具有哪些优点？
4. 有三个原子核A、B、C，A核放出一个正电子后变为B核，B核与质子发生核反应后生成C核并放出一个氦核（$^{4}_{2}\mathrm{He}$），问A核的质量数比B核的质量数多多少？A、B、C三个原子核的电荷数是否相同？
5. Th（钍）核经历一系列衰变后变成$^{208}_{82}\mathrm{Pb}$（铅）核，一共经过几次α衰变和几次β衰变？写出这一衰变过程的方程。
6. 如果一种放射性元素的半衰期是1年，5年后它还剩下多少？
7. 正常情况下，生物体中每克碳含有750亿个$^{14}_{6}\mathrm{C}$原子，每分钟约有8个$^{14}_{6}\mathrm{C}$原子核发生衰变。考古学家发掘出一件古生物化石，测出其体内每克碳平均每分钟大约有1个$^{14}_{6}\mathrm{C}$核衰变，试估算该古生物所处年代（已知$^{14}_{6}\mathrm{C}$的半衰期为5730年）。
8. $^{16}_{7}\mathrm{N}$和$^{16}_{9}\mathrm{F}$原子的质量分别是16.006099 u和16.011465 u，试计算这两个原子核的结合能和核子的比结合能。（1 u=1.6606×10^{-27} kg，1 u=931.50 MeV/c^2）
9. 一个质子与一个中子聚变结合成一个氘核，同时辐射一个γ光子。已知质子、中子和氘核的质量分别是m_1、m_2和m_3，普朗克常量为h，真空中的光速为c。
   （1）写出核反应方程；
   （2）计算辐射出γ光子的能量与波长。
10. 按照夸克模型，质子、中子都是由上夸克和下夸克这两种夸克组成，上夸克带电荷量为$+\frac{2}{3}e$，下夸克带电荷量为$-\frac{1}{3}e$，e为电子所带电荷量的大小。如果质子是由三个夸克组成的，且各个夸克之间的距离都是1.5×10^{-15} m，试计算质子内相邻两个夸克之间的静电力。



第六章

波粒二象性

主题一　量子论与光电效应

- 量子论初步
- 光电效应

主题二　波粒二象性

- 波粒二象性

光的电磁说使光的波动理论发展到相当完美的地步。但是，光电效应实验现象使光的电磁说遇到了无法克服的困难。20世纪初，一系列新的实验事实促使科学家们重新思考，对光和实物粒子的认识又前进了一步。

1 量子论初步

至 19 世纪末，以牛顿力学为核心的经典物理学已取得了巨大的成功，但是也遇到了一些难以克服的困难，热辐射就是其中的一个。

热辐射

观察思考

将白炽灯与调光开关相连，接通电源，调节电压，观察白炽灯由暗到亮的过程中灯丝颜色的变化，这一现象说明了什么问题？

辐射强度是指物体在某温度下，其表面的单位面积在单位时间内向四周所辐射电磁能的大小。

用调光开关逐渐增大灯泡两端的电压时，灯丝的温度就会逐渐升高，使得灯丝的颜色由暗红色逐渐变成橙色，再变为黄色，最后变成白色。灯丝的颜色跟灯丝向外辐射的电磁波的辐射强度按电磁波波长的分布有关。事实上，我们周围的一切物体都在以电磁波的形式向外辐射能量，而且辐射强度随波长如何分布与物体的温度相关，物理学上把这种辐射称为**热辐射**（heat radiation）。

辐射体向外辐射强度随波长变化的分布有什么样的规律？找到这个规律是当时物理学家遇到的一个难题。

黑体与黑体辐射

一般来说，物体辐射的电磁波除与温度有关外，还与材料的种类及表面状况相关。为了反映具有普遍意义的热辐射规律，需要研究理想的辐射体——其辐射电磁波的情况只与温度有关，这种理想的辐射体就是黑体。

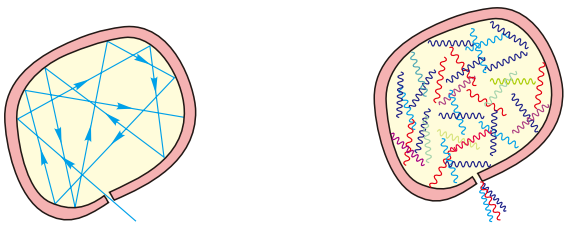
观察思考

白天我们观察远处高楼的窗口，你观察到了什么现象？为什么会产生这样的现象？

物体除了向外辐射电磁波，其表面还会吸收和反射外界射来的电磁波。常温下我们看到的不发光物体的颜色就是反射光所致。远处高楼的窗口看上去是黑的，是因为它吸收了外界射来的电磁波，而从窗口反射出来的电磁波很少。如果某物体能够全部吸收外来的电磁波而不发生反射，这种物体就称为**绝对黑体**，简称**黑体**（blackbody）。如图 6-1-1（a）所示，做一个空腔，并在腔壁上开一个小洞，那么射入小洞的光就很难有机会再从洞口被反射出来，这个空腔的洞口就可以看作黑体。

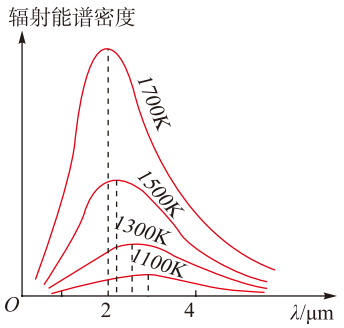
加热腔体，黑体表面就向外辐射电磁波，这就是**黑体辐射**（blackbody radiation），如图 6-1-1（b）所示。实验表明，黑体辐射能量按波长分布的情况只与黑体的温度有关。人们通过精巧的实验测出了黑体辐射的电磁波能量随波长的分布曲线。图 6-1-2 给出了四种温度下黑体辐射的能谱密度与波长的关系。从图像中可以看出，随着温度的升高，一方面各种波长的辐射能谱密度都增加，另一方面辐射能谱密度的极大值向波长较短的方向移动。

