国家教材委员会专家委员会审核通过
2020

普通高中教科书

物理

WULI

选择性必修

第三册

上海科学技术出版社

普通高中教科书

物理

选择性必修

第三册

上海科学技术出版社

主　　编：蒋最敏　高　景
本册主编：朱　臻
编写人员：(以姓氏笔画为序)
朱　臻　李希凡　杨鸣华　杨　炯　徐建军　廖　灿　谭一宁

责任编辑：武执政　金波艳　李林高
美术设计：房惠平

普通高中教科书　物理　选择性必修　第三册
上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会组织编写

出　版　上海世纪出版（集团）有限公司　上海科学技术出版社
（上海市钦州南路71号　邮政编码200235）
发　行　上海新华书店
印　刷　当纳利（上海）信息技术有限公司
版　次　2021年3月第1版
印　次　2021年3月第1次
开　本　890毫米×1240毫米　1/16
印　张　8
字　数　175千字
书　号　ISBN 978-7-5478-5296-5/G・1034
定　价　10.10元

版权所有・未经许可不得采用任何方式擅自复制或使用本产品任何部分・违者必究
如发现印装质量问题或对内容有意见建议，请与本社联系。电话：021-64848025，邮箱：jc@sstp.cn
全国物价举报电话：12315

声明　按照《中华人民共和国著作权法》第二十三条有关规定，我们已尽量寻找原作者支付报酬。原作者如有关于支付报酬事宜可及时与出版社联系。

目录

第十章 · 分子动理论 1

第一节　分子的大小 2
第二节　分子的运动　分子间的相互作用 6
第三节　分子运动速率分布的统计规律 10

第十一章 · 气体、液体和固体 15

第一节　气体的状态 16
第二节　气体的等温变化 19
第三节　气体的等容变化和等压变化 24
第四节　液体的基本性质 29
第五节　固体的基本性质 34
第六节　材料及其应用简介 39

第十二章 · 热力学定律 46

第一节　物体的内能 47
第二节　能量的转化与守恒 51
第三节　能量转化的方向性 55

第十三章 · 原子结构 62

第一节　电子的发现 63
第二节　原子的核式结构模型 66
第三节　玻尔的原子模型 70

第十四章 · 微观粒子的波粒二象性 79

第一节　光电效应　光子说 80
第二节　波粒二象性 86
第三节　原子结构的量子力学模型 90

第十五章 · 原子核 95

第一节　天然放射现象　原子核的衰变 96
第二节　原子核的组成 99
第三节　核能及其应用 104
第四节　粒子物理简介 111

第十章
分子动理论

物质是由分子组成的，但分子太小，人类无法直接观察分子及其运动。同时，由于组成物质的分子难以计数，分子的运动又是杂乱的、随机的，用经典力学手段研究每个分子的运动实际上是不可能的。物理学家将力学方法和统计方法相结合，分析宏观可测的热现象，获得了分子无规则运动和分子间相互作用的重要信息，建立了分子动理论。

在初中阶段我们已经学习了分子动理论的基本观点。在本章中将估测油酸分子直径；了解扩散现象，观察布朗运动，了解分子动理论基本观点和相关的实验证据；了解分子运动速率分布的统计规律；知道分子运动速率分布的物理意义。在解释布朗运动的过程中，增强证据意识，提升科学论证能力；通过学习分子运动速率分布的统计规律，体会统计方法对于复杂系统研究的重要意义，提升运动的观念；通过实验认识用积累法测量微小量和用宏观量间接测量微观量的方法，发展科学探究能力。本章也是学习气体、液体和固体的性质以及热力学定律的基础。

第一节 分子的大小

如图 10–1 所示，一片叶子在显微镜下放大 6 倍，可以看到清晰的叶脉；再放大 100 倍，可以看到叶面的表皮细胞和气孔；再不断放大，可以看到叶绿体。物体都是由分子、原子构成的，要放大到什么程度我们才能看到组成叶片的分子？分子究竟有多小？

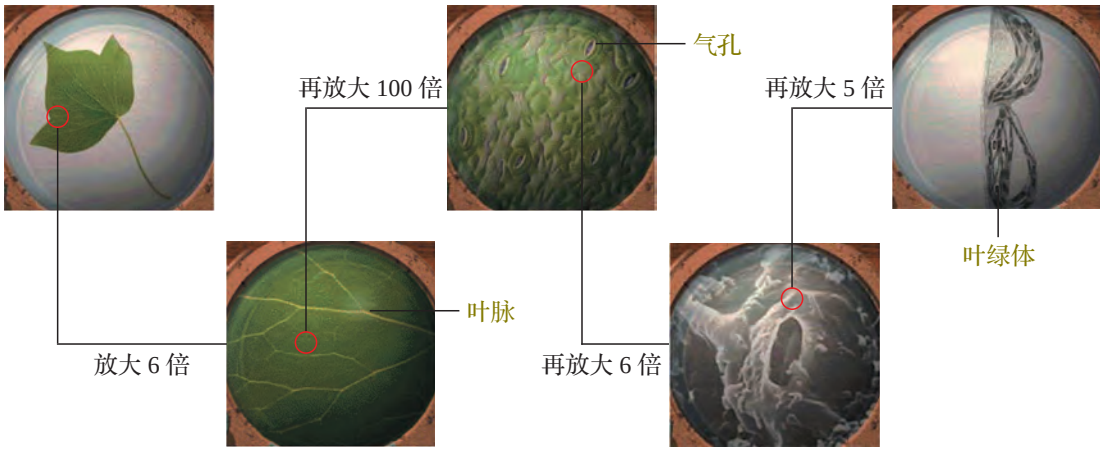


图 10–1 显微镜下不断被放大的叶子

▶ 分子大小的测量

多年以来，科学家一直希望能看到分子和原子的样子，但由于这类微粒实在太小，受传统显微镜原理上的限制一直未能如愿。直到 20 世纪 80 年代初，根据量子力学原理研制的扫描隧道显微镜（Scanning Tunneling Microscope，STM）问世，才圆了科学家长期的梦想。图 10–2 所示是一张在扫描隧道显微镜下看到的被放大近千万倍的硅片表面原子排列的图像，可以看到原子线度的数量级约为 0.1 nm。

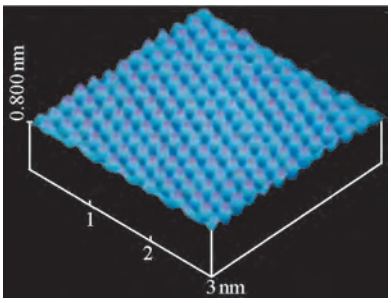


图 10–2 硅片表面原子排列图像

用扫描隧道显微镜不仅能“看到”单个原子，还能随心所欲地操控单个原子，这是显微技术划时代的进步。图 10–3 所示是我国科学家通过移动硅表面原子“写”成的中文汉字。

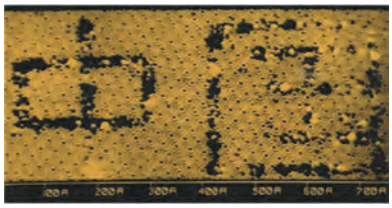


图 10–3 我国科学家移动硅原子“写”成的汉字

我们肉眼虽然看不见分子，但能通过实验估测分子的大小。

学生实验

用油膜法估测油酸分子的大小

提出问题

如何估测出分子的大小？

实验原理与方案

为了研究分子的大小，我们将组成物质的分子视作球形。如果能把一定量的某种物质的分子一个紧挨一个地平铺开来，形成一层单分子膜，那么只要知道这部分物质的体积 V 和这层膜的面积 S，根据体积公式 $V = Sd$，就可以估算出膜的厚度 d，即分子的直径。

将油酸酒精溶液滴在水面上时，溶液会在水面上很快散开，其中酒精溶于水，最后在水面上形成一层纯油酸组成的单分子薄膜，如图 10–4 所示。

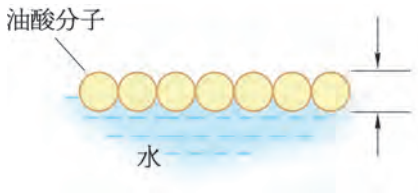
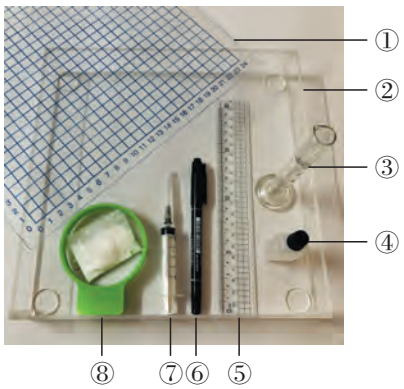


图 10–4　油酸单分子薄膜

实验装置与方法

实验中使用的器材包括：油酸酒精溶液、注射器、痱子粉和筛子、量筒、刻度尺、浅水盘、刻有方格的透明板、水彩笔等，如图 10–5 所示。



① 刻有方格的透明板
② 浅水盘
③ 量筒
④ 油酸酒精溶液
⑤ 刻度尺
⑥ 水彩笔
⑦ 注射器
⑧ 痱子粉和筛子

图 10–5　实验器材

测出一滴溶液中所含油酸的体积 V 及其形成的单分子油膜的面积 S。根据公式算出分子的大小。

助一臂

1. 估测是一种常用的科学研究方法。通过建立模型将问题合理简化，获得对复杂问题的粗略估计。实际分子有复杂的结构，将其视为球形正是建立模型进行估测的方法。

2. 积累法是测量微小量的一种科学方法，又称累计法。它是将微小量积累成一个可测的、较大的量后再取平均值，这一方法可以减小测量误差。例如，测量一枚邮票的质量、细铜丝的直径、单摆的周期等，都可使用这种方法。

实验操作与数据收集

把已知浓度的油酸酒精溶液滴入量筒，记下滴数，测量溶液体积并计算出每滴溶液中油酸的体积；将痱子粉均匀地撒在水面上，滴入一滴油酸酒精溶液，待油膜的形状稳定后，将油膜的轮廓描绘在刻有方格的透明板上，如图 10–6 所示。数出油膜覆盖的格子数，算出油膜的面积。

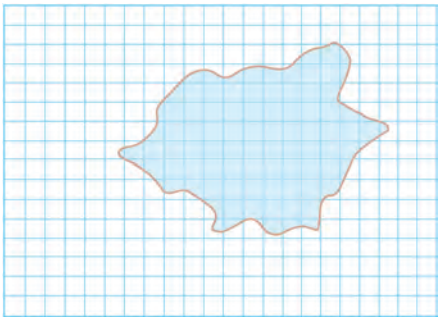


图 10–6 水面上形成的油膜

数据分析

一滴油酸酒精溶液中含有油酸的体积：

$V =$ _____

单分子油膜的面积：

$S =$ _____

实验结论

油酸分子的直径 $d = \dfrac{V}{S} =$ _____

交流与讨论

（1）各组测得的分子大小一样吗？

（2）如何提高测量结果的精确程度？

物理学中有多种测定分子大小的方法，用不同方法测出的分子直径的数量级是相同的。随着技术的进步，分子大小的测量越来越精确。现代测量结果表明，除了一些大分子，例如某些有机物质的分子外，多数分子直径的数量级为 0.1 nm。

拓展视野

油酸不溶于水，但溶于酒精、乙醚等有机溶剂。油酸分子式是 $C_{18}H_{34}O_2$，其中羧基 −COOH 是亲水基，另一基团 $C_{17}H_{33}$− 则不亲水。将一滴油酸酒精溶液滴在水面上，酒精溶于水，油酸就在水面散开。油酸分子的羧基 −COOH 在水面下，基团 $C_{17}H_{33}$− 在水面上，整个油酸分子便“站立”在水面上，形成一层薄薄的单分子油膜。

▶ 物质的量　阿伏加德罗常数

我们在化学课中学过物质的量的概念，它的单位是摩尔（mol），简称摩。1 mol 物质所含的粒子数是恒定的，即 6.02×10^{23} 个，这个数叫做**阿伏加德罗常数（Avogadro constant）**，通常用符号 N_A 表示。物质的量是国际单位制中七个基本量之一。

拓展视野

1811 年，意大利化学家阿伏加德罗率先提出：在等温等压的条件下，相同体积的任何气体都含有相同的分子数。后来人们就把标准状态（0℃，1 个标准大气压 *）下体积为 $2.24\times10^{-2}\ \mathrm{m}^3$ 的气体所含的分子数称为“阿伏加德罗常数”。2018 年国际计量大会第 26 次会议将摩尔的定义修改为：“1 mol 包含 $6.022\ 140\ 76\times10^{23}$ 个基本单元，这一常数被称为阿伏加德罗常数，单位为 mol^{-1}”。

知道了分子的大小，可以粗略地算出阿伏加德罗常数。反之，知道了阿伏加德罗常数，也可以估算出液体和固体分子的大小，还可以算出分子的质量。

自主活动

如果水分子的直径是 $4.0\times10^{-10}\ \mathrm{m}$，并且知道 1 mol 水的体积是 $1.8\times10^{-5}\ \mathrm{m}^3$，请估算阿伏加德罗常数。

阿伏加德罗常数是一个基本常量，它将宏观意义下物质的量与微观意义下的粒子数联系起来，成为宏观世界与微观世界之间的重要桥梁。物理学家们提出各种方法来测定阿伏加德罗常数，一百多年以来，测量的精度不断提高，目前通常取 $N_\mathrm{A} = 6.02\times10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$。

问题与思考

1. 在“用油膜法估测油酸分子的大小”实验中，用注射器在水面上滴一滴酒精油酸溶液形成单分子油酸层。如果用纯油酸来做实验，估测要形成一层单分子油膜，油膜的面积会有多大？（已知注射器滴满 1 mL 溶液的滴数为 200，油酸分子的直径约为 1 nm）
2. 设某金属的密度为 ρ、摩尔质量为 M、阿伏加德罗常数为 N_A。试问 1 个该金属原子的质量及其平均占有的体积分别是多少？
3. 试估算在常温常压下一杯体积为 $6.0\times10^{-4}\ \mathrm{m}^3$ 的水中约有多少个水分子。
4. 已知空气的平均摩尔质量 $M = 2.9\times10^{-2}\ \mathrm{kg/mol}$。某同学做一次深呼吸大约吸入 $4\times10^{2}\ \mathrm{cm}^3$ 的空气。那么一次深呼吸吸入空气的质量约为多少千克？大约吸入多少个空气分子？

* 1 个标准大气压约等于 $1.013\times10^{5}\ \mathrm{Pa}$。

第二节 分子的运动 分子间的相互作用

当我们路过面包店时，为什么能闻到诱人的香味？图 10–7 中两个相互压紧的铅块，为什么能够“粘”在一起？

要解释这些现象，我们需要了解分子的运动以及分子间的相互作用规律。

图 10–7 “粘”在一起的铅块

▶ 分子的运动

组成物质的分子在做永不停息的无规则运动，虽然用肉眼看不到分子，但我们可以通过一些宏观现象为这个结论提供证据。

• 扩散现象

如图 10–8 所示，取两杯温度不同、体积相同的清水，分别向其中滴入一滴红墨水，红墨水在两杯水中散开，这种现象称为**扩散（diffusion）**。可以观察到温度高的水中的红墨水扩散得更快，这说明温度越高，扩散越快。

图 10–8 扩散现象

扩散现象并不是重力或对流等原因造成的，而是由于分子的无规则运动产生的。从微观角度看，墨水的扩散实际上是墨水颗粒在水中被水分子撞击而不断移动的过程。温度越高扩散越快，说明温度越高，水分子运动越剧烈。

气体中也存在扩散现象，能闻到面包的香味就是面包的芳香分子扩散产生的结果。扩散现象还能在固体中发生，并且有重要的应用，例如利用扩散现象将碳原子掺入钢件的表面可以提高钢件的硬度，在半导体材料中掺入微量的杂质可以达到控制半导体性能的目的。

• 布朗运动

1827 年，英国植物学家布朗（R. Brown，1773—1858）用显微镜观察悬浮在水中的花粉，发现花粉颗粒不停地做无规则的运动。他经过不断尝试发现，除了花粉外，对于液体中类似大小的其他悬浮颗粒，都可以观察到这种运动。后人把悬浮颗粒的这种无规则运动叫做**布朗运动（Brownian motion）**。

将一滴用水稀释过的墨汁滴在载玻片上，覆上盖玻片，放在高倍显微镜下观察，可以看到如图 10–9 所示的悬浮颗粒在液体中不停地做无规则运动，这就是布朗运动。

用显微镜观察布朗运动，并通过显示器显示出来，用追踪软件记录每隔相同时间颗粒所在的位置，然后用线段把这些位置依次连接起来，如图 10–10 所示。结果表明布朗运动是杂乱无章的。

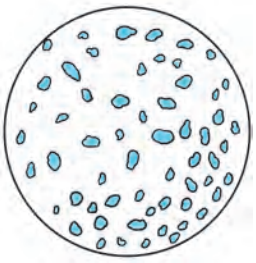


图 10–9　显微镜下的悬浮颗粒

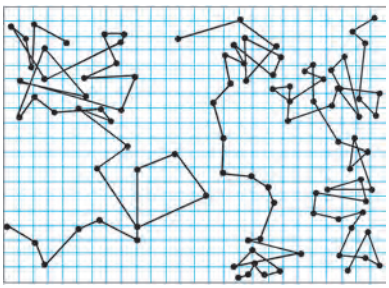


图 10–10　布朗运动

大家谈

做布朗运动的是悬浮在水中的细微颗粒还是水分子？布朗运动产生的原因可能是什么？

布朗运动是怎样产生的呢？起初，人们认为是由外界影响如振动、液体的对流等引起的。但实验表明：在尽量排除外界影响的情况下布朗运动仍然存在；只要颗粒足够小，在任何液体中都可以观察到布朗运动；布朗运动不会停止，连续观察许多天，甚至几个月，也不会看到这种运动停下来。可见布朗运动的成因不在外界，而在液体内部。

悬浮在液体中的颗粒周围布满了大量的液体分子，颗粒的布朗运动应该是由液体分子的撞击造成的。图 10–11 描绘了颗粒受到周围液体分子撞击的情景。当颗粒足够小时，它受到的来自各个方向的液体分子的撞击作用是不平衡的。在某一瞬间，颗粒在某个方向受到的撞击作用强，它就沿着这个方向运动；在下一瞬间，颗粒受到另一方向的撞击作用强，它又向着另一方向运动。颗粒越小，在某一瞬间与它相撞的分子数越少，撞击作用的不平衡性就表现得越明显，因而布朗运动越明显。颗粒杂乱无章的运动，说明液体分子对颗粒的撞击是随机的。布朗运动的无规则性，反映了液体内部分子运动的无规则性。

扩散实际上就是一种布朗运动。布朗运动表明分子的运动是永不停息的无规则运动，其剧烈程度与温度有关，并且温度越高，这种运动越剧烈，所以把分子的这种运动叫做**热运动**（**thermal motion**）。温度是分子热运动剧烈程度的标志。

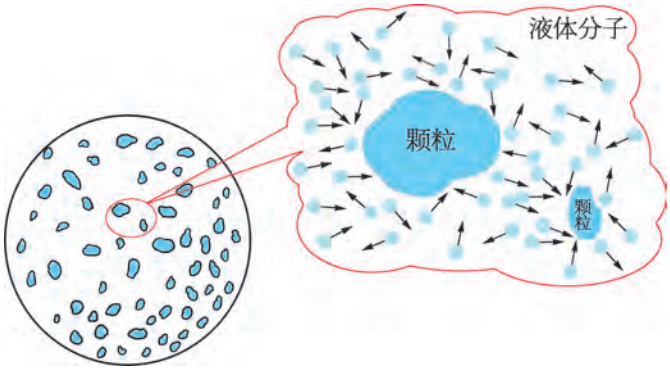


图 10–11　颗粒受到液体分子的撞击

▶ 分子间的相互作用

自主活动

取一支长约 1 m 的玻璃管，注入半管清水，再注入酒精直至液面接近管口。封住管口，反复颠倒玻璃管，然后观察管中液面位置的变化。

气体很容易被压缩，说明气体分子间存在着很大的空隙。在自主活动中水和酒精混合后液面下降，总体积减小，说明液体分子间存在着空隙。碳原子能扩散进入钢件的表面，说明固体分子之间也存在着空隙。

分子间存在空隙，但是用力压一个铅块，却很难减小它的体积，这说明分子间存在着斥力。

分子间同时还存在着引力。如图 10–12 所示，用吸盘、细线将一块洗净的玻璃板水平地悬挂在弹簧测力计下端，并使玻璃板贴在水面上；然后缓慢提起弹簧测力计，在玻璃板脱离水面的一瞬间，弹簧测力计的示数明显大于玻璃板的重力。这是因为在玻璃板离开水面的瞬间，测力计对玻璃板的拉力不仅要克服玻璃板的重力，还要克服水分子对玻璃板下表面分子的引力作用。图 10–7 中两个相互压紧的铅块之所以不会分开，甚至下面挂很重的钩码也不能把它们分开，也是因为铅分子之间的引力将两铅块“粘”在了一起。

图 10–12 玻璃片脱离水面

深入的研究表明，分子间同时存在着引力和斥力，它们的大小都跟分子间的距离有关。图 10–13 中的两条虚线分别表示两个分子间的引力 $F_{引}$ 和斥力 $F_{斥}$ 随分子间距离 r 变化的情形；实线表示 $F_{引}$ 和 $F_{斥}$ 的合力 F（即实际表现出来的分子间的作用力）随 r 变化的情形。

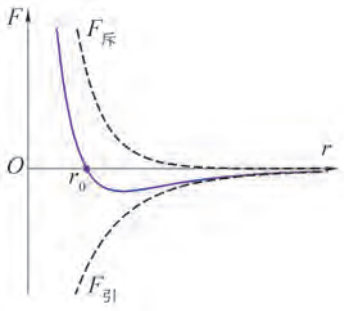


图 10–13 分子间作用力

从图示的曲线可以看出，$F_{引}$ 和 $F_{斥}$ 都随着 r 增大而减小，且 $F_{斥}$ 减小得更快。

当 $r = r_0$ 时，$F_{引} = F_{斥}$，$F = 0$，这个位置称为平衡位置；

当 $r < r_0$ 时，$F_{引} < F_{斥}$，F 表现为斥力；

当 $r > r_0$ 时，$F_{引} > F_{斥}$，F 表现为引力。

r_0 的数量级约为 10^{-10} m。当 r 的数量级大于 10^{-9} m 时，分子间的作用力已经变得非常微弱，可以忽略不计。

拓展视野

分子间为什么同时存在引力和斥力呢？

分子是由原子构成的，而原子是由原子核和电子组成的。原子核带正电，电子带负电，它们的总电荷量大小相等，因而分子处于电中性状态，对外不显电性。当两个分子相互靠近时，异号电荷之间产生吸引力，同号电荷之间产生排斥力，所以分子间同时存在引力和斥力。两个分子刚开始靠近时，每个分子上的电荷受到扰动而使它们的位置稍有变化，两个分子中异号电荷之间的吸引作用超过同号电荷之间的排斥作用，因此分子之间的作用力在总体上表现为引力。如果两个分子进一步靠近，以致带正电的原子核之间的库仑斥力变得显著，这时分子间的作用力就表现为斥力。