辐射的电磁波分布在空间中。单位体积内、单位波长（或单位频率）区间内的电磁波的能量，就是黑体辐射实验所提到的**辐射能谱密度**，它的单位是 J/（m^3 · nm）或 J/（m^3 · Hz）。



（a）空腔上开一个小洞，小洞可以看作黑体　　（b）加热腔体，从小洞口向外辐射各种波长的电磁波，这就是黑体辐射

▲ **图6-1-1**　黑体辐射



▲ **图6-1-2**　黑体辐射的实验规律

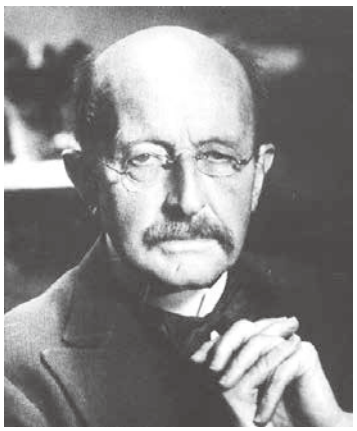
实验曲线出来之后，人们试图用当时认为已经成熟的经典理论给予解释，但理论得出的结果都与实验曲线不符。在各种解释中有两种最具有代表性：一是维恩在 1896 年提出的公式，它的短波部分与实验相符，而长波部分与实验偏离很大；二是瑞利在 1900 年提出的公式，它的长波

由于高频范围的辐射是在紫外波段，故而这一理论困境被当时的科学家们称为“紫外灾难”。

部分与实验曲线基本一致，而短波部分与实验严重不符，尤其是在高频范围内辐射的电磁波能量随频率的增大可趋于无穷大，这显然与客观事实不符。

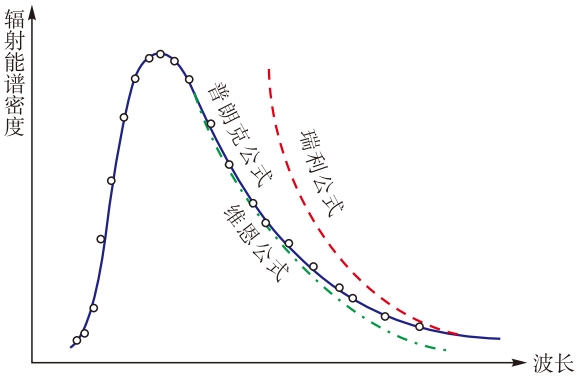
那么，正确的理论解释又是什么呢？

量子论的诞生



▲ **图6-1-3** 普朗克（Max Planck，1858—1947）

1900 年，德国物理学家普朗克（图 6-1-3）根据黑体辐射的实验曲线得到一个半经验公式，这个公式在长波及短波部分都能很好地与实验相符，如图 6-1-4 所示。为了从理论上推导出这个与实验相符的半经验公式，普朗克把腔壁看作是由各种频率振动的带电谐振子组成的，黑体的辐射就是这些谐振子向外辐射的各种电磁波。他在经典热力学的基础上，又提出了一个全新的关键假设：



▲ **图6-1-4** 各种黑体辐射的能量分布公式与实验结果的比较

谐振子具有的能量是不连续的，只能取一些分立的值，即 $E_n = nh\nu$（n=1，2，3，…），也就是说能量 E 只能取 $h\nu$ 的整数倍，最小的一份能量为 $\varepsilon = h\nu$，称为**能量子**（quantum of energy）。式中 ν 是谐振动的频率，h 是一个常量，称为**普朗克常量**（Planck constant），它的值是

$$h = 6.626\ 068\ 76\ (52) \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$$

为了计算的简便，通常取 $h = 6.63 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$。

根据能量子的假设，普朗克从理论上成功推导出了与实验相符的公式（后称普朗克公式）。

例题示范

问题　光是一种电磁波，可见光的波长范围大致是400～700 nm。400 nm电磁辐射的能量子ε的值是多少？

分析　根据普朗克量子理论，电磁辐射的能量子能量$\varepsilon = h\nu$，而能量子的振动频率与波长有$c = \lambda\nu$的关系，因而有$\varepsilon = h\nu = hc/\lambda$。

解　波长为400 nm的电磁波的频率能量子能量

$$\begin{aligned}\varepsilon &= h\nu \\ &= \frac{hc}{\lambda} \\ &= \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^{8}}{4.0 \times 10^{-7}}\text{J} \\ &= 4.97 \times 10^{-19}\ \text{J}\end{aligned}$$

在宏观世界，各种形式的能量都是连续变化的，可以取任何数值。能量子概念的提出打破了一切自然过程都是连续变化的经典看法，第一次向人们展示了自然过程的非连续特性。能量子概念的引入，标志着量子论的诞生，开启了人类认识微观世界的大门，具有划时代意义，普朗克因此获得了 1918 年诺贝尔物理学奖。

自我评价

1. 什么是黑体？什么是黑体辐射？
2. 黑体辐射电磁波的强度按波长分布的影响因素是（　　）

   A. 温度　　B. 材料　　C. 表面状况　　D. 体积
3. 某电磁辐射的能量子的能量为 9.94×10^{-19} J，其辐射的电磁波波长是多少？
4. 量子论关于能量的观点与经典物理学的能量观点有什么不同？

发展空间

课外阅览

量子论诞生的前夜

普朗克早期主要从事热力学的研究，1894 年开始把注意力转向黑体辐射问题。1899 年，他从热力学推导出维恩的辐射定律，确信这是唯一正确的辐射定律。但在年底，他注意到德

国物理学家鲁本斯等人于 1899 年 9 月发表的实验报告中指出，维恩定律同实验事实有偏离。于是，普朗克不得不尝试修改他的理论。1900 年 6 月，瑞利提出的辐射定律在长波部分与他的实验定律是一致的。普朗克受此启发，尝试去寻找新的辐射定律，使他在长波部分渐进于瑞利定律，而短波部分则渐进于维恩定律。他把自己 1899 年的公式加以修改，就得到了合乎上述要求的辐射定律。随后，鲁本斯通过实验证实了普朗克的新的辐射定律同实验结果完全吻合。

但是，起初普朗克的辐射公式是根据实验数据得出来的半经验定律，得不到合理的理论解释。为了寻找这个公式的理论根据，普朗克紧张地工作了两个月，终于发现，要对这个公式做出合理的解释，唯一可能的出路是做这样大胆的假说：黑体辐射出的能量是不连续的，而是以一定数量值的整数倍跳跃式的变化。能量的变化竟然是不连续的！这不仅对于经典物理理论是离经叛道，而且也为常识所不容。因此，当普朗克提出量子论的思想时，物理学界最初的反应极其冷淡。人们只承认普朗克那个同实验一致的经验性的辐射公式，而不承认他的理论性的量子假说。而普朗克本人也对自己的假说感到惴惴不安，一有机会就想倒退到经典物理理论立场。

爱因斯坦第一个接受量子概念并加以发展。他意识到，量子概念带来的将是整个物理学的根本变革，需要建立新的理论基础。

2 光电效应

从 19 世纪初开始，托马斯·杨、菲涅耳、马吕斯等分别观察到了光的干涉、衍射和偏振现象，证实了光的波动性。19 世纪 60 年代和 80 年代，麦克斯韦和赫兹先后从理论上和实验上确认了光的电磁波本质。当人们认为光的波动理论已臻完美的时候，新的实验现象又向物理学界提出了挑战。

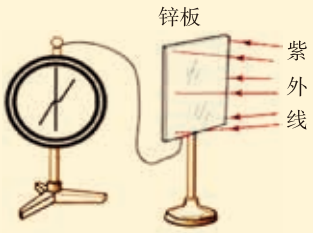
光电效应

观察思考

如图 6-2-1 所示，锌板和验电器用导线相连接，验电器不带电。现用紫外线

照射锌板，观察验电器指针的变化。这个现象说明了什么问题？

如果看不到明显的实验现象，可以把经摩擦后带正电的玻璃棒及带负电的硬橡胶棒分别从右侧逐渐靠近锌板（不接触），观察这个过程中验电器指针的变化。

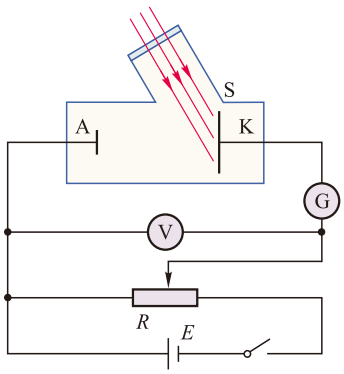


▲ **图6-2-1**　观察光电效应

我们可以看到，当带正电的玻璃棒靠近被紫外线照射的锌板时，验电器的指针明显张开；而带负电的硬橡胶棒靠近它时，指针无明显变化。这是因为锌板在紫外线的照射下，有电子从表面逸出，但逸出的电子受锌板中正离子的吸引而不能远离，锌板所带正电量很少，因此验电器指针张开不明显。当带正电的玻璃棒靠近时，它把从锌板逸出的电子吸引过去，从而使更多的电子离开锌板，锌板带更多的正电，指针张开明显。

1887 年，赫兹在证实电磁波的实验中意外发现，当紫外线照射到圆环接收器间隙的电极上时，火花放电变得容易了。电子被发现后，人们才知道这是由于紫外线的照射，有电子从金属表面逸出的缘故。当紫外线照射在金属表面上时，金属中的电子会因吸收光的能量而逸出金属表面，这种现象称为**光电效应**（photoelectric effect），逸出来的电子称为光电子。实验表明，不仅紫外线能产生光电效应，对于碱金属，如锂、钠、钾、铯等，用可见光照射也能产生光电效应。

研究光电效应的实验装置如图 6-2-2 所示。图中 S 为一个抽成真空的玻璃容器，容器内有阴极 K 和阳极 A，阴极 K 为金属平板。为了使紫外线能够更好地穿入容器照射到金属表面上去，在玻璃容器上装一石英小窗（石英对紫外线的吸收很小），两个电极分别和电流表 G、电压表 V、滑动变阻器 R 和电池组 E 连接。当紫外线照射在金属板 K 上时，金属板释放电子。光电子在电场力作用下向阳极 A 运动，就形成了光电流，改变外加电压 U_{AK}，测量出光电流 I 的大小，用来研究光电效应现象的规律。



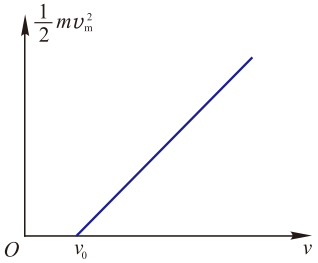
▲ **图6-2-2**　光电效应实验电路图

通过实验，人们发现了光电效应的若干特征。

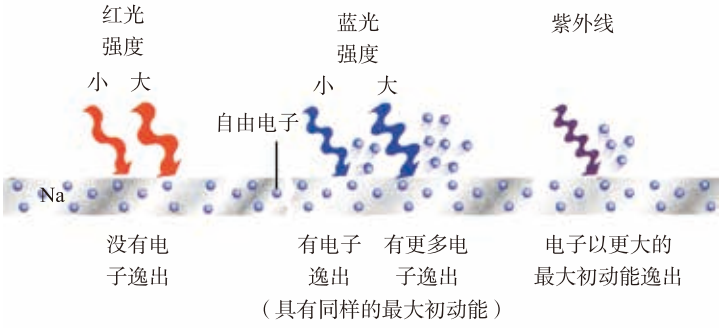
1．对于给定的阴极材料，都存在一个发生光电效应所需的入射光的最小频率 ν_0。这个最小频率 ν_0 叫作光电效应的**截止频率**（cutoff frequency），亦称为极限频率。只有超过截止频率的光，才能引起光电效应。不同金属材料的截止频率不同。