▶ 分子动理论的基本观点

通过前面的学习已经知道：物体是由大量分子组成的，分子在做永不停息的无规则运动，分子之间同时存在着引力和斥力。这就是**分子动理论（molecular kinetic theory）**的基本观点。

与其他物理理论一样，分子动理论也是建立在大量的实验基础之上的。根据分子动理论，热现象是大量分子无规则运动的宏观表现，温度表示分子无规则运动的剧烈程度。用分子动理论可以说明很多的热现象和物质的性质。科学家们用分子动理论首先详细地研究了气体，解释了气体的宏观性质，之后又用分子动理论研究了液体和固体，也获得了很大的成功。

问题与思考

1. 滴入水中的红墨水会扩散，其原因是什么？温度越高，这种扩散越快，说明了什么？

2. 判断以下现象是否由于分子间的引力所致，并简述理由。
   （1）两块纯净铅柱的端面刮得十分平整后用力挤压可以“粘”在一起。
   （2）经丝绸摩擦过的玻璃棒能吸引轻小物体。
   （3）磁铁能吸引小铁钉。
   （4）自由落体运动。

3. 关于图 10–10 中的折线，甲同学说是花粉颗粒运动的轨迹，乙同学说是液体分子的无规则运动轨迹。试对此作出简要评述。

4. 简述布朗运动的特点，并给出“液体分子的热运动导致布朗运动”的证据。

5. 已知两个分子之间的距离为 r_0（约 10^{-10} m）时，分子间的作用力为零。两个分子从很远处逐渐靠近直到分子间距离小于 r_0 的过程中，分子间的引力、斥力及其合力如何变化？

第三节 分子运动速率分布的统计规律

组成物质的大量分子在永不停息地做无规则运动。对单个分子而言，速度方向随机变化，速率时大时小；任意两个分子的运动方向和速率一般不相同。但是，当我们研究大量气体分子时又会发现，大量分子的运动却表现出一定的规律性。

▶ “伽尔顿板”实验的启示

图 10–14 所示的装置称为伽尔顿板，其上部规则地布有许多铁钉，下部用隔板分割成许多等宽的竖直狭槽，大量小球可通过中间漏斗形入口落下，装置前有玻璃板覆盖，使小球最终落在槽内。重复实验多次，发现某个小球落入哪个槽内完全是随机的，但大量小球在槽内的分布却是有规律的，越靠近中间小球越多。

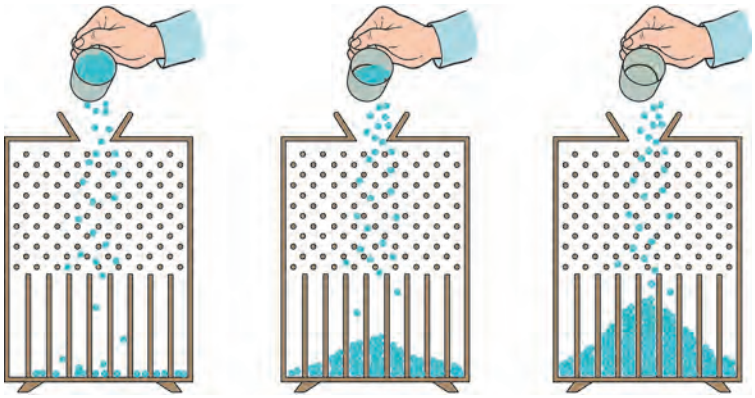


图 10–14 “伽尔顿板”实验

这种大量随机事件的整体表现所显示的规律性叫做统计规律。

“伽尔顿板”实验的结果给我们这样的启示：对于由大量分子组成的系统，个别分子的运动并无规律可言；但大量分子的热运动，却可能显示出一定的统计规律。

▶ 分子速率分布的统计规律

对气体的大量实验表明，所有分子速率的分布符合一定的统计规律。

表 10–1 是 0℃和 100℃时氧分子的速率分布。其中 0℃时的氧分子在各速率区间分布的直方图如图 10–15 所示。

表 10–1　0℃和 100℃时氧分子的速率分布

分子速率 v / (m·s^{-1})	各速率区间的分子数占分子总数的百分率 /%	
	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

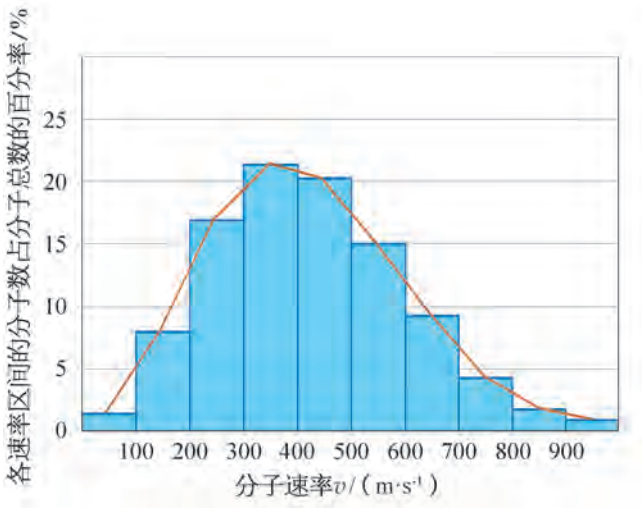


图 10–15　0℃时氧分子在各速率区间分布的直方图

自主活动

根据表 10–1 中的数据，作出如图 10–15 所示的 100℃时的氧分子在各速率区间速率分布的直方图，并与 0℃时的速率分布直方图作比较。

19 世纪中叶，英国物理学家麦克斯韦创造性地运用统计方法找到了气体分子速率的分布函数，从而确定了气体分子速率分布的统计规律。该分子速率分布函数 $f(v)$ 的图像如图 10–16 所示。$f(v)$ 为在速率 v 附近单位速率间隔内气体分子数与分子总数的比。

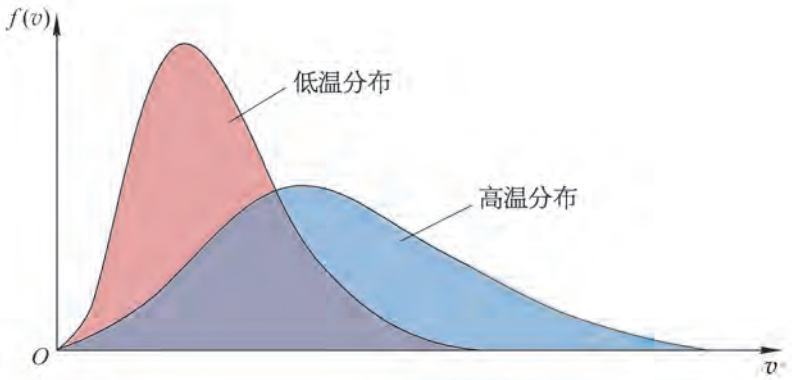


图 10–16　麦克斯韦气体分子速率分布曲线

这个规律指出：一般而言，气体分子的速率各不相同，但大多数分子的速率都在某个数值（峰值）附近，离开这个数值越远，分子数越少，呈现出“中间多，两头少”的分布特征；温度升高，曲线的峰值会向速率大的方向移动，速率的分布范围增大，整个曲线将变得较为平坦。

大家谈

图 10−16 中的高温和低温时速率分布曲线下的面积是否相等，为什么？

对大量分子组成的系统，我们很难掌握每个分子运动的全部信息，运用统计方法可以获得大量分子的速率、动能等微观物理量遵循的统计规律，进而确定物体的宏观状态和性质。例如，根据气体的速率分布规律就可以确定气体的温度。随着人们对定量研究的日益重视，统计方法已被应用到自然科学和社会科学的众多领域。

拓展视野

麦克斯韦给出气体分子的速率分布规律后，由于高真空技术和测量技术的限制，此后近半个世纪都无法用实验验证这一统计规律。直到 1920 年，英国物理学家史特恩才做了第一次成功的尝试。1934 年，我国物理学家葛正权（1896—1988）改进了史特恩的实验装置，并定量地验证了麦克斯韦的气体分子速率分布规律，获得国际公认。

1955 年，哥伦比亚大学的密勒和库士提出了一个能高度精确证明这个分布律的实验方案。实验装置如图 10−17 所示。实验结果与麦克斯韦气体分子速率分布律完全相符。

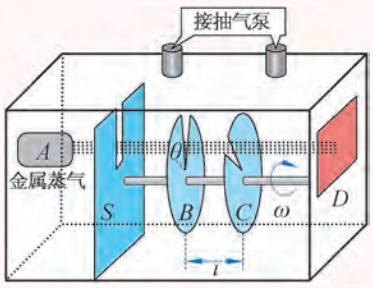


图 10−17 密勒和库士的实验装置示意图

问题与思考

1. 判断以下关于分子速率的观点是否正确，并简述理由。
   （1）当温度升高时，组成物体的每个分子的速率都会增大。
   （2）甲、乙两杯水，甲杯水的温度为 70℃，乙杯水的温度为 30℃，那么甲杯水内的每个水分子的速率都比乙杯水内每个水分子的速率大。

2. 在温度为 25℃的环境中，有一个导热良好的密闭容器内封有一定量的氮气。简述容器中氮气分子的速率分布情况。若将该容器放入冰箱冷藏室后，氮气分子的速率分布如何变化？

3. 在日常生活中，很多现象都遵循统计规律。根据本年级所有同学的身高数据，分别作出本班男生（或女生）和全年级男生（或女生）身高的分布曲线，观察并比较两个曲线的形状；了解人数占比最多的身高区间。

小结

· 基本概念和基本规律

布朗运动：悬浮颗粒在液体或气体中的无规则运动。

分子热运动：组成物质的分子永不停息的无规则运动，温度越高这种运动越剧烈。

分子动理论：研究分子热运动性质和规律的经典微观理论。包括以下主要观点：物体是由大量分子组成的，分子在做永不停息的无规则运动，分子之间同时存在着引力和斥力。气体分子的速率分布遵循一定的统计规律。

· 基本方法

通过估测分子大小的实验，感受模型建构的方法，体会数据获取、分析和处理过程中的积累法。感受估测微观量的方法。

在学习分子动理论的过程中，感受利用证据通过科学推理进行科学论证的方法。

在学习分子速率分布的统计规律的过程中，认识统计方法在物理学中的应用。

· 知识结构图

复习与巩固

1. 判断下列哪些宏观现象可以作为分子热运动的证据，简述理由。

（1）水的对流；（2）墨水滴入清水中缓慢散开；（3）打开酒精瓶盖就嗅到酒精的气味；（4）水中悬浮花粉的布朗运动。

2. 对于单个分子而言，能说它的温度有多高吗？为什么？

3. 某种气体在不同温度下的分子速率分布曲线如图 10–18 所示。曲线 Ⅰ 和 Ⅱ 对应的温度哪个高？简述这两个温度对应的气体速率分布的相同点和不同点。

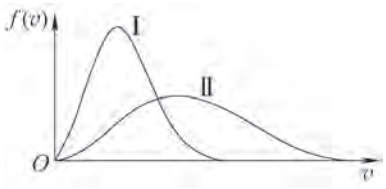


图 10–18

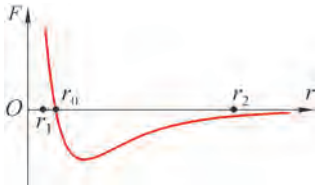


图 10–19

4. 如图 10–19 为分子间相互作用力随分子间距 r 变化的关系图。甲同学说：“相距 r_1 时，分子间没有引力”；乙同学说：“相距 r_2 时分子间的引力大于相距 r_1 时的引力”。请对这两种说法作出评价。

5. $PM_{2.5}$ 是指空气中直径小于 2.5 μm 的悬浮颗粒物。飘浮在空中的 $PM_{2.5}$ 很难自然沉降到地面，吸入肺部后会进入血液对人体造成危害。估算一颗直径为 2.5 μm 的悬浮颗粒中约有多少个分子？

6. “用油膜法估测油酸分子的大小”的实验通过对宏观量的测量来估测分子的大小。试回答以下问题：

（1）这个实验中主要涉及哪些物理方法？

（2）某小组同学将最终得到的计算结果与其他小组比较，发现自己得到的数据比其他组大几百倍，他们猜测可能是由于以下原因所致，选择其中较为合理的猜测并简述理由。

① 将油酸酒精溶液的体积直接当作油酸的体积计算。

② 计算油膜面积时，只数了完整的方格数。

③ 水面上痱子粉撒得太多，油膜没有充分展开。

7. 设想气体的每个分子都处在相同的一个小立方体的中心。

（1）试求标准状态下这些小立方体的边长。

（2）若取分子的直径为 3.0×10^{-10} m，试计算小立方体的边长与分子直径的比值。

*8. 一个开有带阀门小口的绝热容器中充满气体。打开阀门，会有一部分气体从容器中泄漏出来，从而导致容器内气体的温度降低。用分子动理论的观点对此现象作出简要解释。

第十一章

气体、液体和固体

用打气筒给自行车轮胎打气，能明显感受到打气筒内气体被压缩时产生的压力，以及打气筒筒壁发热。雨后的荷叶上会留下球状的水珠，水珠在荷叶上滚动，并不能将荷叶浸湿。雪花总是呈现出较为规则的几何外观……气体、液体和固体所表现出来的这些宏观特性可以通过气体、液体和固体分子的热运动以及分子间的相互作用来解释。对物质基本性质的研究，也是人类研发新材料及其应用技术的基础。

在初中阶段我们已经学习了物态变化的初步知识，上一章又学习了分子动理论。在本章中将通过实验了解气体实验定律；知道理想气体模型；在实验中观察液体的表面张力现象并了解表面张力的成因；了解固体的微观结构；知道晶体和非晶体的特点；了解液晶等新材料的性质及其应用。在通过实验了解气体实验定律和学习理想气体模型的过程中，进一步体会控制变量和物理建模的思想方法，发展科学探究能力；用分子动理论解释气体、液体和固体的性质，提升物质、运动和相互作用的观念，发展科学思维和科学论证能力；通过对新材料的了解，感受材料科学和技术对人类社会发展的积极作用。

第一节 气体的状态

孔明灯（图 11–1）是我国古老的手工艺品。热气球（图 11–2）发明于 18 世纪，它的出现最早实现了人类的飞翔梦。孔明灯和热气球都是通过加热气体获得向上的动力，但要了解它们上升的原理，还必须进一步研究气体的相关性质。

图 11–1 孔明灯

图 11–2 热气球

在力学中，引入了位移、速度等物理量来描述物体的机械运动状态，为了描述气体的宏观状态又应该引入哪些物理量呢?

▶ 气体宏观状态的描述

大家谈

对于一瓶封闭的气体，应该如何描述它的状态?

一定质量的气体是由大量做无规则运动的分子组成的系统，宏观上表现为充满一定的空间，具有热学、力学等物理性质。我们分别用体积、温度和压强来描述气体的这些宏观物理性质。

• 气体的体积

组成气体的大量分子总能充满整个容器，如图 11–3 所示，因此气体的体积就是盛放气体容器的容积。

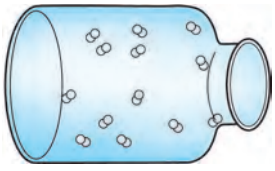


图 11–3 气体的体积

• 气体的温度

将两个温度不同的系统互相接触，这两个系统的状态都会变化，热的变冷，冷的变热。经过一段时间后，这两个系统的状态不再变化，达到平衡，这种平衡叫做热平衡，处于热平衡状态的两个系统具有相同的温度。为了定量地描述温度，就必须建立温标。常用的温标有摄氏温标、热力学温标等。

用热力学温标表示的温度叫做热力学温度，用符号 T 表示，单位是开尔文（K），简称开，它是国际单位制中七个基本量之一。热力学温度 T 与摄氏温度 t 之间的关系是

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

日常生活中通常用温度计测量气体的温度，工业生产和科学实验中也常用温度传感器测量气体的温度。表 11–1 所示是一些典型的温度值。

表 11–1　一些典型的温度值

宇宙大爆炸后的 10^{-43} s	10^{32} K	月球向阳面	4×10^{2} K
氢弹爆炸中心	10^{8} K	月球背阴面	90 K
太阳中心	1.5×10^{7} K	氮的液化点	77 K
太阳表面	6×10^{3} K	氦的液化点	4.2 K
地球中心	4×10^{3} K	宇宙微波背景辐射	2.7 K
乙炔焰	3×10^{3} K	实验室内获得的最低温度	10^{-11} K

• 气体的压强

我们用下面的实验来模拟气体压强的产生。如图 11–4 所示，把台秤的托盘翻过来放置，将若干小钢珠（或黄豆）连续倒向托盘。小钢珠与托盘撞击后全部都被反弹开，但由于许多小钢珠不断地撞击托盘，托盘就受到一个持续的压力，台秤就会指示这一压力。

图 11–4　气体压强的模拟

类似于钢珠对托盘的撞击会产生持续的压力，容器内大量运动的气体分子对容器器壁的不断撞击也会产生压力。当气体处于平衡状态时，尽管单个分子对器壁的撞击作用是断续的、随机的，但大量分子对容器撞击所产生的压力却是持续的、稳定的。一定质量的气体压强与分子的质量、分子运动的速度和单位时间内撞击单位面积器壁的分子数等有关，即与温度和容器内的分子数密度（单位体积内的分子数）有关。

容器壁单位面积上所受的气体分子压力就是气体的压强，用字母 p 表示，国际单位是帕斯卡（Pa），简称帕。

实际生活中常用指针式或数字式压强计测量气体压强。图 11–5 显示的是用指针式压

强计来测量轮胎气压。实验室中，常用压强传感器来测量气体的压强。

体积、温度、压强都是用来描述一定质量气体状态的物理量，我们称之为气体的状态参量。对于一定质量的气体，如果体积、温度、压强都不变，则称气体处于平衡状态（简称平衡态）。只要有状态参量发生变化，我们就说该气体的状态发生了变化。

图 11–5 指针式压强计测轮胎气压

问题与思考

1. 如图 11–6（a）、（b）所示，两个相同玻璃管的左端用相同的橡皮膜密封，管内活塞可被自由推拉且与管壁贴合。将图中的活塞分别缓慢移至图中所示的虚线位置，描述橡皮膜的形变情况，并简述管内气体状态参量的变化情况。

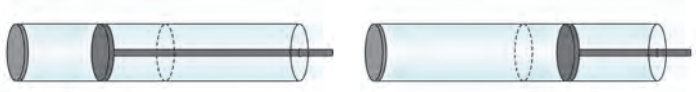


图 11–6

2. 一定质量的气体封闭在容器内，试比较以下两组物理量的关系。
（1）气体的体积 V_1 与组成这些气体的所有分子的体积之和 V_2。
（2）气体的质量 m_1 与组成这些气体的所有分子的质量之和 m_2。

3. 某气体的温度由 −20℃升高到 27℃。试用热力学温度表示该气体的初、末温度和温度的变化量。

4. 用分子动理论、动量定理和统计观点解释气体压强。

5. 测气体压强时，汞压强计竖直放置，三次测量分别如图 11–7（a）、（b）、（c）所示。设汞的密度为 ρ，图中 p_0 为大气压强，h 为两臂汞面的高度差，则容器中气体的压强 p 分别为多少？

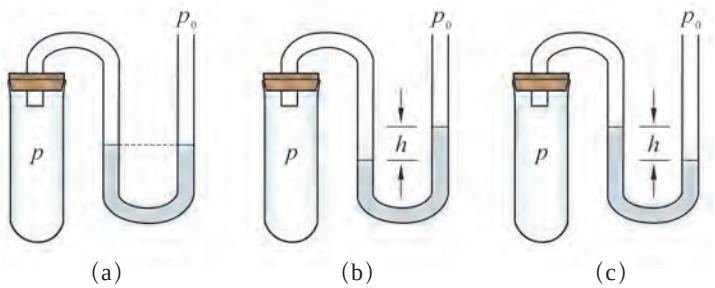


图 11–7

第二节　气体的等温变化

如图 11–8 所示，在一个大塑料瓶里装入大半瓶水，并放入一个倒扣的小瓶，小瓶内留有大约一半水，使其刚好浮出水面。拧紧大瓶的盖子，用力挤压大瓶，就可以看到小瓶下沉。这个装置叫做浮沉子。

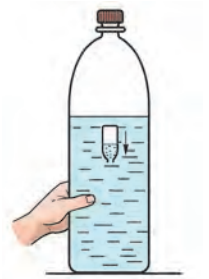


图 11–8　浮沉子

用力挤压大瓶时，其上方封闭气体的状态发生变化，最终导致小瓶下沉。在这个过程中，封闭气体的三个状态参量是怎样变化的呢？它们彼此间有什么定量关系吗？

描述气体状态的三个状态参量之间存在一定的关系。本节将通过实验研究一定质量的气体在温度保持不变的情况下气体压强与体积之间的变化关系，这个变化过程叫做等温变化。

▶ 气体的等温变化

自主活动

如图 11–9 所示，将活塞置于塑料注射器中部，用橡皮帽封住注射口，体会推、拉活塞时的感觉，并观察松手后活塞的运动。

图 11–9　推、拉注射器活塞

在上述活动中，无论是推还是拉，我们都能感受到阻力，并且活塞移动的距离越大这种阻力越大。根据上述现象，你能对封闭在注射器内气体的压强与体积之间的变化关系提出猜想吗？

学生实验

探究等温情况下一定质量气体压强与体积的关系

提出问题

注射器内的封闭气体体积减小时压强增大，体积增大时压强减小。等温情况下，一定

质量气体的压强是否与体积成反比?

实验原理与方案

一定质量的气体状态发生变化时，其压强、体积、温度都有可能发生变化。为了研究压强与体积的关系，需要控制气体的温度保持不变。

改变气体体积，测出不同的体积 V 及其对应的压强 p，研究 p 与 V 之间是否存在反比关系。

实验装置与方法

如图 11–10 所示的实验装置可供选用。

以注射器内的封闭气体为研究对象，由注射器的刻度读出封闭气体的体积，由压强传感器测量气体的压强；多次改变注射器活塞的位置，获得多组封闭气体的体积和压强的测量值。

本实验采用作图的方法分析数据，得出 p、V 之间的函数关系。

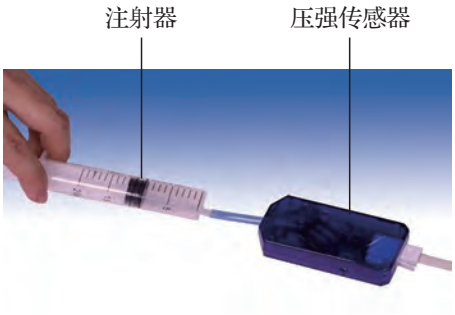


图 11–10 探究等温情况下气体压强与体积的变化关系

实验操作与数据收集

将注射器与压强传感器的检测口相连，封闭一定质量的气体。缓慢推、拉注射器活塞，在活塞位于各个设定体积所对应的刻度时记录相应的压强测量值并填入表 11–2。

表 11–2 实验数据记录表

实验序号	1	2	3	4	5
V/mL					
p/Pa					

数据分析

根据实验数据，选择合适的坐标系描点作图，研究 p 与 V 之间是否存在反比关系。

实验结论

_____

_____

交流与讨论

(1) 在实验中，怎样确保封闭气体的温度不变?

(2) 各组得到的 p 与 V 乘积的平均值一致吗?若不一致，分析可能的原因。

▶ 玻意耳定律

英国化学家、物理学家玻意耳（图 11–11）和法国科学家马略特（E. Mariotte，1620—1684）各自通过实验发现，一定质量的气体在温度不变时，压强与体积成反比。这个结论叫做**玻意耳定律（Boyle's law）**。

图 11–11　玻意耳（R. Boyle，1627—1691）

如果用 p_1、V_1 和 p_2、V_2 分别表示一定质量的气体在等温变化中任意两个状态的压强、体积，玻意耳定律可表示为

$$\frac{p_1}{p_2}=\frac{V_2}{V_1} \text{ 或 } p_1V_1=p_2V_2$$

如图 11–12 所示是一定质量的气体经历等温变化时的 p–V 关系曲线，叫做**等温线（isotherm）**。在 p–V 坐标系中，等温线是一条双曲线。

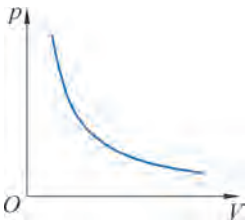


图 11–12　等温线

利用玻意耳定律可以解释图 11–8 中浮沉子的运动。挤压大瓶时，大瓶内水面上方的封闭空气体积减小，压强增大，水被压入小瓶中，使小瓶中水的质量增加，小瓶所受浮力减小，于是小瓶下沉。

示例　一个体积为 V 的气泡自池塘底浮起，如图 11–13 所示。若水深为 3 m，气泡从池底上升到水面时体积将变为原来的多少倍？（设水底和水面温度相同，大气压强 $p_0=1.0\times10^5$ Pa，水的密度 $\rho=1.0\times10^3$ kg/m）

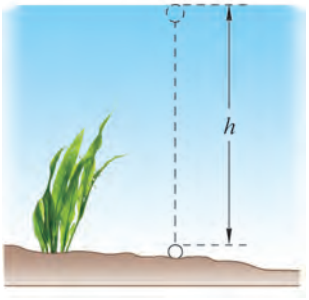


图 11–13

分析：由于水底和水面温度相同，而且气泡在上升过程中质量没有发生变化，所以遵循玻意耳定律。只要算出气泡在水底和水面时的内部气体压强，即可求出体积的变化情况。

解：在池底时，气泡内部气体压强 $p_1=p_0+\rho gh$，体积 $V_1=V$；当气泡浮到水面后，气体压强 $p_2=p_0$，体积为 V_2。根据玻意耳定律

$$p_1V_1=p_2V_2$$

所以，

$$V_2=\frac{p_1V_1}{p_2}=\frac{(p_0+\rho gh)\,V}{p_0}$$

$$=\frac{(1.0\times10^5+1.0\times10^3\times9.8\times3)}{1.0\times10^5}V$$

$$\approx1.29V$$

因此，气泡从池底上升到水面时体积将变为原来的 1.29 倍。

在应用玻意耳定律解题时，首先要搞清楚是否满足温度不变和气体质量不变的条件，然后分清两个不同状态的压强和体积值。在运算过程中不一定要用国际单位，只要方程两边使用的单位相同就可以了。

STSE

根据玻意耳定律，气体体积被压缩时压强增大，大客车的制动系统和车门开关机构通常就是以压缩空气作为动力来控制的。

图 11–14 所示是位于大客车车门上方的双向气阀构造图。从图中可看出，电磁控制阀的作用是使压缩空气根据需要轮流从进气管进入汽缸内活塞的两侧，使活塞做往复运动，从而实现开门和关门的动作。

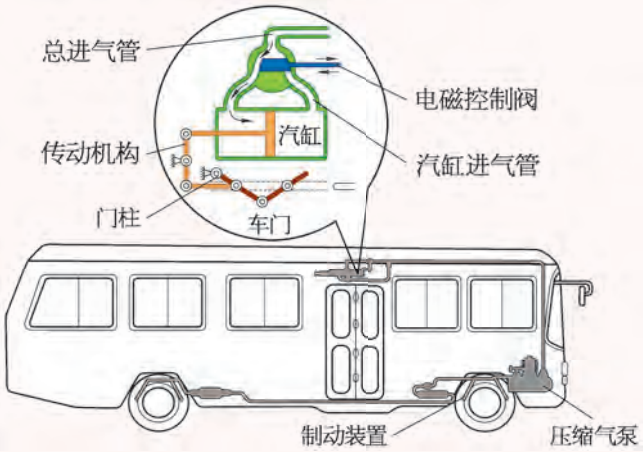


图 11–14 大客车双向气阀构造图

▶ 玻意耳定律的微观解释

玻意耳定律反映了气体宏观状态的变化规律，这一规律可用分子动理论的观点从微观角度加以解释。气体的压强取决于温度和容器内气体的分子数密度。当质量一定的气体温度不变时，气体的压强仅与气体的分子数密度有关。故体积越小，气体分子数密度越大，单位时间内撞击单位面积的分子数越多，气体的压强就越大。

问题与思考

1. 在本节的“自主活动”中，推活塞时感觉很费劲，有人说这表明分子间有斥力。请对此作出判断并简述理由。

2. 如图 11–15 所示，滴管尾部套有弹性橡胶球。挤压橡胶球，然后把滴管的玻璃嘴放入水中，松手后，水便进入滴管内部。解释上述现象。

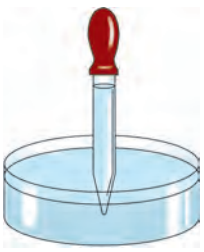


图 11–15

3. 如图 11–16 所示，在球形瓶中放入一个气球，把气球的开口端翻在球形瓶的瓶口上，然后向气球内吹气，简述将要发生的现象及其原因。

图 11–16

4. 湖底腐烂的植物释放出沼气，当遇到严寒天气时沼气泡在水中被冰冻起来，自下而上越来越大，形成一道有趣的风景（图 11–17）。

（1）简述上述现象的成因。

（2）若一个沼气泡从湖底升至湖面时体积加倍，估算湖水的深度。

图 11–17

5. 如图 11–18 所示的潜水钟（一种沉放到水下，研究水底情况的装置，也可作为检修大桥桥墩及其他建筑设施水下部分的潜水装置）高 2 m，开口端竖直向下沉到 10 m 深的水底，求进入钟内的水深 h。（设钟内封闭气体的温度保持不变，大气压强 $p_0 = 1.0 \times 10^5$ Pa，水的密度 $\rho = 1.0 \times 10^3$ kg/m^3，g 取 10 m/s^2）

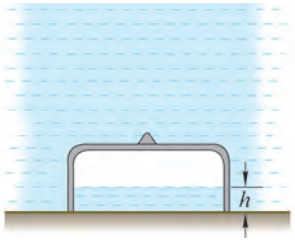


图 11–18

6. 某小组同学应用玻意耳定律设计了一个测量大气压强的实验方案：一端封闭、粗细均匀的玻璃管开口向上竖直放置，内有一段汞柱封闭了一定质量的空气，如图 11–19 所示。多次改变管内汞柱长度，测量多组汞柱的长度 h 和空气柱的长度 l；然后在 $h-\dfrac{1}{l}$ 坐标系中描点作图。

图 11–19

（1）写出所作图线的函数表达式。

（2）如何利用该图线求出大气压强？

第三节 气体的等容变化和等压变化

夏天，有经验的司机在上高速公路前，会把汽车胎压略微调低些，以预防爆胎；冬天从热水瓶里倒出一些热水后盖上瓶塞，过一段时间后很难拔出瓶塞。这些现象都说明一定质量的气体在体积不变时，压强会随温度变化而变化。

▶ 气体的等容变化

一定质量的气体在体积保持不变情况下发生的变化叫做等容变化。我们可以通过下面的实验来研究气体等容变化过程中压强与温度的关系。

如图 11–20 所示，与压强传感器相连的试管内装有封闭的空气和温度传感器的热敏元件。用远红外加热器加热试管内的气体，每隔一定时间记录一组压强与温度的值。

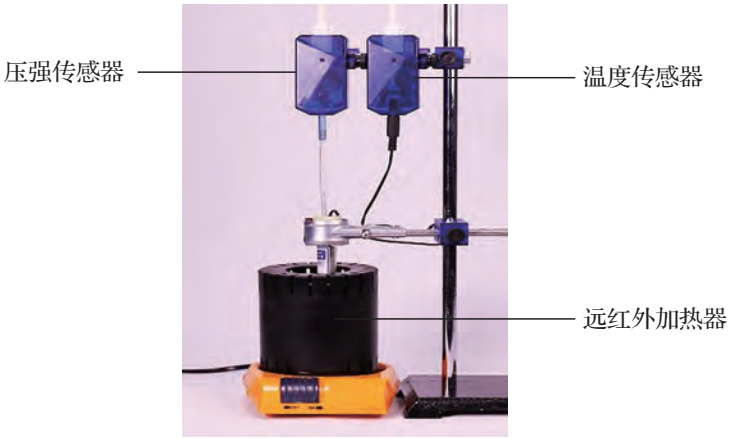


图 11–20 研究等容情况下气体压强随温度的变化关系

通过实验，可以获得如图 11–21 所示的气体压强 p 与热力学温度 T 的关系图像。

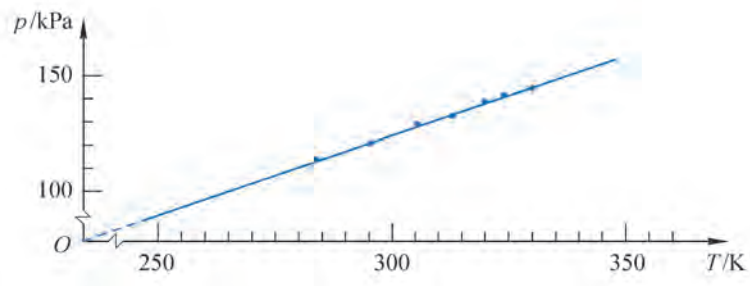


图 11–21 气体压强 p 与热力学温度 T 的关系

实验表明，一定质量的气体在体积不变时，压强与热力学温度成正比。这个规律叫做**查理定律（Charles's law）**。

如果用 p_1、T_1 和 p_2、T_2 分别表示一定质量的气体在等容变化中任意两个状态的压强、热力学温度，查理定律可表示为

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

如图 11–22 所示是一定质量的气体经历等容变化时的 p–T 关系曲线，叫做**等容线（isochore）**。在 p–T 坐标系中，等容线是一条过原点的倾斜直线。

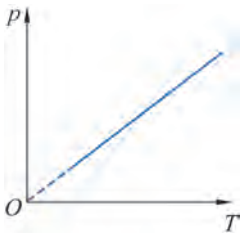


图 11–22　等容线

▶ 气体的等压变化

一定质量的气体在压强保持不变情况下发生的变化叫做等压变化。

实验发现：一定质量的气体在压强不变时，体积与热力学温度成正比。这个规律叫做**盖·吕萨克定律（Gay-Lussac's law）**。

如果用 V_1、T_1 和 V_2、T_2 分别表示一定质量的气体在等压变化中任意两个状态的体积、热力学温度，盖·吕萨克定律可表示为

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

如图 11–23 所示是一定质量的气体经历等压变化时的 V–T 关系曲线，叫做**等压线（isobar）**。在 V–T 坐标系中，等压线是一条过原点的倾斜直线。

图 11–23　等压线

图 11–22 和图 11–23 的原点对应 $T=0$ K。0 K（−273.15 ℃）是一个只能无限逼近但不能达到的温度极限，称为**绝对零度（absolute zero）**。

自主活动

将烧瓶和粗细均匀的 L 形玻璃管用橡皮塞连成如图 11–24 所示的装置，在玻璃管内注入一小段油柱。设计一个用这个装置验证盖·吕萨克定律的实验方案。

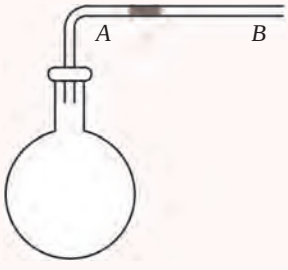


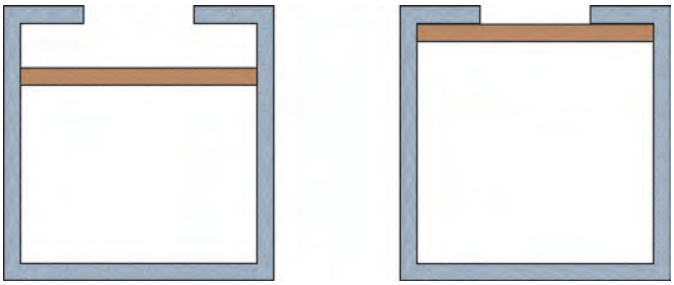
图 11–24　验证盖·吕萨克定律

在压强基本不变的情况下，孔明灯和热气球内的气体受热后温度升高，体积增大。由于孔明灯和热气球的容积不变，导致内部一部分气体从开口处溢出，内部气体的密度下降，从而使得孔明灯或热气球上升。

示例 如图 11–25（a）所示，某种气体被一定质量的活塞封闭在容积为 1 m^3 的汽缸中，初始状态时气体的压强为 $p_1 = 1.2 \times 10^5$ Pa、温度为 $T_1 = 200$ K，封闭气体体积为 $V_1 = 0.8$ m^3。现对气体缓慢加热，求：

（1）活塞刚上升到汽缸顶部时 [图 11–25（b）]，气体的温度 T_2；

（2）气体的温度升高到 $T_3 = 375$ K 时，气体的压强 p_3。



（a） （b）

图 11–25

分析：在活塞缓慢上升的过程中，气体的压强始终等于大气压强与活塞压强的和，所以保持不变，气体经历了等压变化过程；活塞到达汽缸顶部后，气体的体积不再变化，压强随着温度的继续升高而增大，气体开始经历等容变化过程。

解：根据已知条件，气体在三种情况下的状态参量如下

状态Ⅰ，$p_1 = 1.2 \times 10^5$ Pa，$T_1 = 200$ K，$V_1 = 0.8$ m^3；

状态Ⅱ，$p_2 = 1.2 \times 10^5$ Pa，T_2 未知，$V_2 = 1$ m^3；

状态Ⅲ，p_3 未知，$T_3 = 375$ K，$V_3 = 1$ m^3。

（1）从状态Ⅰ到状态Ⅱ，气体发生等压变化，根据盖 · 吕萨克定律有

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

故活塞刚上升到汽缸顶部时，气体的温度

$$T_2 = \frac{V_2}{V_1} T_1 = \frac{1}{0.8} \times 200 \text{ K} = 250 \text{ K}$$

（2）从状态Ⅱ到状态Ⅲ，气体发生等容变化，根据查理定律有

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3}$$

故温度为 $T_3 = 375$ K 时，气体的压强

$$p_3 = \frac{T_3}{T_2} p_2 = \frac{375}{250} \times 1.2 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.8 \times 10^5 \text{ Pa}$$

在应用气体实验定律解决问题时，首先要搞清楚封闭气体有哪几个状态，分清不同状态时气体的压强、体积和温度，确定从一个状态到另一个状态的过程中是温度保持不变、还是体积或者压强保持不变，然后选择相应的实验定律。在运算过程中特别要注意温度必须采用热力学温标。

▶ 理想气体

玻意耳定律、查理定律和盖·吕萨克定律都是在压强不太大（和大气压相比）、温度不太低（和室温相比）的条件下总结出来的气体实验定律。在这种条件下，气体分子之间的距离大约是分子直径的 10 倍，分子的体积和分子间的相互作用可以忽略不计。当压强很大、温度很低时，气体不再稀薄，分子的体积和分子间的相互作用会对气体的宏观性质产生影响，上述定律就不再适用。

为了研究方便，可以设想一种气体，在任何压强、任何温度下都遵循气体实验定律，这样的气体叫做**理想气体（ideal gas）**。理想气体作为一种理想化的物理模型，完全忽略分子本身体积和分子间的相互作用。常温常压下，大多数实际气体都可近似看作理想气体。

拓展视野

气体状态发生变化时，压强、体积、温度一般同时发生变化。设容器内用活塞封有一定质量的理想气体，气体在初态 1 和末态 2 的状态参量分别为 p_1、V_1、T_1 和 p_2、V_2、T_2。利用气体实验定律和控制变量法可推得

$$\frac{p_1V_1}{T_1}=\frac{p_2V_2}{T_2}$$

这就是理想气体的状态方程，简称气态方程。对于一定质量的理想气体来说 $\frac{pV}{T}$ 是个常量，即

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

C 是一个与气体质量和种类有关的常量，$C=\frac{m}{M}R$，式中 m 是气体的质量，M 是该气体的摩尔质量，R 是常量，叫做普适气体常量。因此，对任何质量的某种理想气体有

$$pV=\frac{m}{M}RT$$

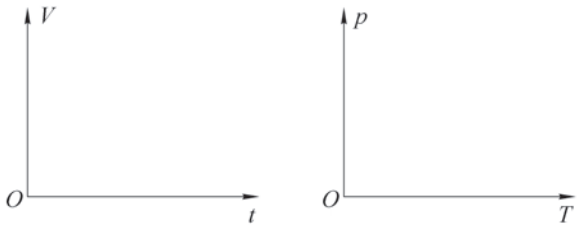
这个关系式叫做克拉珀龙方程，在解决有关气体的实际问题中有着广泛的应用。

问题与思考

1. 请解释下列现象。
   （1）保温杯中盛些热水后拧上杯盖，几小时后很难拧开杯盖。
   （2）夏天给自行车车胎打气打得太足，在烈日下骑行时车胎可能爆裂。

2. 历史上，查理定律被发现时尚未建立热力学温标，因此查理定律的原始形式采用的是摄氏温标。若 0℃时的压强为 p_0，试用摄氏温度 t 表述查理定律。

3. 冷藏室中密闭的某钢瓶内封有一定质量的气体。将钢瓶从冷藏室中移出并放置在常温环境中，分别在体积 – 摄氏温度（V–t）坐标系 [图 11–26（a）] 和压强 – 热力学温度（p–T）坐标系 [图 11–26（b）] 中定性地画出钢瓶内气体状态参量在这一过程中发生的变化。



（a）　（b）

图 11–26

4. 用分子动理论、动量定理和统计观点解释查理定律和盖 · 吕萨克定律。

5. 如图 11–27 所示为一个土法爆米花铁质容器，把米倒入容器后将盖盖紧，然后一边加热一边转动容器，同时观察容器上压强计的示数变化。当压强达到一定数值时，便可打开容器。就在打开容器的瞬间，米花爆成了。则：
   （1）加热过程中，容器中空气的密度和压强怎样变化？
   （2）描述在打开容器的瞬间米花生成的过程。

图 11–27

6. 汽车长时间停放在温度为 27℃的环境中。刚启动时，监测到四个轮胎的胎压如图 11–28（a）所示，行驶一段时间后的胎压如图 11–28（b）所示。试计算此时左前胎内气体的温度。

（a）　（b）

图 11–28

第四节　液体的基本性质

2013 年 6 月 20 日上午 10 点，在绕地飞行的“神舟十号”上，航天员王亚平将一个金属圈插入饮用水袋后抽出，金属圈上形成了一个水膜。轻晃金属圈，水膜并未破裂，用饮水袋不断注水，水膜很快“长成”一个晶莹剔透的大水球（图 11–29）。水膜为什么会成为球形？

图 11–29　太空舱内的大水球

▶ 液体的微观结构

液体没有确定的形状，具有流动性；有确定的体积，不易被压缩，其性质介于固体和气体之间。液体汽化时体积膨胀上千倍，凝固时体积收缩不超过 10%。

液体分子的热运动主要是在平衡位置附近的微小振动。但液体分子没有固定的平衡位置，它们在某一平衡位置附近振动一小段时间后，又移到另一个平衡位置附近做微小振动……这就是液体具有流动性的原因。

液体分子是聚集在一起的，因此液体具有确定的体积，且不易被压缩。但液体分子的位置只在很小的区域内表现出一定的规律性，而且这种区域随时可能瓦解再重新组合。从更大的范围来看，液体分子的位置则具有明显的不确定性。