2．在发生光电效应时，如果外加电压 U_{AK} 从零开始逐渐增大，则光电流随之增大，但当 U_{AK} 增大至一定值时，光电流达到最大，此后再继续增大 U_{AK}，光电流不再变化。此时的光电流称为饱和光电流。在入射光的频率保持不变的条件下，饱和光电流随照射到阴极上的光的强度而变化，光的强度越大，饱和光电流越大。

3．从阴极发出的光电子的最大初动能与入射光的频率成线性关系，如图 6-2-3、图 6-2-4 所示，它与照射到阴极上的光的强度无关。



▲ **图6-2-3** 光电子最大初动能与入射光频率的关系



▲ **图6-2-4** 光电效应的说明

4．只要光的频率大于截止频率，即使用极弱的入射光，光电子也能立刻（约 10^{-9} s）发射出来。

按照光的波动说，金属中的电子在光照后，获得能量从而逸出金属表面的现象不难理解。然而，根据波动说我们可以继续推测 ：

1．从光照射金属表面到光电子产生，需要能量的积累过程，光越弱能量积累时间越长，光电子不可能瞬间产生 ；

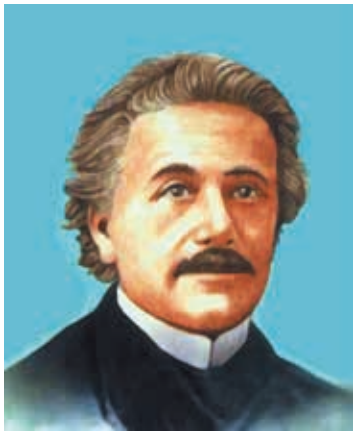
2．只要光照时间足够长，总能让金属中的电子吸收到足够的能量，从金属表面逸出，与入射光的频率无关 ；

3．电子接收的能量越多，逸出的电子的最大初动能也越大。

实验的结果却并非如此。显然，光的波动说在解释光电效应现象上，遇到了巨大的挑战。

光量子概念的提出　光电效应方程（选学）

1905 年，26 岁的爱因斯坦（图 6-2-5）把普朗克的能量子概念推广到光电效应的研究中，他认为：光本身就是不连续的，而是由单个的能量子组成的，这些能量子称为光量子，简称**光子**（photon）。每一个光子的能量为 $\varepsilon=h\nu$，其中 h 为普朗克常量，ν 为光的频率。因此，不同频率的光子具有不同的能量。



▲ **图6-2-5**　爱因斯坦（Albert Einstein，1879—1955）

按照上述光子假设，金属板内的电子从入射光中吸收了一个光子的能量 $h\nu$ 之后，一部分消耗于电子由金属内逸出表面时所需做的功 W，叫作逸出功（即光电子逸出金属表面所需的最小能量）；另一部分转化为光电子的动能。按照能量守恒定律，得到

$$h\nu=\frac{1}{2}mv_{\mathrm{m}}^{2}+W$$

这一关系称为爱因斯坦光电效应方程。

光电效应方程表明光电子的最大初动能和入射光的频率成线性关系，当最大初动能等于零时，金属表面不再有光电子逸出，这时入射光的频率就是截止频率 ν_0，即

$$\nu_0=\frac{W}{h}$$

表 6-2-1 列出了几种金属的截止频率和逸出功。

表6-2-1　几种金属的截止频率和逸出功

金属	钨	钙	钠	钾	铷
截止频率$\nu_0/10^{14}$Hz	10.95	7.73	5.53	5.43	5.15
逸出功W/eV	4.54	3.20	2.29	2.25	2.13

当入射光的频率保持不变，而光的强度增加时，单位时间内照射到阴极上的光子数增多，单位时间内吸收光子的电子数相应增加，单位时间内释放出的光电子数目亦将随之增加，这就很自然地说明了实验中饱和光电流大小和光的强度之间的关系。根据光的量子说，当光照射到金属上时，光子的全部能量将立刻被金属中的电子所吸收，不需要积累能量的时间，这也就自然地说明了为什么光电效应发生的时间极短。

1905 年，爱因斯坦发表了题为《关于光的产生和转化的一个试探性观点》的论文，解释了光电效应。他因这一成果获得了 1921 年的诺贝尔物理学奖。

光的量子说成功解释了光电效应的实验规律，表明光子像其他粒子一样，也具有能量。1914 年，密立根用实验方法对光电效应方程进行了验证，并测出了 h 值约为 6.57×10^{-34} J · s，这与从普朗克辐射公式导出的 h 值非常接近，从而给光的量子说以有力的支持。

光量子概念的提出，有力地推动了量子论的发展。可以说，量子论创立以后十年内的发展主要应归功于爱因斯坦。

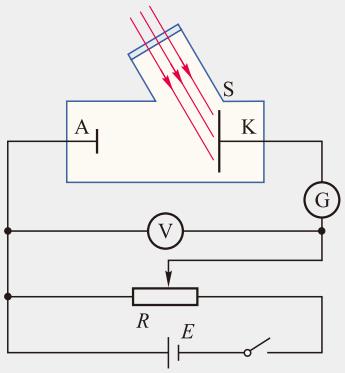
例题示范

问题 （选学）一光电管的阴极用逸出功 W=2.25eV 的钾制成，把此光电管接入电路，如图6-2-6所示，现用频率 $\nu=1.0\times10^{15}$Hz 的紫外线射向阴极，求:

（1）光电子的最大初动能是多少?

（2）若要电流表G示数为零，光电管两极要加怎样的电压?

（3）若保持（2）问中的电压不变，而入射光的强度增加为原来的2倍，此时电流表示数又是多少?



▲ 图6-2-6

分析 首先要判断光电效应是否能发生。阴极材料钾的截止频率

$$\nu_0=\frac{W}{h}=\frac{2.25\times1.6\times10^{-19}}{6.63\times10^{-34}}\text{ Hz}=5.43\times10^{14}\text{ Hz}$$

由于它小于入射光频率 $\nu=1.0\times10^{15}$Hz，因此会发生光电效应。

光电子的最大初动能可由光电效应方程求出。

在光电子的最大初动能一定的条件下，A、K间加一定的反向电压，可使光电流减为零。

解 （1）根据爱因斯坦光电效应方程，光电子的最大初动能为

$$\begin{aligned}E_{km}&=h\nu_0-W\\&=6.63\times10^{-34}\times1\times10^{15}\text{J}-2.25\times1.6\times10^{-19}\text{J}\\&=3.03\times10^{-19}\text{J}\end{aligned}$$

（2）若要电流表示数为零，要A、K间加反向电压 U_{KA}，且满足以最大初动能逸出的光电子到达阳极时速度减为0，所以

$$-eU_{KA}=-E_{km}$$

$$U_{KA}=\frac{E_{km}}{e}$$

$$=\frac{3.03\times10^{-19}}{1.6\times10^{-19}}\text{V}$$
$$\approx1.89\text{ V}$$

应使 A 的电势低于 K 的电势（即 A 接电源负极，K 接电源正极），并且电压不小于 1.89 V。

（3）因为照射光的频率不变，照射光强度的增加只会增加阴极 K 发射的光电子数，而不会增加光电子的初动能。又由于电势差 U 不变，故电流表示数仍为 0。

拓展　在发生光电效应的条件下，A、K 间接反向电压，并且使电流表示数减为零，这时 U_{KA} 称为截止电压。通过测量截止电压，可测得光电子的最大初动能。

自我评价

1. 用一束红光照射在某种金属上不产生光电效应，如果用两倍强度的红光照射在该金属表面上，并经过相当长时间，能否产生光电效应？为什么？

2. 用黄光照射某金属发生了光电效应，现改用蓝光照射，能发生光电效应吗？两种不同的光照射，逸出金属表面的光电子最大初动能相同吗？为什么？

3. 对于任何一种金属都存在一个“最大波长”，入射光的波长必须要小于这个波长才能产生光电效应。这种说法对吗？为什么？

4. 一盏黄光灯发光功率为 0.1 W，发出频率为 5.0×10^{14} Hz 的黄光，每秒发射多少个光子？（保留一位有效数字）

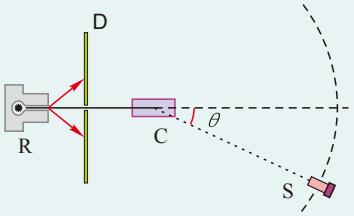
5.（选做）锌的极限波长（与截止频率相对应的波长）为 310 nm，当用波长为 193nm 的紫外线照射锌板时，求：（1）光子的能量；（2）锌的截止频率；（3）光电子的最大初动能。

发展空间

课外阅览

康普顿效应

1923 年，美国物理学家康普顿（Arthur Holly Compton，1892 — 1962）研究了 X 射线与物质散射现象，实验原理如图 6-2-7 所示。X 射线源 R 发射出一束 X 射线，打在石墨晶体 C 上，用摄谱仪 S 探测不同方向上散射线的波长和强度，在实验中发现，X 射线被石墨散射后，沿不同方向的射线中，除原波长外，还发现了波长随散射角的增大而增大的谱线。我们把 X 射线经物质散射后波长变长的现象，称为**康普顿效应**（Compton effect）。康普顿曾尝试用经典物理理论进行解释，结果都没有成功，最后认识到这一效应只能用光量子论来解释。他把光的散射看成是单个光子与单个电子发生的弹性碰撞，在碰撞过程中能量与动量都是



▲ **图6-2-7**　康普顿效应原理图

守恒的。碰撞后电子会带走一部分能量与动量，因而散射出去的光子能量与动量都相应减小，即散射后的 X 射线波长增大。根据这种散射理论得到的结论与实验结果完全相符，这进一步证实了爱因斯坦的光量子理论，同时康普顿效应还证明了光子不但有能量，而且有动量，光子和微观粒子的相互作用过程也严格遵循动量守恒定律和能量守恒定律。

爱因斯坦光电效应解释的局限性

任何一种物理现象都只能发生在一定的条件之下，条件变化后就会导致结果改变；任何物理规律也都不是绝对的，而只能在一定的范围之内才成立。光电效应中“逸出电子每次只吸收到一个光子的能量”这一条件在使用普通光源（弱光）时是适用的。自 1960 年激光（强光）被发明以后，当激光照射到金属表面上时电子完全可以同时吸收到两个光子而发生光电效应。这种一个电子吸收多个光子发生光电效应的现象称为多光子光电效应。利用激光等强光所得到的光电效应实验结果表明，爱因斯坦光电效应方程只有在弱光条件下成立。