宏观的液体就是大量暂时形成的分子集团的组合，这些分子集团杂乱无章地排列着，因而液体在各个方向上的物理性质都相同。

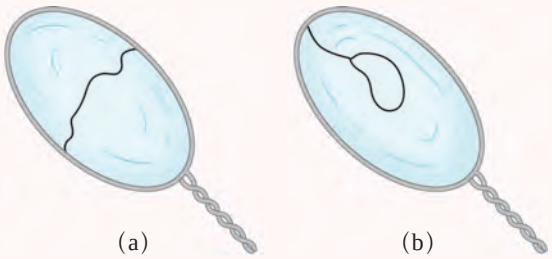
▶ 液体的表面张力

自主活动

将系有松弛棉线的铁丝环浸入肥皂液中再轻轻提起来，使环上结成肥皂薄膜。

（1）如图 11–30（a）所示，用热针刺破棉线一侧的薄膜，观察发生的现象。

（2）如图 11–30（b）所示，用热针刺破棉线圈内的薄膜，观察发生的现象。

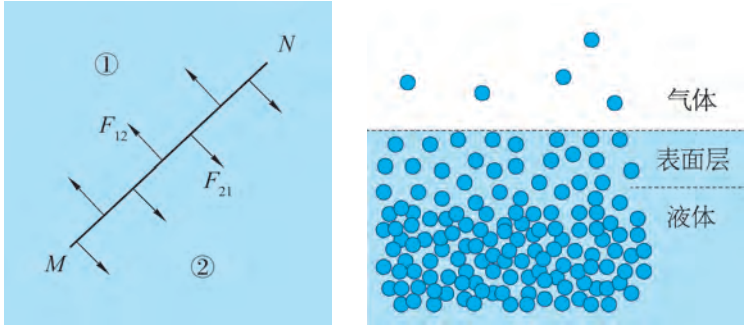


（a） （b）

图 11–30 观察肥皂膜和棉线变化的实验

在图 11–30（a）的情形中，如用热针刺破棉线一侧的薄膜，棉线会向另一侧收缩，呈圆弧形；而在图 11–30（b）的情形中，刺破棉线圈内的薄膜，棉线圈会扩张成圆形。这些现象说明，液面对边缘有垂直于边缘的吸引力。如果在液面上任意设想一条直线，如图 11–31（a）中的 MN，则直线两侧的液面①、②必定以相等的力相互吸引，如同彼此间存在拉力，而且这一拉力垂直于直线。这个拉力称为**表面张力（surface tension）**。可见，表面张力有使液体表面收缩的趋势。

表面张力源于液体分子间的引力作用。我们已经知道两个分子之间的作用力随彼此间距离变化的关系，在分子间距为 r_0 时引力和斥力平衡。在通常温度下，由于热运动，液体内部相邻分子间的距离比 r_0 略大，因此分子间作用力表现为引力。对表面而言，情形和内部有所不同。如图 11–31（b）所示，液体表面分子密度比内部小，相邻分子间距离略比内部大，因而分子间引力也比内部略大。设想一个处在表面层的分子，必受到前后左右分子的引力。由于存在这一引力，图 11–31（a）中 MN 左侧的液面①对右侧的液面②有吸引作用，液面②对液面①也有吸引作用，表现为表面张力。可见，表面张力的根源就是表面层液体分子间的引力。



（a） （b）

图 11–31 液体的表面张力

在图 11–30（a）的情形中，薄膜未刺破时棉线两边分子相互吸引，棉线两边液面的表面张力平衡。如刺破一侧薄膜，刺破侧的液面消失，棉线便成为另一侧薄膜表面的边缘，垂直于棉线的表面张力使液面收缩，棉线便呈圆弧状。而在图 11–30（b）的情形中，圈内薄膜被刺破后，圈外薄膜的表面张力将棉线圈拉成圆形。

在表面张力的作用下，液体的表面积趋于最小。如图 11–32 所示，由于相同的体积下球形的表面积最小，小草上的露珠在表面张力的作用下近似呈球形。在完全失重的太空舱中，由于没有重力的作用，水膜在表面张力的作用下形成了完美的球形，如图 11–29 所示。

图 11–32　小草上的水珠

▶ 浸润现象

自主活动

将洁净的玻璃片和石蜡块分别浸入水中后取出，观察玻璃片和石蜡的表面是否都被水浸湿。

通过上述活动，可以发现玻璃表面沾上一层水，且扩张成薄层，这种现象叫做**浸润（wetting）**；而石蜡表面不沾水，这种现象叫**不浸润**。

同种液体对一些固体是浸润的，对另一些固体是不浸润的。例如，水能浸润玻璃，但不能浸润石蜡。同种固体能被一些液体浸润，而对另一些液体则不能被浸润。例如玻璃能被水浸润，而不能被汞浸润。

固体能否被液体浸润，取决于固体分子对液体分子的作用力与液体内部分子相互作用力的关系。

在液体与固体的接触处形成的液体薄层叫附着层。当固体分子对附着层内液体分子的吸引力大于液体内部分子间的吸引力时，附着层液体有沿固体壁扩展的趋势，这就形成了液体对固体的浸润现象。由于上述原因，试管中的液体浸润玻璃时，管壁附近的液面向下弯曲呈凹状，如图 11–33（a）所示。

当固体分子对附着层内液体分子的吸引力小于液体内部分子间的吸引力时，附着层液体有收缩趋势，这就造成了液体对固体的不浸润现象。例如，汞气压计玻璃管中的汞面是凸形的弯月面，就是因为汞不浸润玻璃，如图 11–33（b）所示。

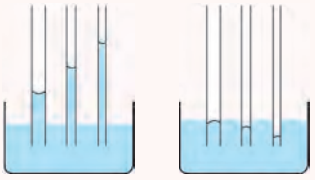
(a) 液体浸润固体　　(b) 液体不浸润固体

图 11–33　浸润和不浸润

▶ 毛细现象

自主活动

如图 11–34 所示，分别将三根内径不同的细玻璃管和三根内径不同的塑料吸管插入两个水槽中。比较六根管内外水面的高低及其与管内径的关系。



（a）细玻璃管　（b）塑料吸管

图 11–34　水对玻璃浸润、对塑料不浸润

通过上述活动，可以发现水对玻璃浸润、对塑料不浸润。细玻璃管内的水面高于管外水面，而且管越细，管内水面越高；塑料吸管内的水面低于管外水面，而且管越细，管内水面越低。

浸润液体在细管中上升和不浸润液体在细管中下降的现象叫做**毛细现象（capillarity）**。内径小到足以发生明显毛细现象的管道叫毛细管。

毛细现象在自然界和生活中普遍存在。纸张、纺织品、粉笔等能吸水，就是由于水能浸润这些多孔性物质（即具有大量毛细管）产生了毛细现象。脚踩在海边的沙滩上，一会儿脚下就渗出水来，这是因为沙中的孔隙变细，形成毛细管，水就容易上升到地面上来。

大家谈

天旱的时候，农民常用锄头松土来保持土壤中的水分；涝灾的时候则用滚轮压紧地面来排水，你能说说其中的道理吗？

问题与思考

1. 布伞伞面的孔隙肉眼可见，但雨水却不会从孔隙漏下，简要解释这个现象。

2. 如图 11–35 所示，经常可以看到小昆虫水黾在池塘的水面上跳来跳去，为什么它不会沉入水里？

图 11–35

3. 从液体性质的角度解释下列常见现象：
   （1）将食用油灌入小口瓶时，常在瓶口插一根竹筷或玻璃棒，油就可以沿着竹筷或玻璃棒流入瓶中，而不会流到瓶子外面。
   （2）医生处理患者伤口时，要用消毒后的脱脂棉，而不用消毒后的天然棉。
   （3）钢笔在油性纸上写不出字来，在棉质纤维构成的滤纸上写字却会化开。

4. 如图 11–36 所示，在几个花盆的中间放一盆水，用吸水较好的粗纱带或粗布条，一头浸在盆内的水中，另一头埋在盆土中。这样盆中的水就会慢慢渗入花盆的土中，花盆中的泥土可以长期保持湿润，简述理由。

图 11–36

第五节 固体的基本性质

冬天，漫天的雪花从空中飘落令人欣喜。如果用放大镜观察，晶莹剔透的雪花（图 11–37）则会让你看到一个奇幻的世界。

大自然创造的每一片雪花都是独特的，可是它们大多有“六个枝条”，在外形上体现出一定的规则性。

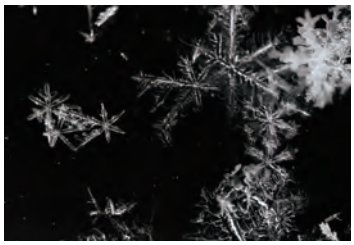


图 11–37 雪花

▶ 晶体和非晶体

自然界中大量物质都以固体形式存在。固体是物质的一种凝聚形态。从结构上说，一般可以把固体分成**晶体（crystal）**和**非晶体（amorphous matter）**两大类。常见的晶体有食盐、石英、云母等，常见的非晶体有玻璃、松香、橡胶等。

拓展视野

你知道什么是凝聚态物质吗？物质除了气、液、固三种常见状态外，还有介于液、固之间的中间态、等离子态、低温下的特殊量子态（如超流态）等。除稀薄气体外，包括稠密气体在内的其他各种物质状态统称为物质的凝聚态。人们对凝聚态物质的研究是从结构最有规律的晶体开始的。

晶体具有规则的几何形状，非晶体则没有。图 11–38 所示的是三种常见晶体的形状。

（a）食盐 （b）明矾 （c）石英

图 11–38 三种常见晶体的形状

晶体又分为单晶体和多晶体，整块物体就是一个晶体的叫做**单晶体（single crystal）**，例如图 11–38 中所示的晶体和作为半导体工业重要原材料的单晶硅和单晶锗。若整块物体由大量不规则排列的小晶体组成，就叫做**多晶体（polycrystal）**。常见的金属材料大多是多晶体。多晶体没有规则的几何外形。

另外，许多物理性质上的差异也可以用于区分晶体和非晶体。

分别在云母薄片和玻璃片上表面涂一层很薄的石蜡，用烧热的钢针去接触它们的下表面，比较观察到的结果。

如图 11–39 所示，云母片上熔化的石蜡呈椭圆形，玻璃片上熔化的石蜡呈圆形。这表明云母在各个方向上的导热性能是不一样的；而玻璃在各个方向上的导热性能是相同的。

（a）石蜡在云母片上熔化

（b）石蜡在玻璃片上熔化

图 11–39　石蜡熔化区域的形状

沿着不同方向撕开云母片，所需用力的大小不同，说明云母晶体在不同方向上的力学性质也是不同的；沿任意方向敲打玻璃，玻璃都会“粉身碎骨”，说明玻璃在各个方向的力学性质都相同。

晶体在不同方向上的物理性质（力学、热学、电学、光学性质等）不同，这种现象称为**各向异性（anisotropy）**。非晶体在不同方向上的物理性质相同，这种现象称为**各向同性（isotropy）**。这是区别晶体与非晶体的一个重要特征。

组成多晶体的大量小晶体的排列是杂乱无章的，因此多晶体的物理性质在整体上表现为各向同性。

除了常见的晶体以外，自然界中的大多数固体都是晶体，甚至构成生命的物质基础——蛋白质、核酸，以及许多活着的病毒也是晶体。

拓展视野

晶体和非晶体之间有时可以相互转化。天然水晶是晶体，而熔化以后再凝结成的水晶——石英玻璃却是非晶体。非晶体在一定条件下也可以转化为稳定的晶体，这一转化叫做晶化过程。

▶ 晶体的微观结构

为什么晶体和非晶体会有上述差异？ 归根结底，固体的宏观物理性质与组成固体的分子或原子的排列有关，这就涉及晶体的内部结构。

固体中分子或原子间距离约为 0.1 nm 量级，相互作用比较明显。组成晶体的微粒（分子、原子、离子或它们的团簇）依照一定的规律在空间整齐地排列，构成“空间点

阵”。如图 11–40 所示，食盐的晶体是由钠离子（图中红点）和氯离子（图中蓝点）组成的，它们等间距地交错排列在三组互相垂直的平行线上，每个钠离子的周围有六个氯离子，每个氯离子的周围有六个钠离子。组成晶体的微粒在固定的平衡位置附近不停地做微小振动，因此晶体具有规则的外形。

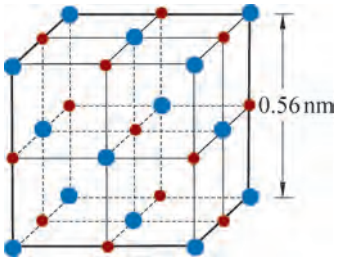


图 11–40 食盐的空间点阵

当晶体从外界吸收热量时，微粒的振动加剧，温度升高。当晶体的温度达到熔点时，微粒的剧烈振动会破坏其原有的规则排列，空间点阵瓦解，于是变成液体。在此过程中，晶体吸收的热量用来逐步破坏它的空间点阵，所以固液混合物的温度并不升高。晶体完全熔化后，随着继续从外界吸收热量，温度又开始升高。非晶体由于微粒的排列不规则，吸收热量后微粒的振动不断加剧，温度持续升高，非晶体由硬变软，最后变成液体。因此，晶体有固定的熔点，非晶体无固定的熔点。

大家谈

了解了晶体和非晶体的微观结构，你有什么办法可以区分多晶体和非晶体吗？

图 11–41 表示晶体物质微粒在一个平面上的排列情况。在图中所画出的三条等长线段 *AB*、*AC*、*AD* 上，物质微粒的数目、间距不同，因而导致晶体在不同方向上的物理性质的不同，这就造成了晶体的各向异性。

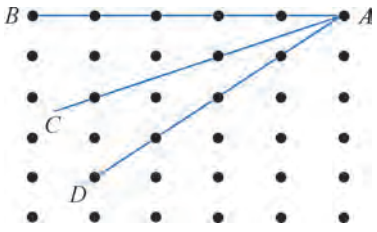
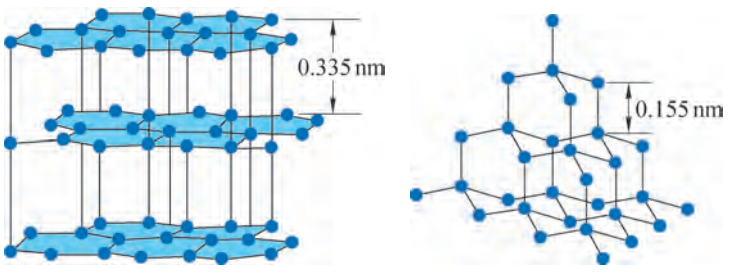


图 11–41 晶体各向异性的缘由

同种元素的原子可能组成不同的空间点阵，从而形成形状和性质都很不同的晶体，叫做同素异形体。例如，金刚石和石墨就是碳原子组成的同素异形体。如图 11–42 所示，石墨的空间点阵是层状结构，层与层之间距离较大，相互作用较弱，沿着这个方向很容易把石墨一层层剥下来，甚至制成单层石墨——石墨烯；金刚石中的碳原子形成四面体型结构，原子间距离较小，相互作用很强，所以金刚石的硬度很大。



（a）石墨晶体　　（b）金刚石晶体

图 11–42 石墨和金刚石的空间点阵

STSE

2004 年，英国曼彻斯特大学的盖姆（A. Geim，1958—　）和诺沃肖洛夫（K. Novoselov，1974—　）用一种特殊胶带从石墨上撕下了单层的石墨片——石墨烯，他们因此共同获得 2010 年诺贝尔物理学奖。石墨烯的原子排列如图 11–43 所示。

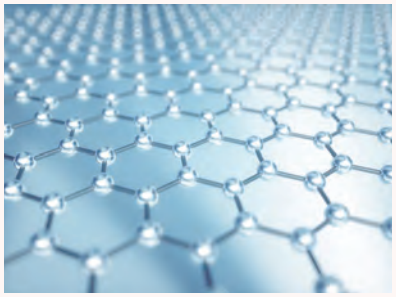


图 11–43　石墨烯的原子排列

石墨烯是目前已发现的最轻、最薄但强度最大、导电性能最好的物质，它的厚度仅相当于人类头发丝的十万分之一，强度却可以达到钢铁的 200 多倍。石墨烯可广泛应用在电池电极材料、半导体器件、透明显示屏等方面。石墨烯制成的晶体管在接近单个原子的尺度上依然能稳定地工作，并且可以达到极高的工作频率。图 11–44 所示的是以石墨烯为基础材料制成的柔性显示屏，它是未来移动设备显示屏的发展方向。另外，石墨烯在新能源电池行业也有着广泛的应用前景。

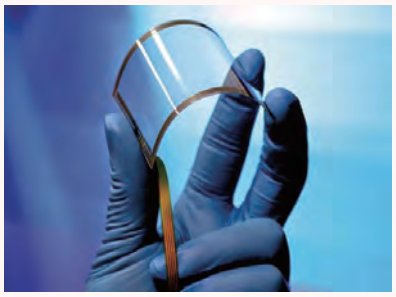


图 11–44　柔性显示屏

石墨烯的发现，开创了一个新的晶体类型——单分子层材料。单分子层材料可进一步组合形成新型复合材料，拓展了人类对于物质世界和微观世界的认识。

▶ 液晶

1888 年，奥地利科学家莱尼兹尔做实验时发现，将“安息香酸酯”晶体加热到 145.5℃时会熔化为浑浊的液体，继续加热到 178.5℃时又变得清澈透明了。后来，德国物理学家列曼把上述那种处于“中间地带”的浑浊液体叫做液晶。

液晶既像液体一样具有流动性和连续性，其分子又保持着固态晶体特有的规则排列方式，在光学上具有各向异性等晶体特有的物理性质。图 11–45 所示是固态、液晶态和液态分子排列的示意图，液晶态的分子排列方式介于固态和液态之间，所以也称为介晶态。

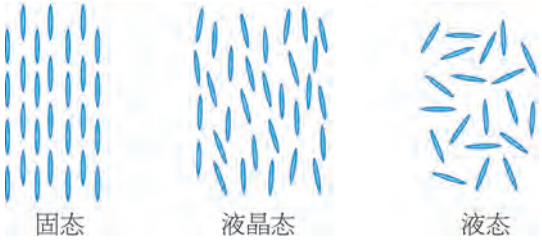


图 11–45　固态、液晶态和液态分子的排列示意图

不加电压时，液晶是透明的；加电压时，液晶不透明，光线不能通过。利用液晶的这一特性可制成各种显示元件。

在液晶中掺入少量多色性染料，染料分子与液晶分子结合，对液晶施加电场，电场强度不同时，液晶对不同颜色光的吸收强度不同，就能显示出各种颜色。彩色液晶显示器广泛地应用于电视机、计算机、大屏幕等的显示。与其他显示技术相比，液晶显示具有低电压、低功耗两大突出的优点。

目前，液晶已经广泛应用于电子工业、航空航天工业、生物、医学等众多领域，液晶的基础理论研究已成为凝聚态物理学的一个重要分支。液晶一定还有更广泛的应用，有待于今后进一步去研究开发。

问题与思考

1. 各向同性的材料一定是非晶体吗？举例说明。

2. 根据晶体、非晶体、多晶体的基本性质完成表 11–3。

表 11–3

晶体	非晶体	多晶体
有规则的几何外形		
	没有确定的熔点	
		物理性质各向同性

3. 某同学为了检验一块薄片是不是晶体，做了如下的实验。如图 11–46 所示，他以薄片中央 O 为原点，建立 xOy 平面直角坐标系，分别取 A（x_1，0）、B（0，y_1）两点，且 $x_1 = y_1$。在 A、B 两点各固定一个相同的温度传感器，将一个针状热源放在 O 点，观察并记录 A、B 两点的温度变化情况。通过实验，他发现 A、B 两点的温度变化情况完全相同，由此他得出结论：该薄片是非晶体。

是否可以由这样的过程得出上述结论？简述理由。

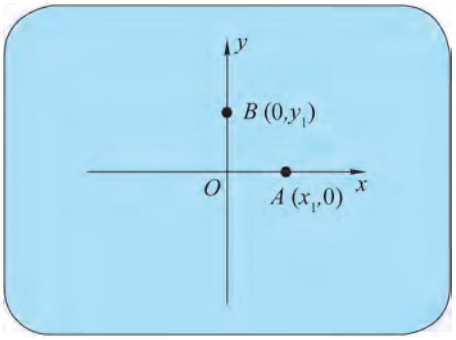


图 11–46

第六节　材料及其应用简介

人类历史经历了石器时代、青铜器时代、铁器时代等，这种对时代的划分以当时人类用来制作有用物件的主要材料作为标准。可见，材料是人类赖以生活和生产的物质基础。

▶ 新材料

作为高新技术的基础和先导，新材料技术同信息技术、生物技术一起成为 21 世纪最重要和最具发展潜力的领域。根据结构组成，新材料可以分为新型金属材料、新型无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料。

新型金属材料密度小、强度高，广泛地应用于航空航天行业。

新型无机非金属材料，包括工业陶瓷、化合物半导体等。工业陶瓷耐高温、耐腐蚀，化合物半导体则是重要的电子材料。

有机高分子材料包括塑料、橡胶和纤维。塑料强度高，种类多，可应用于机械、电子等工业。合成橡胶具有高弹性、耐磨、耐寒、耐热、耐油、高气密性等特点，用于制作密封件等。化学纤维强度高、耐磨、耐腐蚀、化学稳定性好，可用于化工、复合材料等。

复合材料具有单一材料所没有的优异性能。例如，利用树脂的易加工特性和陶瓷材料、纤维材料的高强度、高刚度、耐高温特性制作的树脂基复合材料，在航空航天、电子电气、化工等众多领域得到了广泛应用。

▶ 半导体

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体，如硅、锗、氧化亚铜、砷化镓等。当今许多电子产品的核心都是集成在毫米级硅芯片上的半导体器件。半导体有两种类型：N 型半导体和 P 型半导体。

以半导体硅为例，在硅的单晶体中，掺入少量的磷，磷原子和硅原子形成共价键后就多出了一个自由电子，能参与导电。这类半导体主要以自由电子参与导电，叫做 N 型半导体（也叫电子型半导体），如图 11−47 所示。如果在硅中掺入少量的硼，硼原子和硅原子形成共价键后就多出一个空位，叫做空穴。这个空穴很容易被附近的电子填补，而出现新的空穴。电子的这种填补运动，从效果上看相当于空穴向着反方向运动。空穴相当于一个带正电的粒子，能导电。这类半导体主要以空穴参与导电，叫做 P 型半导体（也叫空穴型半导体），如图 11−48 所示。