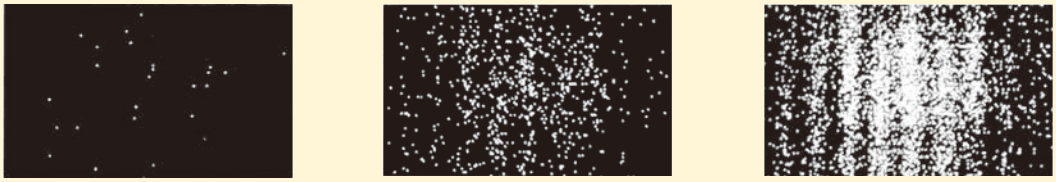
3 波粒二象性

光的干涉和衍射现象表明，光具有波动性。光电效应和康普顿效应则表明，光在与物体相互作用时，具有粒子性。在经典物理学中，波和粒子是两种不同的研究对象，具有非常不同的表现。那么，光到底属于粒子还是波呢？

光的波粒二象性

观察思考

为了对光的本性做进一步的考察与分析，物理学家把屏换成感光底片，在不断变化光强的情况下，用短时间曝光的方法进行了光的双缝干涉实验（图 6-3-1）。



（a）弱光　（b）中光　（c）强光

▲ **图6-3-1**　不同光强下光的双缝干涉实验结果

光很弱时，感光底片上的图像与我们通常观察到光的双缝干涉的图像相差很远［图 6-3-1（a）］；增强光的强度，光的双缝干涉的图像变得清晰起来［图 6-3-1（b）］；当光较强时，得到的图像与我们通常观察到的光的双缝干涉图像一样［图 6-3-1（c）］。这个实验说明了什么？

当光很弱时，光是作为一个个粒子落在感光底片上的，显示出了光的粒子性；当光很强时，光与感光底片量子化的作用积累起来形成明暗相间的条纹，显示出了光的波动性。

如果仍用弱光进行实验，但改变曝光的时间，也同样可以得到图 6-3-1（b）或（c）的结果。

实验表明，一个光子通过狭缝后会落在哪一点是不确定的，但大量光子通过狭缝后落在什么位置却遵守一定的统计规律。在干涉条纹中，那些光强大（亮条纹）的地方，是光子到达机会多的地方，就是光子到达概率大的地方；光强小（暗条纹）的地方，是光子到达概率小的地方。所以，从这种意义上，可以把光的波动性看成是表明大量光子运动规律的一种概率波。进一步的实验表明，光的波动性不是光子之间的相互作用引起的，而是光子自身固有的性质。

通过以上的讨论我们看到，光具有波粒二象性，是波动性和粒子性的统一。在某些条件下，它的表现与经典物理学中的波相似；在另一些条件下，它又表现得与经典物理学中的粒子相似。

光子的能量和动量可以表示为 $\varepsilon=h\nu$ 和 $p=\frac{h}{\lambda}$，式中能量 ε 和动量 p 是描述光子的粒子性的重要物理量，频率 ν 和波长 λ 是描述光子的波动性的特征物理量。两式揭示了光的粒子性和波动性之间的联系。

活动

对光的本性，物理学史上曾经历了长期的争论。现在，我们应该怎样来认识光的本性呢？

德布罗意物质波假说

1924 年，法国年轻的物理学家德布罗意在光的波粒

二象性启发下，思考了这样一个问题：人们长期以来对光的研究，是否偏重于波动的图像而忽略了粒子图像，而在对实物的认识上发生了相反的错误，把粒子的图像想得过多，而忽视了波动的图像？另外，德布罗意还注意到光的运动与实物粒子运动之间存在某些相似性。在此基础上，他提出了一个大胆的假设——实物粒子像光子一样，也具有波粒二象性，可以引入波长、频率的概念，并且像光子一样，有如下关系式：

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

该式称为德布罗意关系式，与粒子相对应的波称为德布罗意波，也叫物质波。式中给出的波长称为德布罗意波长。德布罗意的假说最初并未受到物理界的重视，爱因斯坦向来欣赏物理学中的对称性思考，当他读到德布罗意的论文时，对文中就物理学的两个客体（粒子与波）的对称思考很感兴趣，并给予了很高的评价，声称这是“揭开了大幕的一角”。

活动

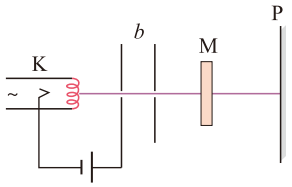
根据德布罗意关系式，计算质量为 9.1×10^{-31} kg，以速率 5.0×10^{6} m/s 运动的电子的德布罗意波长。根据计算的结果，想一想需要什么实验条件才能观察到电子的衍射图样？

实物粒子波动性的实验证实

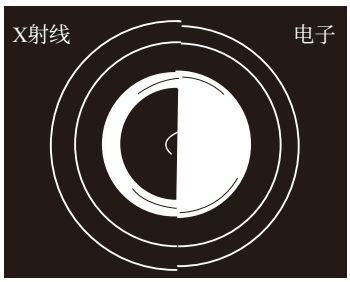
虽然爱因斯坦肯定了德布罗意关于物质波的想法，但真正判定德布罗意的假说是否正确的只能是实验。如果实物粒子也真的具有波动性，那么它就应该像光那样也能发生干涉和衍射。从波的干涉、衍射原理中我们知道，在波的传播中只有波长和障碍物（或缝）的大小相差不多或波长大于障碍物（或缝）时，才能表现出明显的衍射现象。

通常条件下，运动的电子的德布罗意波长的数量级是 0.1nm，要观测德布罗意波的干涉、衍射现象，必须要找到数量级为 0.1nm 的狭缝。最早从实验上观察到电子衍射

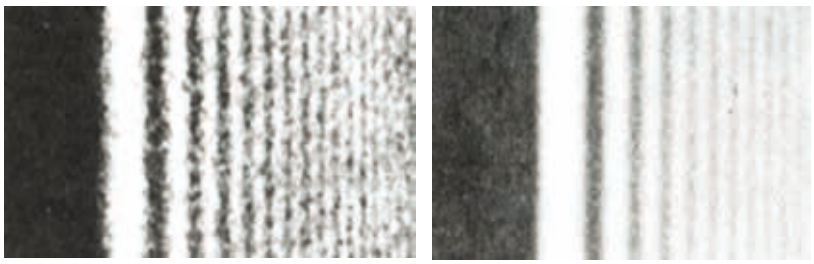
现象的是美国的戴维孙和他的合作者革末，1926 年他们做了电子束在晶体表面上散射的实验，观察到了和 X 射线衍射类似的电子衍射现象，证实了电子的波动性。次年，G.P. 汤姆孙做了电子束穿过多晶薄膜的衍射实验，成功地得到了和 X 射线通过多晶薄膜后产生的衍射图样极为相似的衍射图样。其实验装置如图 6-3-2 所示，电子束自阴极 K 发出，经加速电场后由极板 *b* 的小孔射出，穿过一微薄晶片 M，再照射到屏 P 上，在屏上显示出有规律的衍射花纹。图 6-3-3 是一幅波长相同的 X 射线和电子束的衍射图样的对比图，从图可以看出，电子和 X 射线一样，也具有波动的性质。根据衍射图样测出的数据进行计算可以发现，电子波的波长完全符合德布罗意关系式。图 6-3-4 给出了电子束和光束被边缘齐整的障碍物部分遮挡后在摄影胶片上形成的衍射条纹，同样可以看出电子的波动性。



▲ **图6-3-2**　电子衍射实验装置示意图



▲ **图6-3-3**　电子衍射与X射线衍射图样比较



电子的衍射条纹　　光的衍射条纹

▲ **图6-3-4**　电子衍射与光波衍射图样的比较

电子既然具有波动性质，人们自然会联想到原子、分子和中子等微观粒子是否同样具有波动性质。实验相继证实，这些微观粒子在一定条件下也会发生干涉、衍射现象，都具有波动性质，德布罗意关系式仍然成立。现在，德布罗意关系式已成为表示电子、中子、质子、原子和分子等微观粒子的波动性和粒子性之间关系的基本公式。

概率波与经典波的差异

我们知道，机械波是周期性的振动在介质内的传播，电磁波是周期变化的电磁场的传播。物质波既不是机械波，也不是电磁波。在德布罗意提出物质波以后，人们曾经对它提出过各种各样的解释。直到 1926 年，德国物理学家玻恩提出了符合实验事实的统计解释 ：物质波

在某一地方的强度跟在该处找到它所代表的粒子的概率成正比。按照玻恩的解释，物质波是一种概率波。在图6-3-2的实验里，电子束通过微薄晶片以后，物质波发生衍射。有的地方强度增大，是因为电子到达这里的概率大，从而到达这里的电子数目多；有的地方强度减小甚至等于零，是因为电子到达这里的概率小，从而到达这里的电子数很少，电子到达概率非常小的地方，能到达的电子数非常少，引不起接收器的反应，就表现为强度为零了。

活动

请老师推荐或自行查阅有关微观世界的科普读物及科学史著作，了解人类关于物质的波动性和粒子性的认识历程，撰写一篇读后感。

自我评价

1. 下列对光性质的描述，是否正确？并说明理由。

（1）频率越高的光的粒子性越显著，频率越低的光的波动性越显著；

（2）大量光子产生的效果往往显示出波动性，个别光子产生的效果往往显示出粒子性。

2. 关于物质波，以下说法正确的是（　　）

A. 物质波就是机械波

B. 实物粒子具有波动性

C. 光是粒子，不具有波动性

D. 电子不会发生干涉与衍射现象

3. 一个质量 m=1g，速度 v=10 m/s 的运动小球，它的德布罗意波长是多少？为什么观察不到这种运动小球的波动性？

发展空间

课外阅览

人类对物质世界的认识不断深化

在揭示了微观世界波粒二象性的基础上，物理学家建立起了研究微观领域内物质运动基本规律的量子力学及量子电动力学等理论，这些成就标志着人类对微观世界的认识已到达一个崭新的阶段，并催生了20世纪的高新技术，如信息技术、生物技术、新材料技术、激光技术、纳米技术等的蓬勃发展。

表6-3-1给出了人类对微观世界认识过程中有关的重大事件，从中可以看到人类对世界的探究与认识不断深化的重要节点。

表 6-3-1　人类对微观世界认识过程的重大事件

年代	代表人物	事件
1895	伦琴	发现X 射线
1896	贝克勒尔	发现铀的放射性
1897	J.J.汤姆孙	发现电子
1898	居里夫妇	发现放射性元素镭和钋
1900	普朗克	提出能量子概念
1905	爱因斯坦	提出光量子概念，成功地解释了光电效应
1911	卢瑟福	提出原子的核式模型
1913	玻尔	建立原子结构的量子理论
1923	康普顿	发现并解释康普顿效应
1924	德布罗意	提出电子具有二象性假设
1925	海森伯	矩阵力学诞生
1926	薛定谔	建立量子力学的一种形态——波动力学
1926	玻恩	波函数的统计解释
1927	戴维孙、革末、G.P.汤姆孙	观测到电子衍射现象
1927	海森伯	提出不确定关系

反思·小结·交流

• 学后反思

量子论的诞生，第一次向人们展示了自然过程的非连续特性，打破了一切自然过程都是连续变化的经典看法。爱因斯坦吸收并发展了普朗克的量子论思想，引入了光量子（$\varepsilon=h\nu$）的概念，建立光电效应方程$h\nu=\frac{1}{2}mv_{\mathrm{m}}^2+W$，成功解释了光电效应现象，让我们认识到光具有粒子性。同时，爱因斯坦并没有否定光的波动性，光子能量表达式$\varepsilon=h\nu$中的ν就是用来描述波的物理量。