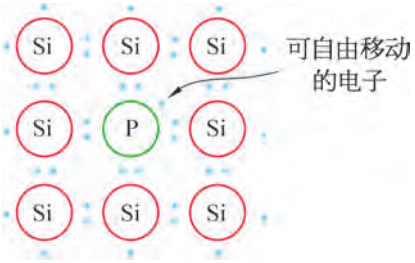


图 11–47 N 型半导体的共价键结构

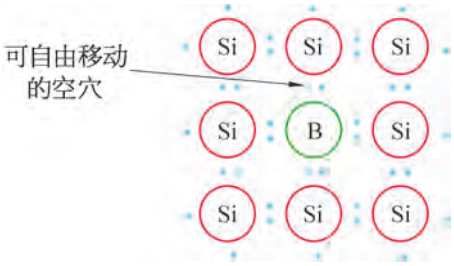


图 11–48 P 型半导体的共价键结构

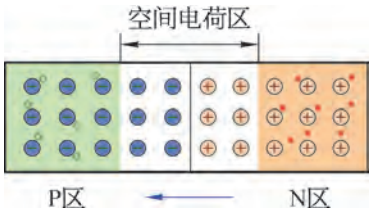


图 11–49 PN 结

如使 P 型半导体和 N 型半导体紧密接触，它们的交界处出现空穴和电子的浓度差。P 区内的空穴向 N 区扩散，N 区内的电子向 P 区扩散。扩散的结果使得 P 区失去空穴，留下带负电的离子；N 区失去电子，留下带正电的离子。由于物质结构的关系，这些离子不能自由移动，因此它们不参与导电，称为空间电荷。它们集中在 P 区和 N 区的交界面附近，形成一个很薄的空间电荷区，这就是所谓的 PN 结，如图 11–49 所示。空间电荷区存在电场，电场的方向由带正电的 N 区指向带负电的 P 区。这个电场是由电子和空穴的扩散运动形成的，称为内电场。内电场有阻碍扩散的作用。

在一个 PN 结上加上相应的电极引线并用管壳封装，便可组成一个晶体二极管。当二极管加正向电压，即 P 型区接电源正极时，二极管导通；当加上反向电压，即 N 型区接电源正极时，几乎没有电流产生，二极管截止。这就是晶体二极管的单向导电性。

早期的电子产品中，电阻器、电容器、电感器、二极管等电子元件都是一个个分别安装在印刷电路板上的，如图 11–50 所示。用这种方式做成的电子产品体积大，消耗电能多，并且容易出故障。后来，人们把一个电子电路的所有元件按电路要求制作在一小块半导体硅片上，这就是集成电路，也称作芯片。

现代集成电路技术目前已经可以把超过百亿个晶体管等电子元件的复杂电路制作在一枚硬币大小的芯片上（图 11–51）。

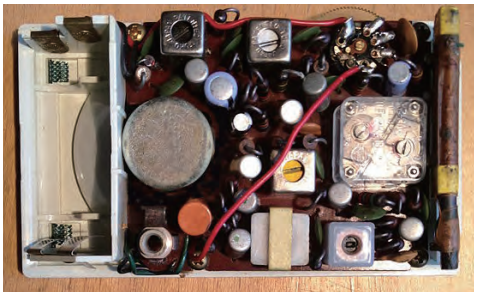


图 11–50 晶体管收音机的内部

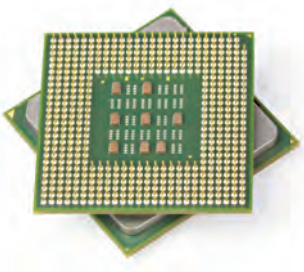


图 11–51 计算机主板的中央处理器（CPU）

半导体技术的发展，使人类成功地进入了微电子时代，这是科学和技术紧密结合发展的成果。

拓展视野

超导材料指低于特定温度（即临界温度）时会转变为零电阻状态的物质。除了零电阻效应外，超导材料的另一个基本特征是完全抗磁性（迈斯纳效应），处于超导态的物体完全排斥磁场，磁感线不能进入超导体内部。

传统超导材料一般在温度低于 30 K 时才会产生超导现象，因此需要使用液氦或制冷机才能维持超导态。20 世纪 80 年代发现的高温超导材料可以在 77 K 以上表现出超导性。2000 年以来，发现了硼化镁的超导性，其突出优势是易于加工。另外，铁基超导体的发现和研究也备受关注。

超导材料可以应用于需要大电流和强磁场的场合，如超导发电、输电、储能、超导磁浮列车等；也可以应用于需要小电流和弱磁场的场合，如利用超导隧道效应（约瑟夫森效应）制作超导量子干涉器、微波器件、超导计算机等。

▶ 纳米材料

可以观察到单个原子的“扫描隧道显微镜”于 1982 年发明以后，世界上便诞生了纳米科技——以尺度为 0.1~100 nm 的物体为研究对象的科学技术。纳米科技的最终目标是直接以原子和分子来构造具有特定功能的产品。

纳米材料的制备和研究是纳米科技的基础。纳米材料有很多种类，可分为金属、陶瓷、有机、无机以及复合纳米材料等。

纳米材料具有许多奇特性质，主要表现在材料的强度、韧性、比热容、电导率（电阻率的倒数）、对电磁波的吸收性，甚至熔点、颜色等都会发生出乎意料的变化。例如，任何金属颗粒的大小达到纳米数量级以后，都会呈现黑色，这种特性有利于将太阳能高效率地转化为内能；利用纳米技术制成的超细材料，其韧性、强度、硬度会大幅提高。纳米材料的这些性质，使其在能源、环保、通信、航空航天、医疗等方面有着极其广阔的应用前景。

STSE

20 世纪 70 年代，科学家发现荷叶表面有许多微米尺度的乳突，乳突上还有纳米尺度的结构（图 11−52）。这种复合结构是荷叶表面对水不浸润的根本原因。在这种结构上会牢牢附着一层空气，滚圆的水珠“浮”在上面，滚来滚去，绝不会对荷叶表面有任何浸润作用。当叶面倾斜到一定角度时，水珠会沿着叶面滑落并带走上面的污染物，达到自洁的效果。

模仿荷叶自洁的功能，可以应用表面纳米结构的技术开发出自洁、抗污的纳米涂

料。这项技术普及后，不会脏的地板、墙壁和不受灰尘影响的电子产品将会不断地出现，人类的生活也会更加方便、舒适。

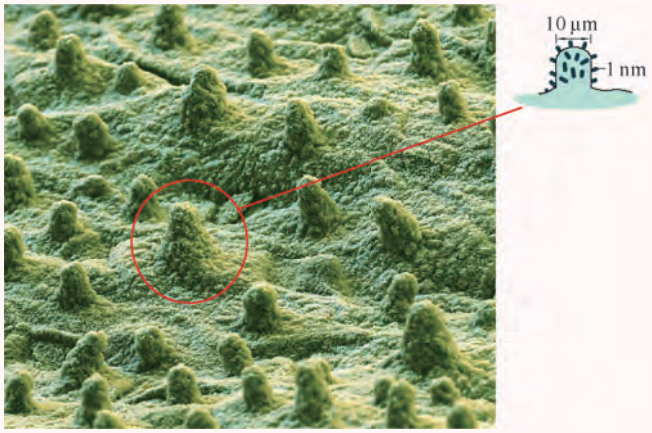


图 11–52 荷叶表面的放大结构

问题与思考

1. 有人说晶体熔化后便成为液晶，对不对？简述理由。
2. 如果把直径为 10 nm 的颗粒放在一个乒乓球上，相当于把多大的球放在地球上？
3. 在日常生活中随处可见半导体电子产品。能否举例说说半导体还有哪些应用？给人们生活带来哪些改变？
4. 纳米材料具有独特的性质，因此有着奇妙的用途。试设想一项纳米材料的应用。

小结

· 基本概念和基本规律

玻意耳定律：一定质量的气体在温度不变时，压强与体积成反比。

查理定律：一定质量的气体在体积不变时，压强与热力学温度成正比。

盖 · 吕萨克定律：一定质量的气体在压强不变时，体积与热力学温度成正比。

理想气体：一种理想化的物理模型，完全忽略气体分子自身体积大小和分子间相互作用力，在任何压强、任何温度下都遵循气体实验定律。

表面张力：使液体表面具有收缩趋势的作用力。

毛细现象：浸润液体在细管中上升和不浸润液体在细管中下降的现象。

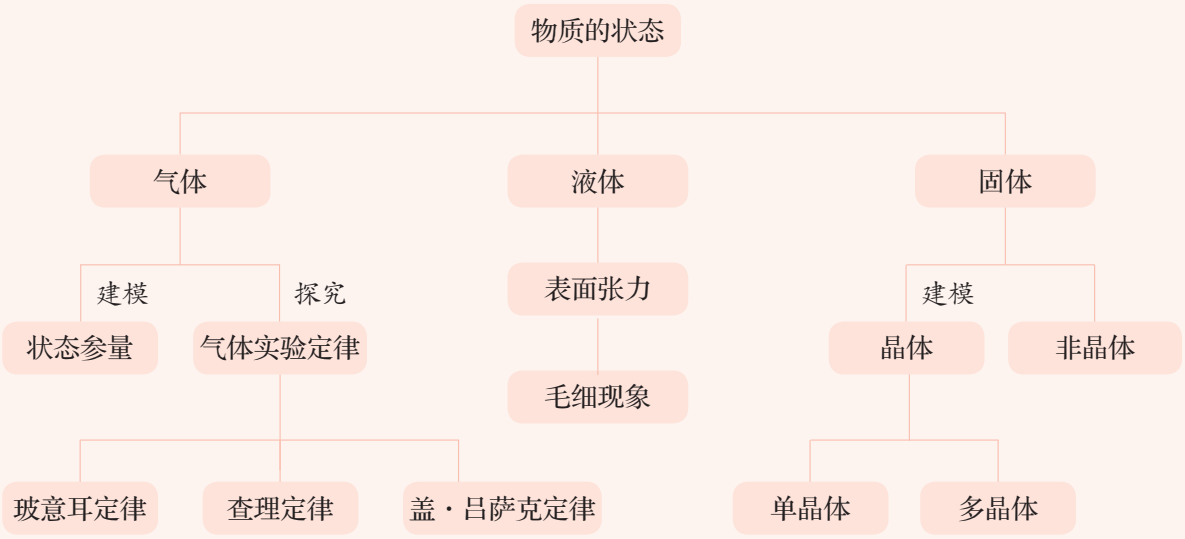
· 基本方法

通过建立气体状态参量的过程，感受类比联想的方法。

通过研究气体实验定律的过程，感受数据获取、分析和处理过程中的控制变量法、图像法。

通过理想气体模型、晶体空间点阵结构模型以及等温、等容等理想过程的学习，感受模型建构的方法。

· 知识结构图



复习与巩固

1. 判断下列哪些现象与液体表面张力有关。
   （1）雨滴几乎成球形。
   （2）肥皂泡的形成。
   （3）毛笔蘸水后，笔头聚拢。
   （4）船舶能漂浮在水面上。

2. 关于晶体和非晶体，判断下列说法是否正确，并简述理由。
   （1）铜可以制成各种粗细的铜丝，也可以制成各种形状的铜块，所以铜是非晶体。
   （2）雪花有规则的几何形状，所以是晶体；冰块没有规则的几何形状，所以是非晶体。
   （3）石英玻璃和天然水晶的化学成分都是二氧化硅，所以它们都是晶体。
   （4）石墨和金刚石都是由碳原子组成的，虽然结构不同，但都是晶体。

3. 一定质量的气体，当温度恒定时，压强随体积的减小而增大；当体积恒定时，压强随温度的升高而增大。从微观角度来分析这两种压强增大的过程的差异。

4. 中医上常用“拔火罐”来治疗某些疾病。将点燃的纸片放入一个小罐内，当纸片烧完时，迅速将火罐开口端紧压在皮肤上，火罐就会紧紧地被“吸”在皮肤上。简述这一现象的成因。

5. 如图 11–53 所示，一端封闭的玻璃管倒插在汞槽中，其上端封闭了少量空气。现保持温度不变，将玻璃管稍向上提起一段距离，判断管内空气柱长度 l、管内外汞面高度差 h 如何变化，并简述理由。

图 11–53

图 11–54

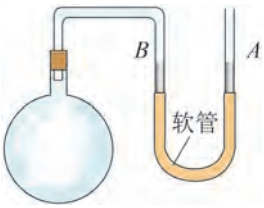


图 11–55

6. 如图 11–54 所示，质量为 m 的汽缸放在水平地面上，活塞连同手柄的质量为 m_0，活塞的截面积为 S，大气压强为 p_0，起初活塞静止在距离汽缸底部高为 h 的位置。现将活塞缓慢向上提，若不计摩擦和气体温度的变化，活塞向上提多少距离可以将汽缸提离地面。

7. 如图 11–55 所示，在烧瓶口插入细玻璃管，管的另一端与汞压强计相连，烧瓶中封闭着一定质量的气体，气压计 U 形管两臂内的汞面一样高。现将烧瓶浸入热水中，为保持气体的体积不变，应如何移动 A 管？为保持气体的压强不变，又该如何移动 A 管？

8. 估算标准状态下氢气中分子的体积占气体体积的百分比。若保持温度不变，将压强升至原来的 100 倍，估算此时气体中分子体积的占比。此时是否仍然能将气体视作理想气体？说明理由。

9. 在“探究等温情况下一定质量气体压强与体积的关系”的实验中，某同学利用实验中采集的数据，建立 V–$\frac{1}{p}$ 坐标系，获得了 V–$\frac{1}{p}$ 的函数图像及其函数表达式，结果如图 11–56 所示。他又收集了其他几个小组的实验数据，进行了同样的数据处理后，发现了一个共同的现象：图线都没有过坐标原点，并且都与 V 轴负半轴相交。

（1）分析实验图像不经过坐标原点的原因。

（2）根据上述分析，设计一个测量一颗绿豆体积的实验方案。

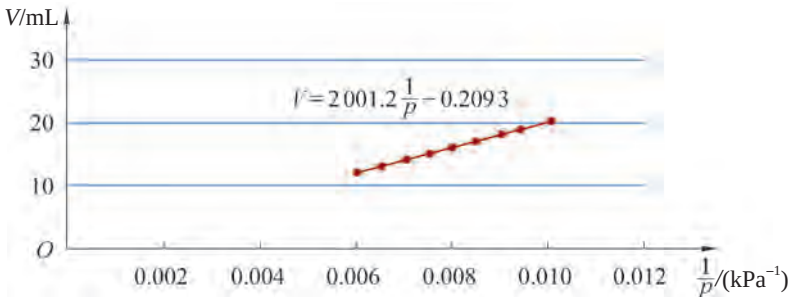


图 11–56

10. 17 世纪时伽利略曾设计过一个温度计，其结构如图 11–57 所示。一根几十厘米长、麦秆粗细的玻璃管，一端与一鸡蛋大小的玻璃泡相连，另一端竖直插在水槽中，并使玻璃管内吸入一段水柱。根据管中水柱高度的变化可测出相应的温度。根据以上信息回答下列问题。

（1）管中水柱的高度随着温度的升高如何变化？

（2）关于温度变化时玻璃泡内的气体经历的变化，甲同学认为可近似看作等容变化，乙同学认为应该近似地看作等压变化。评价这两种看法，并说明理由。

（3）这个温度计的设计有哪些不足之处？

图 11–57

第十二章

热力学定律

自然界各种运动形式都对应特定的能量，与分子热运动对应的能量称为内能。蒸汽机的制造、改进和应用大大促进了人类对内能改变方式和规律的探究。俗话说“覆水难收”，泼洒在地上的水不会自行回到杯中，自然界的许多过程都是不可逆的。人类通过大量类似实践，先后发现了系统内能变化过程的规律——热力学第一定律和自然界宏观过程方向性的规律——热力学第二定律。

在必修第三册中我们已经学习了能源和可持续发展，在本章中将知道热力学第一定律；了解热力学第一定律和能量守恒定律的发现过程；理解并运用能量守恒定律解释自然现象；了解热力学第二定律。通过人类发现热力学第一定律和能量守恒定律的史实，体会实践、挫折和失败对科学发现的意义以及人类探索真理的艰辛，进一步培养科学态度。在运用能量守恒定律和了解热力学第二定律的过程中，领悟守恒思想的价值，从能量转化的方向性认识能源开发、节能技术和新能源对人类生存的意义，完善对能量的认识，提升能量观念。热力学第一、第二定律也是讨论能源问题的重要理论基础。

第一节　物体的内能

人们对能量的认识和利用经历了漫长曲折的过程，蒸汽机是人类最早利用内能的机器之一。到 18 世纪 60 年代末，英国发明家瓦特改进了蒸汽机的结构，发明了效率更高、更为实用的蒸汽机（图 12–1）。高效率蒸汽机的广泛使用是第一次工业革命的重要标志，意味着人类进入了工业化时代。

蒸汽机将蒸汽的内能转化为机械能。内能宏观上是与状态有关的能量，微观上是分子热运动能量的总和。

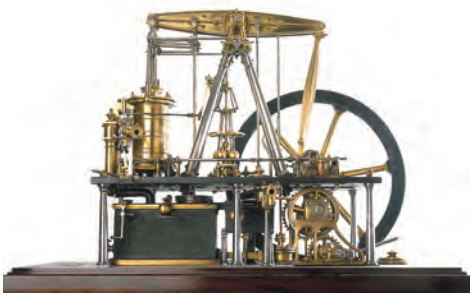


图 12–1　瓦特发明的高效率蒸汽机模型

▶ 物体的内能

自主活动

如图 12–2 所示，中间隔开的容器两侧分别盛有热水和冷水。由 P 型半导体和 N 型半导体连接而成的温差发电片与小电扇构成回路，在温差发电片两侧分别固定导热金属支架。将金属支架分别插入两侧的冷水和热水中，电扇就会不停地运转。

图 12–2　温差发电

小电扇为什么能运转呢？使它运转的能量来自哪里？

我们知道，物体是由大量分子组成的，分子在做永不停息的无规则运动。像一切运动着的物体一样，做热运动的分子也具有动能，这就是分子动能，表示为

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

式中 m 为分子的质量，v 为分子热运动的速率，E_k 为分子的动能。

单个分子的运动状态是随机的，但可以从统计的角度了解大量分子热运动的宏观表现。在研究热现象时，我们关心的是组成物体的所有分子动能的平均值，即

$$\overline{E_k} = \frac{1}{2} m\overline{v^2}$$

式中$\overline{v^2}$是所有分子速率平方的平均值，$\overline{E_k}$叫做**分子平均动能**。

温度越高分子热运动越剧烈，分子平均动能越大。因此，从分子动理论的观点来看，温度是物体分子热运动平均动能的量度。

做热运动的分子间存在相互作用力，这种作用力仅与分子间的距离有关。当分子间的距离发生变化时，分子间相互作用力会引起由分子间相对位置所决定的某种能量的变化，物理学中把这种能量称为**分子势能**。

分子间相互作用力与分子间距离的关系如图 12–3（a）所示，由图可知，分子间距离 $r = r_0$ 时，分子间相互作用力为零。

当 $r > r_0$ 时，分子间相互作用力表现为引力，这时增大 r 必须克服分子间引力做功，分子势能 E_p 随分子间距离 r 增大而增大。

反之，当 $r < r_0$ 时，分子间相互作用力表现为斥力，这时减小 r 必须克服分子间斥力做功，因此 E_p 随 r 减小而增大。

综上所述，当 $r = r_0$ 时，分子势能 E_p 最小。

如果取 r 为无穷大时 E_p 为零，则 E_p 随 r 的变化关系如图 12–3（b）所示。

物体的体积变化，意味着分子间距离发生变化，分子势能发生变化。因此，物体的分子势能与物体的体积有关。

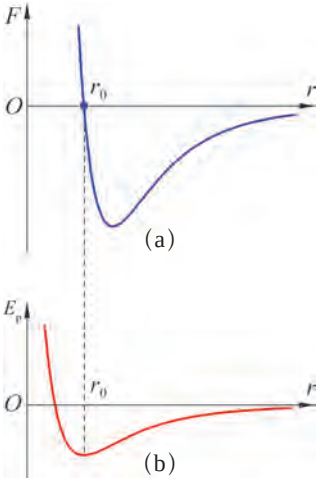


图 12–3 分子相互作用力和分子势能与分子间距离的关系

拓展视野

分子热运动中，分子势能部分会使分子趋于团聚，而分子动能会使分子趋于飞散。设分子平均动能为$\overline{E_k}$；分子最小势能的绝对值为 E_{pmin}。则：

①当$\overline{E_k} \gg E_{pmin}$ 时，物质分子将尽可能地充满能占据的空间，物质呈气态；

②当$\overline{E_k} \ll E_{pmin}$ 时，物质分子被束缚在尽可能小的空间，物质呈固态；

③当$\overline{E_k} \approx E_{pmin}$ 时，物质呈液态。

综上所述，物体是由大量分子组成的，物体内部所有分子热运动的动能和分子势能的总和，叫做物体的**内能（internal energy）**。内能常用字母 U 来表示。任何物体的分子都在做热运动，所以任何物体都具有内能。图 12–2 中的温差发电正是利用了水的内能。自然界中的地热现象表明地球蕴含着大量的内能。

▶ 物体内能的变化

大家谈

将一杯水加热至沸腾，从微观角度分析这杯水内能的变化。

在日常生活中，灼热的火炉可以使它周围物体的温度升高，内能增加；容器中的热水使放入其中的冰块熔化，并不断向外散热后逐渐冷却，内能减少。这类使物体内能改变的物理过程叫做热传递。

热传递并不是改变物体内能的唯一途径，双手相互摩擦，手掌会发热，锯木头时锯条和木头的温度会升高……在这些例子中，都包含克服摩擦力做功的过程，克服摩擦力做功也可使物体的内能增加。

18 世纪末至 19 世纪初，科学家通过摩擦生热的实验，把物体内能的变化与机械功联系起来。

自主活动

如图 12–4 所示，取少许干燥的硝化棉，用镊子把棉花拉得疏松一些，放入一个厚壁玻璃筒里。将活塞放入玻璃筒的上口，迅速地压下活塞。观察并解释玻璃筒内发生的现象。

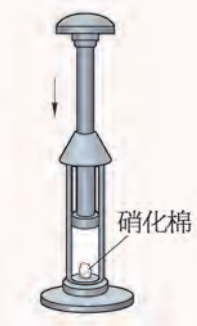


图 12–4　压缩气体做功，气体内能增加

从上述活动可以看到，通过压缩气体的方式对气体做功也可以改变气体的内能。

四冲程柴油机汽缸内的空气被活塞压缩，气体内能增加，温度升高，通过高压油泵喷入的雾状柴油立即被点燃，汽缸内形成高温高压气体。当高温高压气体膨胀对外做功时，气体内能转化为活塞的机械能，气体内能减少，温度下降。

由此可知，做功也是改变物体内能的重要途径。当外界对物体做功时，物体的内能增加；当物体对外界做功时，物体的内能减少。

大量事实表明，做功和热传递都可以改变物体的内能。要使一根铁丝温度升高，可以采用加热的方式，也可以用摩擦生热的方式。

做功过程中，其他形式的能（如机械能）转化为内能；热传递过程中，物体间或物体各部分间的内能相互转移。

拓展视野

历史上，为了解释热现象，物理学家曾提出“热动说”和“热质说”两种理论。

热动说认为热是粒子运动的表现，物体由于粒子的剧烈运动而发热。

热质说则认为热是一种被称为“热质”的流质，热质可以渗入一切物体，没有质量、不生不灭。一个物体是冷是热，取决于其中所含热质的多少。

在 18 世纪，热动说还缺乏足够的实验证据，而热质说却可以解释当时已发现的大部分热现象。1798 年英国人伦福德炮筒钻孔的实验表明，钻头与钢铁炮筒的摩擦似乎能产生取之不尽的热。除了把这些热看作“运动”之外，似乎很难再看作其他任何东西。热质说无法解释伦福德的实验。

直到 19 世纪 40 年代，英国物理学家焦耳才以定量的实验宣告了热动说的最终胜利。

问题与思考

1. 简要回答下列问题：
   （1）温度相同的物体内能一定相同吗？
   （2）分子平均动能和分子势能的大小分别与哪些因素有关？
   （3）为什么物体的内能与物体的温度和体积有关？

2. 简述下列例子中改变物体内能的方式。
   （1）在火炉上烧开一壶水。
   （2）汽车紧急刹车时轮胎发热。
   （3）柴油机的压缩冲程使汽缸内气体升温。

3. 你认为一条瀑布顶端与底端的水温存在差异吗？简述理由。

4. 请根据图 12–3 中的 F–r 图线和 E_p–r 图线分析说明在两个分子远离的过程中，分子力做功情况与分子势能、分子动能的变化情况。

5. 一架飞机在高空以某一速度飞行，有人说：由于飞机机舱内所有空气分子都有这一速度，所以分子具有动能；又由于所有空气分子均在高处，所以分子具有势能。所有分子的上述动能和势能的总和就是飞机机舱内空气的内能。这一说法是否正确？简述理由。

第二节　能量的转化与守恒

做功和热传递是改变物体内能的两条途径。那么，内能、功、热量三者之间的定量关系如何呢?

从 1840 年到 1879 年，英国物理学家焦耳在将近 40 年的时间里，通过摩擦生热、压缩空气以及电流的热效应等实验研究了功与热量的关系。

▶ 热力学第一定律

在焦耳的大量实验中，最著名的一个实验装置如图 12–5 所示。在与外界隔热良好的量热器里装有水。重物 P 与 P' 下落时，带动量热器中的叶片转动，由于摩擦而使水的温度升高。测出重物 P 与 P' 的质量以及它们下落的距离，可以计算出重力所做的功。另一方面，由水和量热器的质量、比热容、升高的温度可计算出增加的内能。

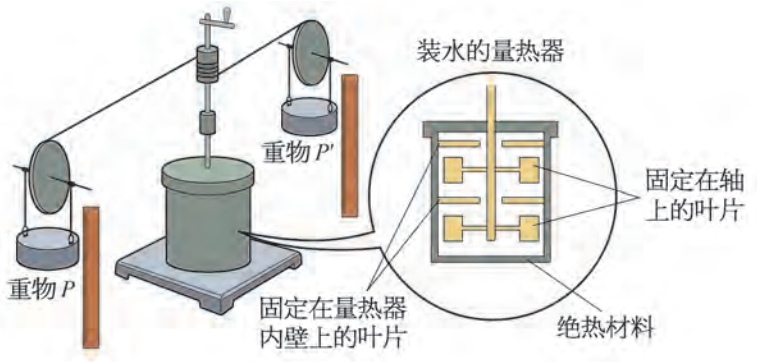


图 12–5　焦耳的实验装置

焦耳通过多次实验证明，重力对 P 与 P' 所做的功总等于水和容器组成的系统增加的内能。

在上述过程中，水和容器组成的系统只是通过外界做功与外界交换能量，它既不从外界吸热，也不向外界放热，这种过程叫做**绝热过程**。

以 U_1、U_2 分别表示系统的初、末状态的内能，$\Delta U = U_2 - U_1$ 表示系统内能的变化量，在绝热过程中系统内能的变化量ΔU 就等于外界对系统所做的功 W，即

$$\Delta U = W$$

一般而言，我们把研究对象称为系统，当系统与外界仅有热传递时，热量是系统内能变化的量度。当某系统从内能为 U_1 的初状态通过热传递到达内能为 U_2 的末状态，系统内能的变化量 ΔU 就等于外界向系统传递的热量 Q，即

$$\Delta U = Q$$

热量的概念只在涉及能量传递时才有意义。所以不能说物体具有多少热量，只能说物体吸收或放出了多少热量。

拓展视野

在国际单位制中，热量与功、能量的单位相同，都是焦耳（J）。不过，人们经常用“卡（cal）”作为热量的单位。焦耳用图 12−5 所示的实验装置测定 1 cal = 4.18 J，物理学中将 $J = 4.18$ J/cal 称为热功当量。事实上，测量热功当量正是当年焦耳实验研究的本意。

于是，在系统与外界同时发生做功和热传递的过程中，系统内能的变化量 ΔU 等于外界对系统所做的功 W 与系统从外界吸收的热量 Q 的代数和。这就是**热力学第一定律（first law of thermodynamics）**，用公式表示为

$$\Delta U = W + Q$$

通常，外界对系统做功时取 $W > 0$，系统对外界做功时取 $W < 0$；系统从外界吸收热量时取 $Q > 0$，系统向外界放出热量时取 $Q < 0$。

自主活动

外界对系统做了 2.8×10^5 J 的功，系统的内能增加 1.6×10^5 J，试分析系统吸放热的情况。

拓展视野

从微观角度而言，分子平均动能越大，物体的温度就越高。对于理想气体，分子间相互作用力忽略不计，分子势能为零。因此一定质量理想气体的内能仅取决于它的温度，温度升高，内能增加。由此可知，等温变化中，一定质量理想气体的内能保持不变。

根据热力学第一定律，在一定质量的气体等温膨胀过程中，气体对外界做功，同时从外界吸热；在气体的等温压缩过程中，外界对气体做功，同时气体向外界放热。

▶ 第一类永动机是不能制成的

17、18 世纪，人们曾期望设计一种永动机，这种机器不消耗任何能量，却能源源不断地对外做功，这类永动机称为第一类永动机。

在物理学中，若系统经历任意过程回到初始状态，即$\Delta U = 0$，称系统经历一个循环过程。根据热力学第一定律，若系统（机器）不断地对外做功，则必须从外界吸收热量。所以，既不消耗内能又不借助外界能量而不断对外做功是不可能的，即第一类永动机是不能实现的。因此，热力学第一定律也可以表述为“第一类永动机是不能制成的”。

图 12–6 所示是一个典型的第一类永动机设计方案。轮子中央有一个固定转轴，轮子边缘安装着 12 个可活动的短杆，每个短杆的外端装有铁球。方案设计者认为，在转动过程中右边球的重力与力臂的乘积要比左边球的重力与力臂的乘积大。这样，轮子就会永无休止地沿顺时针方向转动下去，并且带动机器转动。事实上，该永动机是不能制成的。

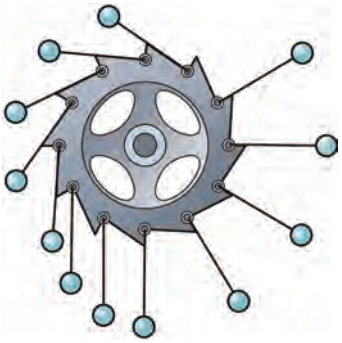


图 12–6　第一类永动机典型设计

仔细分析会发现，虽然右边每个球的重力与力臂的乘积大，但是球的个数少；左边每个球的重力与力臂的乘积虽然小，但是球的个数多。所以，轮子不会持续转动下去而对外做功，只能摆动几下便会停止。

大量事实证明，任何制造永动机的设想无论看上去多么巧妙，最终都是无法实现的。虽然制造永动机的梦想最终破灭，但是人们从研制永动机所经历的无数次失败和挫折中吸取了教训，从而进一步研究各种不同形式的能量的转化规律。

▶ 能量守恒定律

19 世纪中叶，焦耳利用图 12–5 所示的实验装置证明，消耗一定量的机械能，总会得到等量的内能，从而首先揭示了在机械能和内能转化的过程中，总能量是守恒的。不仅如此，焦耳还通过给电阻丝通电使隔热容器中水的温度升高的实验（图 12–7），进一步证明在电能和内能的转化过程中，总能量也是守恒的。

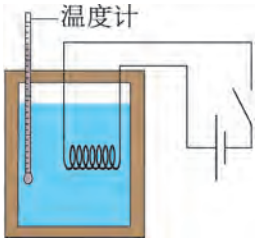


图 12–7　电流通过电阻使液体升温

大量事实证明：能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，它只能从一种形式转化为其他形式，或者从一个物体转移到其他物体，从物体的一部分转移到其他部分，在转化或转移的过程中，能量的总量保持不变。这就是**能量守恒定律（law of conservation of energy）**。热力学第一定律是能量守恒定律在热现象中的具体体现。

能量守恒定律的发现使人们认识到，任何机器或装置只能使能量从一种形式转化成其他形式，而不能无中生有地创造能量。这为人们开发和利用能源指明了方向。为了有效地利用能量，重要的是发现能量转化的新途径，提高能量的转化效率。

大家谈

根据图 12–8 中箭头标出的各种能量之间的转化，列举相应的实例。

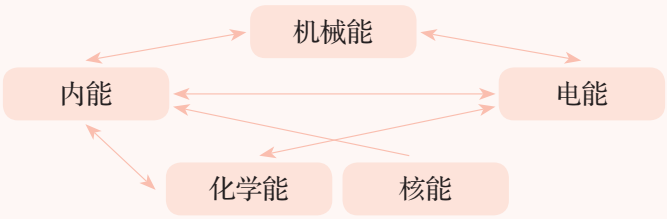


图 12–8 能量之间的转化

能量守恒定律是人类经过长期探索而确立的、普遍适用的基本规律。恩格斯曾经把这一定律称为“伟大的运动定律”，并认为它的发现是 19 世纪自然科学的三大发现之一。能量守恒定律把不同的自然科学技术领域联系了起来，成为人们认识自然、利用自然的有力武器。

拓展视野

19 世纪自然科学的三大发现分别是细胞学说、能量守恒定律和生物进化论。

能量守恒定律的建立是众多科学家研究的结果。1842 年，德国的青年医生迈耶写成了他的第一篇关于能量守恒定律的论文；1847 年，英国的焦耳、德国的亥姆霍兹分别发表了有关能量守恒定律的讲演或论文。不过，焦耳被认为是最先用实验确立能量守恒定律的人，但焦耳和亥姆霍兹也承认迈耶发现能量守恒定律的优先权。

问题与思考

1. 简要说明内能、热量和温度三个概念的区别及其相互联系。
2. 若使气体绝热膨胀，其内能将如何变化？若气体吸热并同时膨胀，其内能又将如何变化？
3. 一木块沿斜面匀速下滑。分析此过程中木块的能量转化情况。
4. 简述如何使物体在放热的同时保持温度不变。
5. 一名高中生喝了一罐 500 mL 的运动饮料，饮料罐上标有“100 mL 产生 110 kJ 的能量”的字样。假设通过运动可以完全消耗这部分能量，试估算他需要爬几层楼才能消耗此次摄入的能量。

第三节　能量转化的方向性

生活经验告诉我们，诸如热传递、摩擦生热等实际过程可以自发地朝某个方向进行，而它们的逆过程即使不违背能量守恒定律，也不能自发地进行。

大量事实表明，涉及热现象的自然过程都有方向性。这就是说，一切与热现象有关的宏观自然过程都是不可逆的。

▶ 热力学第二定律

大家谈

热传递过程具有方向性，热量只能自发从高温物体传递到低温物体，或从物体的高温部分传递到低温部分。分析此说法与电冰箱的工作过程是否矛盾？

电冰箱工作时，从冰箱内部（低温）吸取热量，向冰箱外部（高温）放出热量。在这个过程中，冰箱的压缩机消耗电能做功起到“热泵”的作用，就好似通过水泵做功可以将水从低处抽送到高处一样。这个过程是不能自发进行的。

1850 年，德国物理学家克劳修斯（R. Clausius，1822—1888）意识到，有必要在热力学第一定律之外建立另一条独立的定律，以反映自然界实际过程的方向性。在大量客观事实的基础上，克劳修斯提出：不可能把热量从低温物体传到高温物体，而不引起其他变化。

这一表述被称为“**热力学第二定律（second law of thermodynamics）的克劳修斯表述**”。克劳修斯表述意味着热量从低温物体转移到高温物体的过程必然引起其他变化，即过程伴随着其他能量的转化。电冰箱、空调的工作过程需要消耗电能就说明了这一点。

蒸汽机、内燃机等都是利用内能做功的机械，称为热机。人类长期致力于提高热机的效率，虽然取得一定成效，但始终存在一个无法突破的极限，这是为什么呢？

从能量的观点来看，热机工作过程中，热量从汽缸内的气体（高温热源）向汽缸外的空气（低温热源）自然流动，并在此过程中分出一部分能量推动活塞对外做功（图 12–9）。因此，热机工作时必须有一个温差。

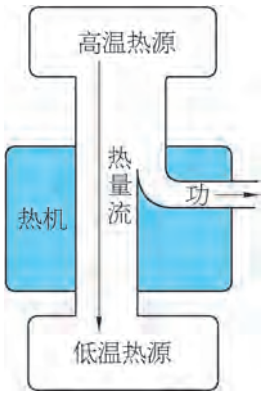


图 12–9　热机中的能量流动

所以，热机总是在两个温度不同的热源之间工作，热机工作时从高温热源取得热量的过程中必然有一部分热量流到低温热源，这部分热量“浪费了”。然而，这部分热量的浪费是必要的，是为了使另一部分热量转化为功而“必须付出的代价”。正是这一原因导致了热机的效率存在极限。

19 世纪，汽车工业刚起步的几十年中，发动机效率的提升是汽车制造技术的关键，当时比较先进的发动机的效率仅为 12%~14%。目前，大部分普通家用汽车发动机的效率在 30%~35% 之间。当今最先进的汽油发动机效率可以达到 41%。

1851 年，开尔文勋爵通过对热机工作过程中能量转化的分析指出：不可能从单一热源吸收热量并把它全部用来做功，而不引起其他变化。

这一表述常称为“**热力学第二定律的开尔文表述**”。这意味着机械能与内能的转化过程也存在着方向性。

拓展视野

从单一热源吸热使之完全变为有用功而不产生其他影响的热机称为第二类永动机。

历史上首个试制成型的第二类永动机装置是 1881 年美国人嘎姆吉为美国海军设计的零发动机，如图 12–10 所示。这一装置从海水中吸热使液氨汽化，推动机械运转。但是这一装置无法持续运转，因为汽化后的液氨在没有低温热源存在的条件下无法重新液化，因而不能完成循环。事实上，一切第二类永动机都是无法实现的，因此，开尔文表述也可以表示成“第二类永动机是不可能制成的”。

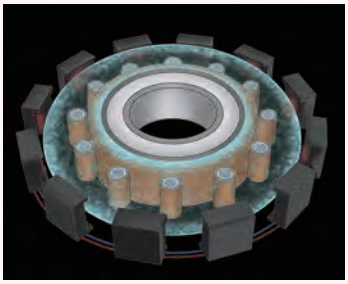


图 12–10 嘎姆吉的永动机

热力学第二定律是独立于热力学第一定律之外的又一基本定律。每一个与热现象有关的宏观实际过程必须同时满足热力学第一定律和热力学第二定律。

热力学第一、第二定律都是通过对宏观实际过程的观察、思考、分析得出的。自然界中的宏观过程都具有方向性，然而逆着这种方向的过程对于生产生活和科学实践也是非常重要的，人们可以通过做功的方式来实现这些逆过程。热力学第二定律的发现为人们更好地设计和利用这些逆过程、提高能源的使用效率提供了理论依据。

▶ 能量的耗散与退降

大家谈

克服摩擦力所做的功可以完全变成热量，热量能不能完全转化为功呢？

汽车行驶时，汽油在汽缸中燃烧，汽缸中高温气体的部分内能转化为驱动汽车行驶的机械能。同时，另一部分内能被汽车排气管排出的废气带走，这部分内能就很难再被利用了。

在宏观过程中，机械能可以完全转化为内能而不引起其他变化，但内能却不能完全转化为机械能而不引起其他变化。所以，从机械能转化为内能时能量退降。

19 世纪中叶，物理学家研究发现，自然界发生的各种变化中，能量的总值虽然保持不变，但是能量可被利用的价值却越来越小，即能量退降了。

能量退降是自然界中的宏观过程方向性的体现，是热力学第二定律的必然结果。能源被利用时，虽然能量不会减少，但能量退降了。煤炭、石油、天然气等能源被利用时，由于能量退降，可被利用的价值减少，所以我们要节约能源。

问题与思考

1. 有同学把热力学第二定律理解为“功可以全部转化为热量，但热量不能全部转化为功”，或“热量能从高温物体传到低温物体，但不能从低温物体传到高温物体”。这些理解对吗？为什么？

2. 根据热力学第二定律解释以下过程能否发生。
   （1）打开杯盖后，杯中的茶水会自动变得更热。
   （2）蒸汽机把蒸汽的内能全部转化成机械能。
   （3）空调通电后热量从温度较低的室内流向温度较高的室外。

3. 判断下列过程是否可逆。
   （1）密闭容器内有一隔板把容器均匀分为两半，一半充有气体，另一半被抽成真空。突然把隔板抽去，气体将均匀地充满整个容器。
   （2）将汽缸内的活塞缓慢拉开，使缸内气体体积增大一倍。

4. 把一个被压瘪的乒乓球浸入开水中即可重新鼓起来。这一过程中，乒乓球是否从单一热源吸热对外做功？这违反热力学第二定律吗？简述理由。

5. 判断以下关于利用海水内能做功的说法是否违反热力学第二定律，并简述理由。
   （1）将海水温度降低时放出的热量全部用来做功。
   （2）利用海洋中不同深度处海水温度的差异将海水的内能变成功。

学期活动

研究“饮水鸟”的原理并制作一个“饮水鸟”玩具。

图 12–11 所示为“饮水鸟”玩具。两玻璃球由细玻璃管相连，盛有一定量的高挥发性化学试剂的下球作为鸟身；上球连同尖嘴被吸水布包起来作为鸟头。整个装置架在支架上，可绕支点转动。在鸟的前方放一杯水，保证它俯下身子时尖嘴能接触水面“喝”到水。

图 12–11 饮水鸟

轻按鸟头，让它“喝”一口水，饮水鸟就会直立、抬头，并不断地自动点头喝水。

通过查阅资料，阐述“饮水鸟”玩具“喝”水过程所涉及的物理原理，撰写研究报告，并制作一个“饮水鸟”。

活动要求：

(1) 查阅相关资料，了解饮水鸟的工作原理。

(2) 收集器材，进行制作。

(3) 归纳总结，撰写研究报告。

(4) 以制作成品与研究报告的形式进行展示与交流。

小结

· 基本概念和基本规律

温度：物体分子热运动平均动能的量度。

内能：物体内部所有分子热运动的动能和分子势能的总和。

热力学第一定律：在系统与外界同时发生做功和热传递的过程中，系统内能的变化量ΔU等于外界对系统所做的功W与系统从外界吸收的热量Q的代数和，即$\Delta U = W+Q$。

能量守恒定律：能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，它只能从一种形式转化为其他形式，或者从一个物体转移到其他物体，从物体的一部分转移到其他部分，在转化或转移的过程中，能量的总量保持不变。

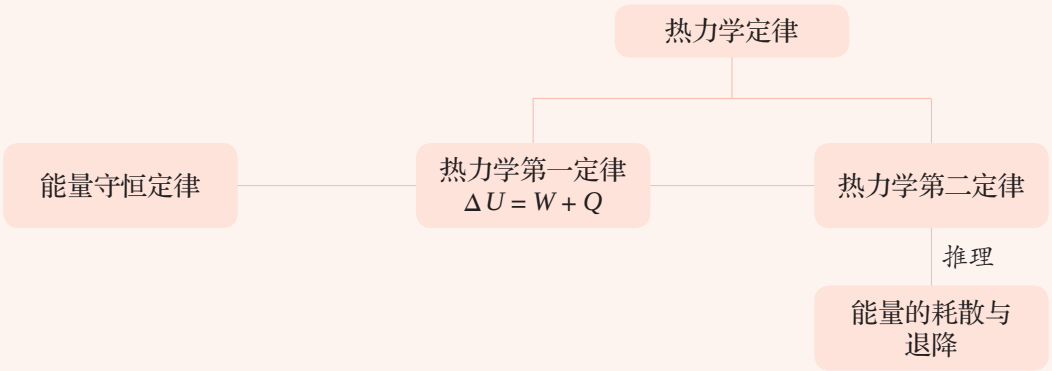
热力学第二定律的克劳修斯表述：不可能把热量从低温物体传到高温物体，而不引起其他变化。

热力学第二定律的开尔文表述：不可能从单一热源吸收热量并把它全部用来做功，而不引起其他变化。

· 基本方法

通过热力学定律、能量守恒定律、能量的耗散与退降的学习，体会能量守恒思想、能量转化方向性的规律，领悟从守恒与转化的角度分析问题的方法。

· 知识结构图



复习与巩固

1. 在日常生活中，有人将热量、内能、温度等不同物理概念一概称为“热”。指出以下用语中的“热”分别指哪个概念。
   (1) 摩擦生热；(2) 热水；(3) 热功当量。

2. 判断下列过程中改变物体内能的方式。
   (1) 用锯子锯木料时锯条温度升高。
   (2) 阳光照在物体上，物体温度升高。

3. 空气压缩机在一次压缩过程中，活塞对空气做功为 1.2×10^5 J，空气的内能增加了 8×10^4 J，求此过程中空气与外界交换的热量。

4. 冬季寒风呼啸，风大表示空气分子运动的速率大，寒冷表示空气的温度低，即表示空气分子的平均动能小。两者是否矛盾？简述理由。

5. 一同学说：给自行车轮胎打气时气筒变热，其原因是活塞与气筒壁摩擦产生的结果。此说法是否正确？简述理由。

6. 分析说明一定质量的理想气体经历下列过程后内能的变化情况。
   (1) 等压膨胀；(2) 绝热膨胀；(3) 吸热膨胀。

7. 有人认为热机工作过程中放出的热量完全是热机机件之间的摩擦所致。试对此作出判断并简述理由。

8. 一辆在高速公路上匀速行驶的汽车内部的能量流动如图 12–12 所示。
   (1) 分析汽车发动机的输出功率为多少，并说明理由。
   (2) 尝试提出一个关于汽车行驶时能量转化的问题，并作解释。