现在，我们已认识到光的本性是波动性和粒子性的统一，称为光的波粒二象性。不仅如

此，电子、质子等实物粒子也具有波粒二象性，与实物粒子相对应的波叫物质波，波长由$\lambda=\frac{h}{p}$确定。物质波是一种概率波。

• 自主小结

1. 量子论的诞生对人们的科学观念产生了什么改变？

2. 光电效应的实验现象表明了光具有什么特性？爱因斯坦提出的光的量子说有没有否定光的波动说？

3. 波动性和粒子性是两种截然不同的性质，你如何理解光和实物粒子具有的波粒二象性？

• 相互交流

1. 量子论的研究对象是什么？

2. 关于量子论的研究是一种纯理论研究吗？

本章复习题

1. 人体向外不断地发生热辐射，为什么在黑暗中还是看不见人？

2. 现有a、b、c三束单色光，其波长关系为$\lambda_a>\lambda_b>\lambda_c$。用$b$光束照射某种金属时，恰能发生光电效应。若分别用$a$光和$c$光照射该金属，能否发生光电效应，为什么？

3. 某激光器发射激光的功率为P，激光在真空中的波长为λ，光速为c，普朗克常量为h，该激光器每秒辐射的光子数为多少？

4. 将激光束的宽度聚集到纳米级范围内，可以精确地修复人体损坏的器官。一台功率为10 W的氩激光器，能发出波长λ=500 nm的激光，如果用它“点焊”视网膜，每次“点焊”需要2×10^{-3} J的能量，则每次“点焊”视网膜的时间是多少？在这段时间内发出的激光光子的数量是多少？

5. 铝的电子逸出功是4.2×10^{-19}J，今用波长为200 nm的光照射铝表面，求：
   （1）逸出光电子的最大初动能；
   （2）铝的截止频率。

6. 几种金属的逸出功W_0见下表：

金属	钨	钙	钠	钾	铷
W_0/（10^{-19}J）	7.26	5.12	3.66	3.60	3.41

由一束可见光照射上述金属的表面，请通过计算说明哪些金属能发生光电效应。已知该可见光的波长范围为$4.0\times10^{-7}\sim7.6\times10^{-7}$m，普朗克常量$h=6.63\times10^{-34}$ J·s。

7. 在光电效应实验中，某金属的截止频率对应的波长为λ_0，该金属的逸出功为多大？若用波长为λ（$\lambda<\lambda_0$）的单色光做实验，则其截止电压为多大？已知电子的电荷量、真空中的光速和普朗克常量分别为e、c和h。

8. 假设可见光的平均波长为500 nm，100 W的灯泡每秒朝某一方向发射10^{19}个光子，这些光子全部被一张黑纸吸收，求：
   （1）每个光子的动量；
   （2）估算这些光子施加在黑纸上的力。

中英文索引

（名词后面的数字是它第一次出现的页码）

A，B

阿伏伽德罗常量 Avogadro constant 3
布朗运动 Brown motion 11
表面张力 surface tension 35
不浸润 non-wetting 37
比荷 specific charge 73
半衰期 half life 101
比结合能 specific binding energy 105

D

电子 electron 74
定态 stationary state 87

F

非晶体 noncrystal 28
发射光谱 emission spectrum 82
放射性 radioactivity 98

G

各向异性 anisotropy 29
各向同性 isotropy 29
光谱 spectrum 81
光电效应 photoelectric effect 131
光子 photon 133

H

核子 nucleon 94
核力 nuclear force 96
核反应 nuclear reaction 103
核裂变 nuclear fission 108
核聚变 nuclear fusion 111
黑体 blackbody 127
黑体辐射 blackbody radiation 127

J，K

晶体 crystal 28
基态 ground state 87
激发态 excited state 87
截止频率 cutoff frequency 132
浸润 wetting 37
扩散 diffusion 10

L

理想气体 ideal gas 48
连续光谱 continuous spectrum 82
里德伯常量 Rydberg constant 85
量子数 quantum number 87
链式反应 chain reaction 108

N

内能 internal energy 16
能量守恒定律 law of energy conservation 60
能级 energy level 87

P，R

普朗克常量 Planck constant 128
热平衡 thermal equilibrium 40
热力学第一定律 first law of thermodynamics 56
热力学第二定律 second law of thermodynamics 64

热辐射 heat radiation 126

S，T

熵 entropy 66
同位素 isotope 95

W

温度 temperature 39
温标 thermometric scale 41

X，Y

吸收光谱 absorption spectrum 83
原子核 atomic nucleus 79
原子光谱 atomic spectrum 83

Z

质子 proton 94
中子 neutron 94
质量数 mass number 95
质量亏损 mass defect 103

后　记

为全面落实立德树人根本任务，着力发展学生的核心素养，根据《普通高中课程方案（2017 年版）》的精神，我们按照《普通高中物理课程标准（2017 年版）》对高中物理教科书进行了全面修订。

本书在修订过程中，保留了原教科书的部分内容，并得到了许多专家、学者和老师的指导与帮助。李尚仁、侯丽梅、黄干生、胡君亮、陈春晓等同志参与了原教科书的编写；蓝坤彦、马勇、王良翼等同志审阅了本书修订稿的部分章节；在复审阶段，郁建石、杨亚芳、顾庆裕、徐将二、谭崇宇、黄旭阳等同志对教科书进行了审读和试教，并提出了宝贵意见。在此，我们对所有关心、支持本书编写与修订的专家、学者和老师表示衷心的感谢。

本书选用了一些图片和文字资料，对相关作者和出版社，我们一并表示诚挚的谢意。

编者

2019 年 2 月