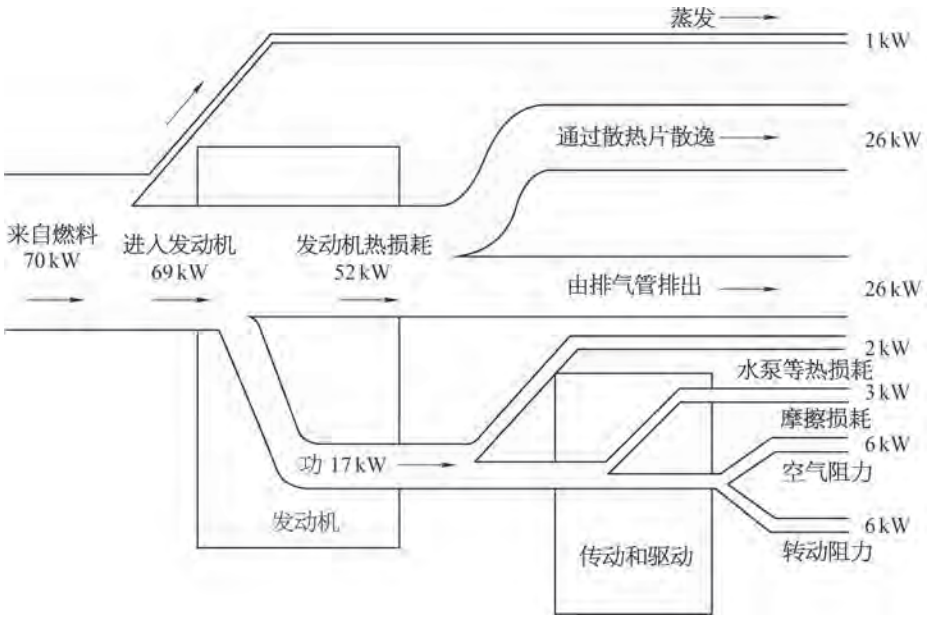


图 12–12

*9. 一定质量的理想气体做等温膨胀的 $p-V$ 图如图 12–13 所示，气体由状态 A 经状态 B 变化到状态 C，A 到 B、B 到 C 两过程气体的体积增加量相同。分析比较气体在经历两个过程中从外界吸热的情况。

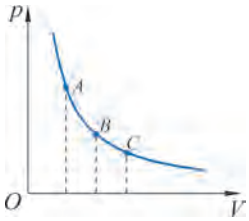


图 12–13

*10. 一定质量的理想气体，分别经过等压变化与等容变化过程升高相同温度。

（1）通过分析比较气体在上述两种过程中从外界吸收的热量。

（2）根据（1）的结果，你认为初中课程中关于物质比热容的概念应做怎样的修改或补充？

第十三章

原子结构

19、20 世纪之交，电子的发现揭开了人类探索物质微观结构的序幕，人们意识到原子并非组成物质的最小粒子。在探索原子结构的历程中，物理学家开创性地使用了许多新的实验设备和实验手段，对实验结果抽丝剥茧，提出了一些看似离经叛道的模型或假说，一步步地揭开了微观世界的神秘面纱。同时，原子的稳定性、原子光谱等一系列新问题与经典物理学理论之间产生了不可调和的矛盾，这恰恰预示着物理学正处于伟大革命的前夜。

在初中阶段我们已经学习了原子核式结构模型的基本知识，在选择性必修第二册中又学习了有关阴极射线、质谱仪和麦克斯韦电磁理论等内容。本章将在此基础上了解人类探索原子结构的历程，知道原子的核式结构模型；分析氢原子光谱并了解原子的能级结构。从电子的发现、α 粒子散射实验、玻尔理论的建立等物理学史实中，认识原子的结构，感受建立物理模型的科学思想方法，提升物质观念。通过对氢原子光谱的分析，加深能量的观念，培养科学证据意识，发展科学思维能力。本章内容是学习波粒二象性和原子核的基础。

第一节　电子的发现

英国化学家道尔顿（J. Dalton，1766—1844）秉承了古希腊哲学家德谟克里特（Dēmocritos，约前 460—约前 370）关于物质构成的观点，他在一系列实验的基础上于 1802 年首先提出：“气体、液体和固体都是由该物质的不可分割的原子组成的。”中国近代教育家、翻译家严复（1854—1921）曾借用儒家典籍中的“莫能破”一词作为原子的中文译名，简称“莫破”。

19 世纪上半叶，随着人类对电磁现象认识的深入和真空技术的发展，物理学家在研究真空放电现象的过程中发现了阴极射线。

将如图 13–1 所示的阴极射线管与高压直流电源连接，管内阴极发出的不可见射线会使涂有荧光物质的白色底板出现一条亮迹。这束从阴极射出的不可见射线便被称为阴极射线。

图 13–1　阴极射线演示装置

▶ 阴极射线的本质

阴极射线的发现引起许多物理学家的关注，他们纷纷通过实验探究阴极射线的本质。由于未能观察到阴极射线在静电场中的偏转，以德国物理学家 H. 赫兹和他的助手勒纳德（P. Lenard，1862—1947）为代表的一些学者认为，阴极射线是一种类似紫外线的波。而英国的一些物理学家却认为阴极射线是一种带电粒子流。法国物理学家佩兰（J. B. Perrin，1870—1942）在阴极射线实验中发现了负电荷，因此他也支持“带电粒子说”。

英国物理学家 J. J. 汤姆孙（图 13–2）认同阴极射线是带电粒子流的观点，他改进了佩兰的实验，利用磁场使阴极射线发生偏转，同时在实验中收集到更多电荷。他又认真思考了 H. 赫兹的实验，并加以改进，终于在实验中观察到阴极射线在静电场作用下的偏转。

图 13–2　J. J. 汤姆孙（J. J. Thomson，1856—1940）

自主活动

将条形磁体靠近阴极射线管，观察亮迹的变化，并分析原因。

至此，J. J. 汤姆孙已经可以确认阴极射线是一种带负电的粒子流。他通过进一步的实验确定了这种带电粒子的属性，拉开了人类认识原子结构的大幕。

▶ 电子的发现

阴极射线中带负电的粒子是什么？是原子还是分子？抑或是比原子或分子更小的某种物质微粒？为了回答这些问题，J. J. 汤姆孙成功地完成了三个更为精细的实验。他先后测定了阴极射线中带电粒子的比荷（带电粒子电荷量与质量的比）和电荷量大小，最终为这种粒子“验明正身”。

图 13–3 汤姆孙静电偏转管

J. J. 汤姆孙用了两种不同的方法测定了阴极射线中粒子的比荷，所得的结果相近。其中一种方法便是利用图 13–3 所示的汤姆孙静电偏转管，通过分析静电场和磁场对带电粒子的偏转作用获得粒子的比荷。

图 13–4 所示是实验的示意图。静电偏转管是经过改装的阴极射线管。将图中阴极 K 和阳极 A 与直流高压电源相连，阴极射线自 K 射出，并在 A、K 间加速。从 A 处狭缝射出的粒子束沿直线向右运动。C、D 是一对平行金属板，将 C、D 接到另一直流电源上，C、D 之间的电场对粒子束产生偏转作用。从 C、D 板右侧射出的粒子束沿直线射到偏转管最右端荧光屏上的 P 处。

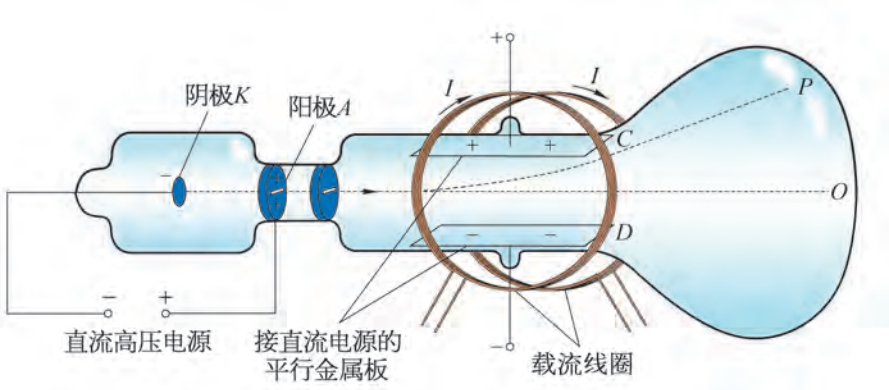


图 13–4 用静电偏转管测电子的比荷

在管外于 C、D 极板前后两侧加装载流线圈，线圈产生一个与 C、D 间匀强电场及粒子束运动方向均垂直的匀强磁场。调节线圈中的电流，使得粒子束在 C、D 间所受电场力与洛伦兹力平衡，粒子束便无偏转地沿直线射至荧光屏上 O 处。

在实验中，可测得 C、D 间偏转电场的电势差 U，载流线圈所产生的磁场的磁感应强度 B，平行金属板 C、D 的长度 l 以及间距 d，从偏转电场右边界直至 O、P 两处的粒子直线径迹间的夹角 θ。由这些数据便可推得粒子的比荷。

自主活动

根据以上对于实验的描述，推导阴极射线中带电粒子比荷的表达式。

J. J. 汤姆孙改变静电偏转管中的气体和阴极材料重复上述实验，所得到的比荷数量级都一致，即$\frac{e}{m}\approx10^{11}\ \mathrm{C/kg}$。阴极射线的比荷约为电解氢离子的比荷的 2 000 倍。J. J. 汤姆孙推测阴极射线中带负电的粒子比原子、分子小得多，且是原子的组成部分。

1898 年，J. J. 汤姆孙和他的学生们又用了几种不同的实验方法直接测到了这种粒子的电荷量大小，约为 $1.1\times10^{-19}\ \mathrm{C}$，与电解氢离子的电荷量大小相近。这有力地证明阴极射线中带负电的粒子的质量约为氢离子质量的$\frac{1}{2\,000}$。J. J. 汤姆孙将这种粒子称为**电子**（**electron**）。当代科学确认电子的电荷量的大小为 $1.60\times10^{-19}\ \mathrm{C}$，质量为 $9.11\times10^{-31}\ \mathrm{kg}$。

▶ 阴极射线的研究和电子的发现所具有的重要意义

19、20 世纪之交，许多物理学家投入到对阴极射线本质的研究工作中。关于阴极射线本质的争论持续了近 20 年，这一争论引发了一系列重大的物理学研究成果。除了电子的发现以外，X 射线的发现和放射性的发现都源自阴极射线的研究。

J. J. 汤姆孙的研究表明，相对于原子而言，电子是更基本的组成物质的粒子，它是原子的组成部分。

电子的发现打破了原子不可分的传统物质观，并催生了物理学崭新的研究领域——原子物理学。同时，电子的发现开辟了电子技术的新时代。J. J. 汤姆孙发现电子的过程也对人类的科学思想和物理学的研究方法产生了极为深远的影响。

问题与思考

1. 简述如何利用静电场或磁场判断阴极射线中粒子的电性。
2. J. J. 汤姆孙测定阴极射线中粒子比荷的实验结果为什么还不足以说明该粒子的质量约为氢离子质量的$\frac{1}{2\,000}$？
3. J. J. 汤姆孙仔细分析了 H. 赫兹利用静电场使阴极射线偏转的实验（实验中，外加静电场与射线管阴、阳极之间的静电场垂直），并做了一些改进，其中包括“减小射线管阴、阳极之间的电压”。请分析这一改进措施使阴极射线偏转程度变大的原因。

第二节 原子的核式结构模型

电子是原子的组成部分。我们知道，原子是中性的，而电子带负电，所以原子必定还有带正电的部分。

“原子中的正电荷是怎样分布的？”“原子中的正电荷与电子之间如何相互作用？”等问题，构成了所谓原子的结构问题。

19 世纪 80 年代初，光谱学已经取得了很大的发展，人们认识到发射光谱与光源的化学成分有密切的关系，似乎与电子的行为也有密切的关系。“光谱的成因是什么？”“怎样解释光谱的规律？”等问题都与原子的结构有关。

拓展视野

光谱学是研究各种物质光谱的产生及光与物质之间相互作用的学科。1666 年，牛顿通过三棱镜把太阳光展开成从红光到紫光的光谱，这是对光谱最早的研究。实用光谱学在 19 世纪 60 年代发展起来。光谱学可以用作化学分析。利用光谱学的方法，人们发现了几种当时还不为人知的元素，同时还证明了太阳内部存在多种已知的元素。

20 世纪初，物理学家根据已有的实验事实，通过提出假说、构建物理模型等方法模拟原子。比较具有代表性的原子模型是 J. J. 汤姆孙提出的“枣糕模型”。

▶ 原子的“枣糕模型”

在 J. J. 汤姆孙的“枣糕模型”中（图 13–5），原子被看成球体，正电荷均匀分布其中，电子则像枣糕里的枣子一样镶嵌在球内。“枣糕模型”可以解释化学元素周期律，但不能解释光谱现象。

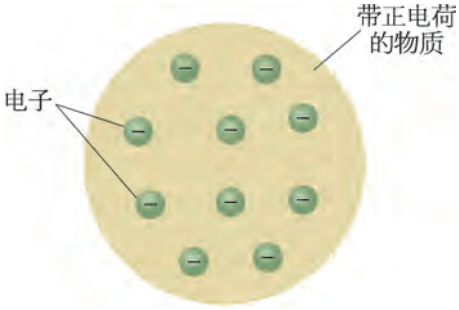


图 13–5 “枣糕模型”

为了研究原子内部电荷的分布情况，在 20 世纪的前十年里，一种新的叫做“散射实验”的手段被实验物理学家们广泛使用。散射实验利用当时已经发现的 X 射线、电子和 α 粒子轰击很薄的物质层，通过观察这些粒子穿过物质层后的偏转情况，获得原子结构

的信息。α 粒子就是氦离子，带有正电荷，所带电荷量的大小为电子电荷量大小的两倍，质量为电子质量的 7 300 倍左右。从某些放射性元素中放出的 α 粒子具有很大的动能，可以用来轰击原子。

▶ 原子的核式结构模型

1908 年，卢瑟福（图 13–6）指导他的助手用高速飞行的 α 粒子轰击厚度为 0.4 μm 的金箔，希望通过 α 粒子运动路径发生偏转的程度研究靶原子（金原子）的结构。这个实验被称为 α 粒子散射实验。

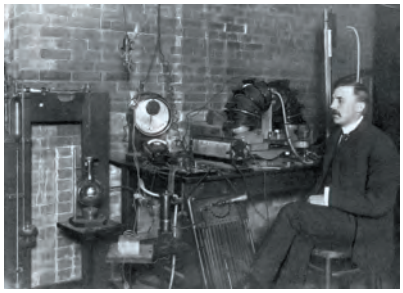
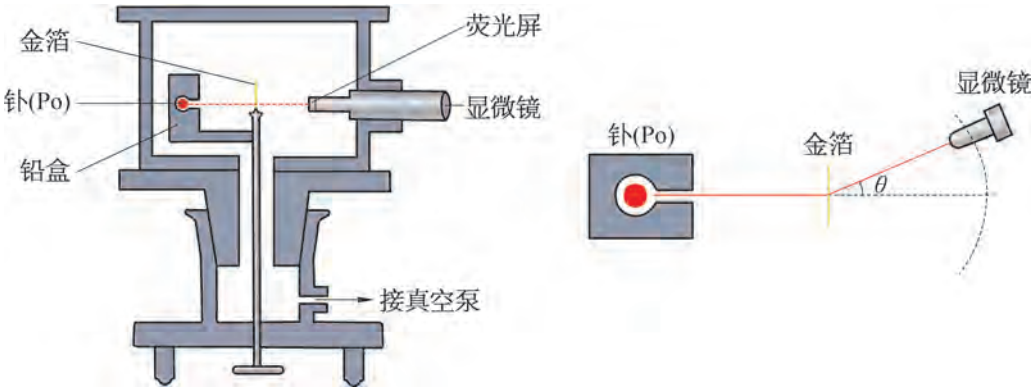


图 13–6　卢瑟福

图 13–7（a）所示为 α 粒子散射实验装置的剖面图。图中铅盒内的放射性元素钋（Po）所放出的 α 粒子由铅盒上的小孔射出，形成一束很细的粒子束打到金箔上。α 粒子束能穿过很薄的金箔打到荧光屏上，并产生闪光。这些闪光可以通过显微镜观察。

整个装置放在抽成真空的容器中。α 粒子穿越金箔前后运动方向之间的夹角 θ 称为散射角 [图 13–7（b）]。荧光屏和显微镜可一起绕金箔沿圆周转动，以便观察 α 粒子穿过金箔后散射角的变化情况。



（a）α 粒子散射实验装置剖面图　　（b）α 粒子散射角

图 13–7　α 粒子散射实验

α 粒子散射实验的结果表明，绝大多数 α 粒子穿过金箔后，散射角很小（平均为 2°~3°），几乎沿原方向前进。少数 α 粒子的散射角较大，极少数 α 粒子的散射角超过 90°，个别 α 粒子甚至被反弹回来。

α 粒子散射实验的结果无法用“枣糕模型”解释。因为 α 粒子穿过原子时，原子内部均匀分布的正电荷对它的斥力有相当大一部分互相抵消，而原子内的电子与 α 粒子的碰撞也不会使 α 粒子的运动方向发生明显的变化。根据“枣糕模型”的推算，α 粒子穿过金箔后的散射角不会超过 1°。

大家谈

为什么 α 粒子与电子的碰撞不会明显改变 α 粒子的运动方向？

α 粒子散射实验的结果令卢瑟福非常震惊！如果按“枣糕模型”理论，实验中观察到的个别 α 粒子被反弹回来的现象就像观察到“将一颗 15 英寸（约 0.38 m）的炮弹射向一张薄纸，炮弹会反弹回来打中你自己”一样。这怎么可能呢？

为此，卢瑟福用不同金属的箔片作为靶进行了多次实验，并进行了严谨的理论推导。1911 年，卢瑟福发表了原子的核式结构模型（图 13–8）：原子中心有一个很小的核，叫做原子核，原子的全部正电荷和几乎全部的质量都集中于原子核内，电子在核外空间绕核旋转。

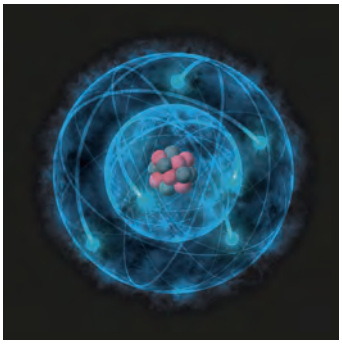


图 13–8 原子的核式结构模型

如图 13–9 所示，根据原子的核式结构模型，α 粒子穿过金属箔片的过程中受到金属原子核的库仑斥力。由于原子核相当小，大部分 α 粒子离原子核较远，受到的库仑斥力很弱，因而运动方向的改变就很小；只有当 α 粒子十分接近原子核时，才会受到很强的库仑斥力作用而发生大角度散射。原子的核式结构模型有些类似太阳系，原子核犹如太阳，电子犹如行星，所以也被称为原子的“行星模型”。

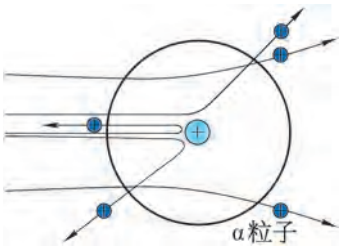


图 13–9 α 粒子的偏转

根据原子的核式结构模型，卢瑟福推出了 α 粒子散射公式，这样就可以分析各种元素的原子核对 α 粒子散射实验的数据，进而算出各种元素原子核的电荷量。当时利用这个方法，分别测得了碳、金、铝三种元素原子核的大致电荷量。这为深入理解元素周期律提供了重要的线索。

根据 α 粒子散射实验的数据，卢瑟福推算原子核直径的数量级为 10^{-15} m，约为原子直径的十万分之一。从这个意义上而言，原子的大部分是“空”的。

▶ 原子核式结构与经典理论之间的矛盾

在核式结构模型中，电子受原子核的库仑引力作用绕原子核旋转，因此这种运动必有加速度。根据经典理论，做加速运动的电荷将向外辐射电磁波。而这种电磁辐射将导致电子绕核运动的能量减少，从而使电子绕核运动的轨道半径减小，直至电子沿螺旋线落入原子核。计算表明，电子落入原子核的时间约为 10^{-9} s。照此看来，原子是不稳定的，但这显然与事实不符。

此外，根据经典理论，电子绕核运动所辐射的电磁波频率应该等于电子绕核运动的频

率。随着电子绕核运动轨道半径的连续减小，原子向外辐射的电磁波频率连续增大，原子发光的光谱（称为原子光谱）应该包含一系列连续变化的频率。事实上，原子光谱却是由一些不连续的亮线组成的。

核式结构模型与经典理论之间的尖锐矛盾使得卢瑟福的理论受到冷遇。1911 年，代表当时物理学最高学术水准的第一届索尔维会议（图 13–10）在比利时布鲁塞尔召开，包括爱因斯坦、居里夫人、洛伦兹和卢瑟福本人在内的 23 位卓越的物理学家参加了会议。但当时的会议记录中根本没有提及卢瑟福对原子结构的研究工作。不久以后，曾在卢瑟福实验室工作的丹麦物理学家玻尔（N. Bohr，1885—1962）运用创造性的假说拯救了卢瑟福的核式结构模型。现代物理学史表明：卢瑟福的方法和理论开辟了研究原子结构的正确途径，为原子物理学的发展做出了重要贡献。

图 13–10　第一届索尔维会议与会者合影

问题与思考

1. α 粒子穿越金箔时发生散射的原因是什么？
2. 原子的核式结构模型与“枣糕模型”的主要区别是什么？
3. 简述“枣糕模型”与 α 粒子散射实验之间的矛盾。
4. 按卢瑟福的原子核式结构模型可知，原子中绝大部分是空的，原子核显得非常小，其半径只有原子半径的约十万分之一。根据原子与原子核大小的比例，用宏观尺度下的两个物体进行类比。

第三节 玻尔的原子模型

图 13–11 玻尔

为了解决核式结构模型所遇到的困难，丹麦物理学家玻尔（图 13–11）根据量子概念对经典理论进行了修正。

在玻尔将量子学说引入原子结构的过程中，瑞士的中学数学教师巴尔末于 1885 年所给出的关于氢原子光谱中可见光波段波长的经验公式（巴尔末公式）起到了很重要的作用。

▶ 光谱

棱镜可以将复色光分解为一系列单色光，并且按波长的变化次序排列成一条光带，称为光谱。物体自身发光所形成的光谱称为发射光谱。

炽热的固体、液体以及高压气体的光谱包含一切波长的白光，这种光谱叫做连续光谱 [图 13–12（a）]。稀薄气体的光谱是由一系列不连续的亮线组成的，这种光谱叫做明线光谱，光谱中的亮线称为谱线。明线光谱是游离态的原子发射的。高温物体发出的白光，通过温度较低的物质蒸汽时，某些波长的光被该物质吸收后形成的光谱叫做吸收光谱。图 13–12（b）、（c）所示分别是钠原子的明线光谱和吸收光谱。

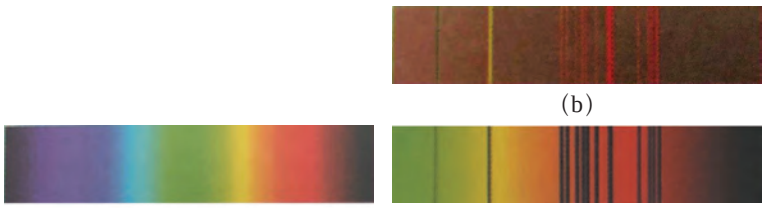


图 13–12 光谱

大家谈

分析图 13–12（b）、（c）中明线和暗线的关系，这种关系意味着什么？

人们通过大量的实验观察发现，原子的明线光谱和吸收光谱只取决于原子的内部结构，与温度、压强等外界条件无关。

STSE

原子的光谱可以被当作原子的“指纹”，因此可以用光谱分析的方法来鉴别物质的化学组成中是否含有某种原子。光谱分析不仅可以判定物质中原子的构成，还可以测定物质中各元素的含量。光谱分析极为灵敏，它的精确程度远高于化学分析的方法。随着光谱研究的发展，光谱分析已成为一个重要的科学研究手段。天文学家利用光谱分析知道了遥远天体的元素组成，发现天体光谱线的红移（即光谱线向长波端移动），根据光谱红移的大小可以推知天体的速度，这为宇宙大爆炸理论提供了重要而直接的证据。光谱分析的方法还广泛应用于医药、环境监测和食品安全监测等领域，作为现代科学应用中最为广泛技术之一的遥感技术也是基于光谱分析的原理。

▶ 氢原子光谱

在真空管中充入稀薄的氢气，将真空管两极接到 2~3 kV 的直流高压电源上，在电场的激发下，氢原子会发光。氢原子明线光谱的可见光波段内有四条谱线，它们的波长分别是 0.656 3 μm、0.486 1 μm、0.434 0 μm 和 0.410 1 μm。

巴尔末坚信这些谱线波长的数值理应服从某种规律，而且努力地探究这种规律。1885 年，他提出了这些谱线波长满足一个简单的经验公式

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

式中，λ 为谱线波长，$B = 364.56\ \text{nm}$ 是由实验测得的常量。

用上式算出的四条谱线与实验中测得的四条谱线波长符合得相当好。人们将上式称为巴尔末公式，将氢原子光谱的这一系列谱线叫做巴尔末系。

巴尔末公式尽管简洁，但只是一个经验公式。为什么会有这样的规律？物理学家对此感到困惑。

后来，人们又陆续在紫外区和红外区发现了氢原子的其他谱线系，并且这些谱线的波长也都满足与巴尔末公式类似的关系。若用波长倒数来表示的话，氢原子的光谱可以用广义巴尔末公式统一表示，即

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

式中的 R 叫做里德伯常量，其实验测量值为 $1.096\ 776 \times 10^7\ \text{m}^{-1}$。

1913 年 2 月，玻尔正沉浸在关于核式结构模型与经典理论之间矛盾的思考之中，他偶然从朋友处了解到已经问世近 30 年的巴尔末公式，这一际遇顿时使一个有准备的大脑觉悟到蕴藏在那简单数学形式之中的原子结构的“密码”。于是，新的原子结构模型假设诞生了！

拓展视野

利用广义巴尔末公式，氢原子各系列谱线波长经验公式分别是：

紫外区的赖曼系（$m=1$），$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{n^2}\right)$（$n=2$，3，4，…）；

可见光区的巴尔末系（$m=2$），$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right)$（$n=3$，4，5，…）；

近红外区的帕邢系（$m=3$），$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{3^2}-\frac{1}{n^2}\right)$（$n=4$，5，6，…）；

红外区的布喇开系（$m=4$），$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{4^2}-\frac{1}{n^2}\right)$（$n=5$，6，7，…）。

▶ 玻尔的原子模型

玻尔在卢瑟福原子核式结构模型的基础上引入了量子化概念，提出了自己的原子结构模型假设，为解释氢原子光谱提供了理论基础。这个理论就叫做**玻尔理论**。

玻尔理论的主要内容有以下三个方面：

（1）原子只能处在一系列不连续的能量状态中，在这些状态中原子是稳定的，电子绕原子核旋转，但并不向外辐射电磁波，这些状态叫做定态。

（2）原子的能量状态与电子绕核运动的轨道对应。由于原子的能量状态是不连续的，电子不能在任意轨道上绕核运动。电子的动量 mv 与轨道半径 r 满足 $mvr=n\frac{h}{2\pi}$，n 称为量子数，h 为普朗克常量，$h=6.64\times10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s}$。

（3）原子处在定态时的能量用 E_n 表示。当原子中的电子从量子数为 n 的轨道跃迁到量子数为 m 的轨道时（m、n 均为正整数），才发射或吸收一定频率的电磁波，电磁波的能量为

$$h\nu=|E_n-E_m|$$

式中，ν 为电磁波的频率。若 $n>m$，原子发射电磁波，反之，原子吸收电磁波。这一关系称为频率条件。

玻尔运用经典理论结合上述量子化假设，给出了氢原子核外电子所有可能的轨道半径以及电子在各条轨道上运动时氢原子的能量（电子绕核运动的动能以及电子与氢原子核间静电相互作用的电势能的代数和）。玻尔的计算结果是

$$\begin{cases} r_n=n^2r_1 \\ E_n=\dfrac{E_1}{n^2} \end{cases}\quad(n=1,\ 2,\ 3,\ \cdots)$$

式中，r_1 为核外电子第 1 条（离原子核最近的一条）可能的轨道半径，E_1 为电子在半径为 r_1 的轨道上运动时氢原子的能量；r_n、E_n 分别表示第 n 条可能的轨道半径和电子在半径为

r_n 的轨道上运动时氢原子的能量。

根据玻尔的计算，$r_1 = 5.3 \times 10^{-11}$ m，$E_1 = -13.6$ eV。

氢原子各个定态的能量，叫做氢原子的**能级（energy level）**，以上关于 E_n 的表达式就称为氢原子的能级公式。

自主活动

氢原子各能级的能量是不连续的，这称为能量的“量子化”。请根据图 13−13（a）、（b）中木箱重力势能取值的特点对能量的“连续性”和“量子化”进行比较（以地面为重力势能零势能面）。

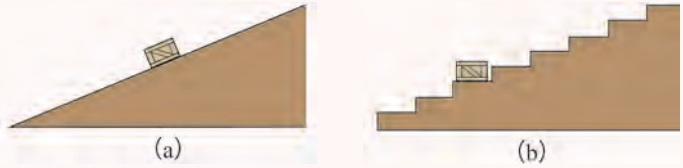


图 13–13　斜面和阶梯

在正常状态下，原子处于最低能级，这时电子在离原子核最近的轨道上运动。我们将最低能级（量子数 $n = 1$）对应的定态称为基态。当原子从外界吸收的电磁波能量符合玻尔理论中的频率条件时，原子从基态跃迁到能量较高的状态（$n > 1$），核外电子便相应地在离核更远的轨道上运动。能量高于基态能级的定态叫做激发态。原子从高能级激发态向低能级激发态或基态的跃迁过程是向外辐射电磁波的过程，这就形成了原子发光的现象。原子向外辐射的电磁波能量也一定满足频率条件，从而形成不连续的明线光谱。

大家谈

如果将图 13−14 中的台阶编号比作量子数 n，那么图中台阶的间隔可以比作什么？台阶间隔变化的含义是什么？

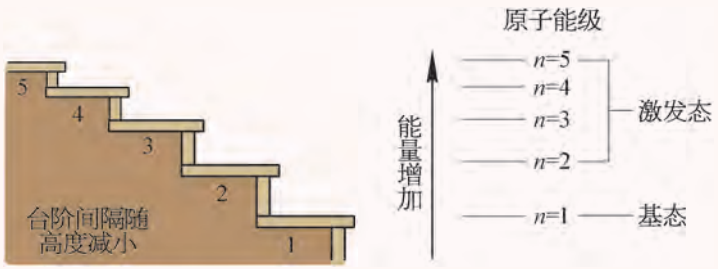


图 13–14　原子能级的“阶梯”

用一系列水平线表示原子的能级，按能级高低自下而上排列，使相邻水平线之间的距离与相应的能级差成正比。这样的一系列水平线便构成原子的能级图。图 13–15 为氢原子的能级图。水平线左端为相应能级对应的量子数 n，右端为原子处于该能级时的能量值（以 eV 为单位）。能级图中的水平线呈现“上密下疏”的分布特点。当量子数很大时，相应能级的水平线将很密集地“挤”在一起，这时原子一般已接近电离状态，而量子化能量也逐渐趋于连续。

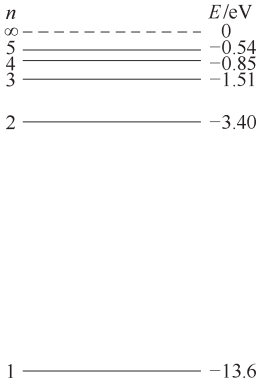


图 13–15 氢原子的能级图

▶ 玻尔理论对氢原子光谱的解释

玻尔解释了巴尔末系各条谱线的波长分布，获得了很大的成功。从玻尔理论的角度而言，巴尔末系中的谱线是氢原子由 $n > 2$ 的能量较高能级向 $n = 2$ 的能量较低能级跃迁时向外辐射的电磁波所形成的。

根据玻尔理论的频率条件，巴尔末系的谱线频率 ν 满足

$$h\nu = E_n - E_2 = -E_1\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad (n = 3，4，5，\cdots)$$

利用真空中电磁波波长、频率与波速的关系 $\nu = \dfrac{c}{\lambda}$，上式可改写成

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

此式与广义巴尔末公式的形式相同，且里德伯常量 $R = -\dfrac{E_1}{hc}$。将有关数据代入可得，$R = 1.097\,373 \times 10^7\ \mathrm{m}^{-1}$，与 R 的实验测量值符合得很好。不仅如此，玻尔还成功地预言了氢原子光谱在紫外区和红外区会有新的谱线。

玻尔理论发表的第二年，即 1914 年，德国物理学家弗兰克（J. Frank，1882—1964）和 G. 赫兹（G. Hertz，1887—1975）用电子轰击汞原子，成功地证明了原子内部的能量确实是“量子化”的。由于弗兰克和 G. 赫兹的研究方法与光谱的研究方法互相独立，因此弗兰克–赫兹实验的结果是玻尔理论极其重要的佐证。

▶ 玻尔理论的意义和局限

除了氢原子光谱以外，玻尔理论也能解释类氢离子（电离后，原子核外只剩一个电子的离子，如 He^+、Li^{2+}）的光谱，并且得到了多渠道的实验验证。

玻尔综合了前人的工作和量子学说，冲破了经典理论的束缚，建立了与原子结构有关的实验现象基本吻合的原子模型。从玻尔理论进行推演，电子电荷量、电子质量、普朗克常量和里德伯常量等物理学的基本常数之间取得了定量的协调。玻尔理论还成功地解释了

元素周期律。

尽管玻尔的原子模型取得了巨大的成功，但玻尔理论在解释简单程度仅次于氢原子的氦原子光谱时却无能为力。此外，玻尔原子模型也无法回答原子是否能从高能级向任意低能级跃迁等问题。

玻尔和其他物理学家在进一步研究之后发现，玻尔原子模型的缺陷在于依然将电子看成经典力学意义上的粒子，并且保留了过多的经典概念。

问题与思考

1. 简述玻尔理论。
2. 简述玻尔理论是如何解决原子的核式结构模型与经典理论之间矛盾的。
3. 氢原子的核外电子从一个轨道跃迁到另一轨道时向外辐射电磁波，电子绕核运动的动能以及电子与氢原子核间的电势能如何变化？
4. 氢原子处于基态时的能量为 $E_1 = -13.6\ \mathrm{eV}$。若用可见光照射基态氢原子，它能否从基态跃迁到 $n = 2$ 的激发态？

小结

· 基本概念和基本规律

电子：组成原子的基本粒子，电荷量大小为 1.60×10^{-19}C，质量为 9.11×10^{-31} kg。

原子的“枣糕模型”：原子被看成球体，正电荷均匀分布其中，电子则像枣糕里的枣子一样镶嵌在球内。

原子的核式结构模型：原子的全部正电荷和几乎全部的质量集中于原子核内，电子在核外空间绕核旋转。

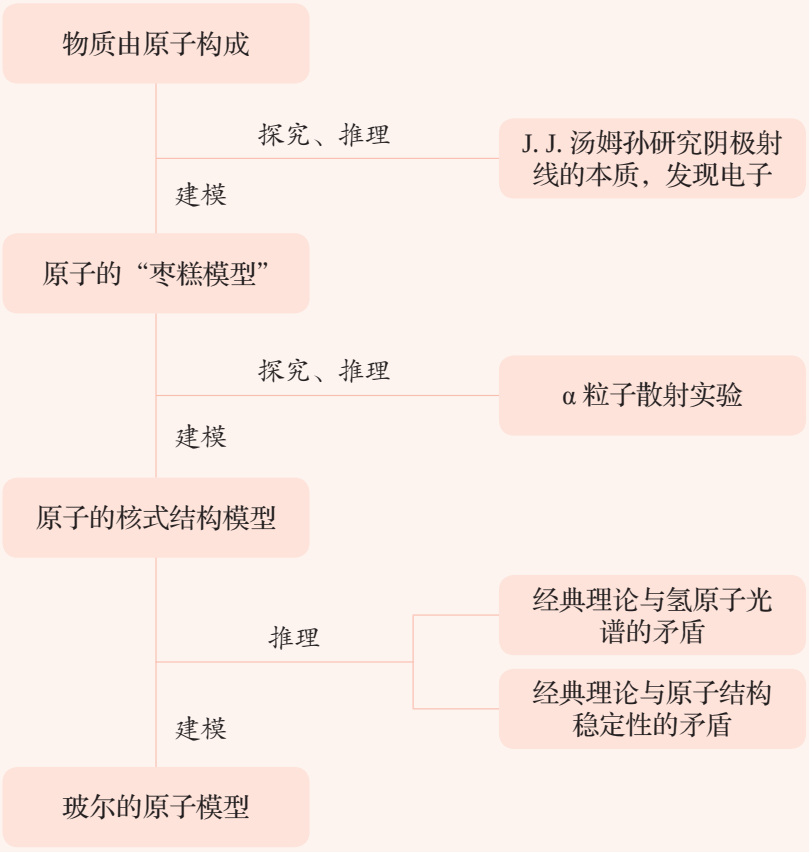
能级：原子各个定态的能量。

· 基本方法

通过原子的“枣糕模型”、原子的核式结构模型、玻尔原子模型建立过程的学习，感受模型建构的方法。

通过电子的发现、α 粒子散射实验、玻尔理论对原子稳定性和光谱解释的学习，感受利用证据通过科学推理进行科学论证的方法。

· 知识结构图



复习与巩固

1. 简述玻尔理论对氢原子光谱的解释。

2. 以表格形式列举“枣糕模型”、原子核式结构模型和玻尔原子模型的特点以及相关的证据。

3. 已知阴极射线管电极间的电压为 3 000 V，假设电子离开阴极表面时的初动能为 0，求电子到达阳极时的动能。

4. 如图 13–16（a）所示为 α 粒子散射实验模拟装置图，图（b）为“原子核模型仪”的正视图，图（c）为“原子核模型仪”的俯视图。为了使小钢球能平滑地从滑槽滚到原子核模型仪上，滑槽下端弧形应接近水平状态。调节滑槽相对“原子核模型仪”的方位，释放钢球，可以观察到钢球出射方向的差异。

   （1）简述装置中用来模拟 α 粒子和原子核半径的部分以及从该模拟实验中可以观察到的现象。

   （2）能否将“原子核模型仪”改成圆柱状？简述你的理由。

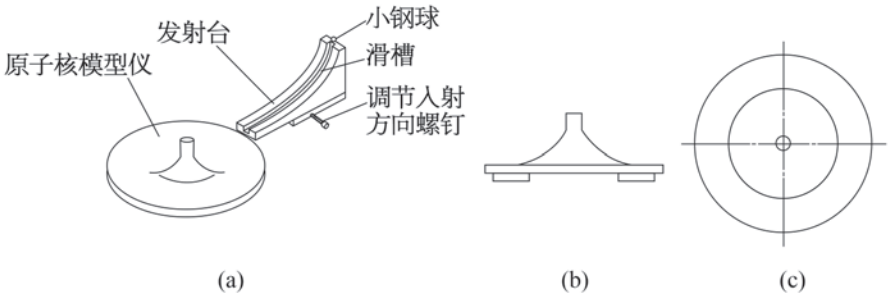


图 13–16

5. 已知氢原子从 $n=4$ 的激发态直接跃迁到 $n=2$ 的能级时发出蓝光。推测氢原子从 $n=5$ 的激发态直接跃迁到 $n=2$ 的能级时所发出的可见光的颜色，并简述理由。

6. 已知一定量氢原子处在量子数 $n=3$ 的激发态，分析说明它们发光光谱含有几种谱线。

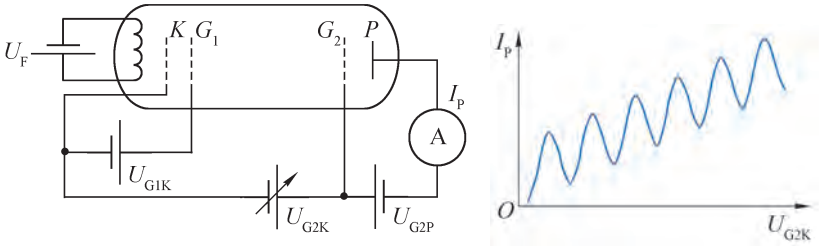
*7. 弗兰克 – 赫兹实验以独立于光谱实验的形式证实了原子的量子化能级。某同学查阅了弗兰克 – 赫兹实验的资料，内容如下：

弗兰克 – 赫兹实验原理如图 13–17（a）所示，玻璃管内充有汞蒸气（大量处于基态的汞原子，其能级分布与氢原子能级分布类似。通过与电子的非弹性碰撞，汞原子可以吸收电子的能量），加热阴极 K 附近的钨丝使其发射电子，在阴极 K 与栅极 G_2 之间的加速电压 U_{G2K} 作用下电子向栅极 G_2 加速移动同时获得动能 $E_k=eU_{G2K}$；因为栅极 G_2 与阴极 P 之间反向电压的作用，通过栅极 G_2 的电子必须拥有足够的动能才能够到达阴极 P 并产生电流 I_P。

加速电压 U_{G2K} 从零开始逐渐增大，当 $U_{G2K}<4.9$ V 时，随着电子动能 E_k 的增加，到达阴极 P 的电子增多，电流 I_P 单调递增。当 $U_{G2K}=4.9$ V、电子动能 $E_k=4.9$ eV 时，电流 I_P 骤降。继续增加电压 U_{G2K}，I_P 又开始平稳地增加，直到 $U_{G2K}=9.8$ V、$E_k=2\times4.9$ eV 时，

又观察到 I_P 骤降。总之，每当电子动能达到 4.9 eV 的整数倍时，都能观察到 I_P 的骤降。I_P–U_{G2K} 关系情况如图 13–17（b）所示。

分析判断当电子动能达到 4.9 eV 的整数倍时，电子的动能是被一个处于基态的汞原子完全吸收，还是多个汞原子分享但每个原子只吸收 4.9 eV。简述理由。



（a）基本原理图　　（b）I_P–U_{G2K} 曲线

图 13–17

第十四章

微观粒子的波粒二象性

19 世纪末，光的电磁说成功地解释了光的一系列波动现象，取得了巨大的成功。但是，光电效应现象的规律却与经典理论产生了严重的冲突。爱因斯坦大胆地借助量子论的观点，重提光的粒子性，从而圆满地解释了光电效应。同时，物理学家也发现了诸如电子等微观粒子的波动行为。近代物理学的研究表明，只有从波粒二象性出发，才能理解光和微观粒子的各种行为。

在选择性必修第一、二册中，我们已经学习了光的波动性和电磁波。在本章中将了解光电效应现象；知道光电效应方程及其意义；能说明光的波粒二象性；知道实物粒子的波动性；了解微观世界的量子化特征。在学习中，经历观察光电效应实验现象的过程，体会光的波粒二象性，进一步提升科学推理和科学论证的能力。通过对电子衍射实验的了解，理解实物粒子的波粒二象性，完善对物质和运动的认识。通过相关史实，感受物理学家实事求是、不迷信权威的科学精神，体会量子理论的建立对人类认识物质世界的深远影响。

第一节 光电效应 光子说

1887 年，H. 赫兹在研究电磁波的实验中偶然发现，当紫外线照射到电磁波接收器间隙的负电极上时，负电极更容易产生电火花。物理学家在运用经典理论解释该现象时，遇到了难以克服的困难。当时，谁也没有想到，对这个现象的进一步研究，使得人们对光的本性的认识又前进了一大步。

▶ 光电效应现象

用细砂纸打磨锌板，除去锌板表面氧化层。将锌板与验电器相连。先用带负电的橡胶棒接触锌板，使锌板带负电，此时验电器指针张开 [图 14–1（a）]。再用紫外线照射锌板，并观察验电器指针。指针张角的变化 [图 14–1（b）] 表明，锌板所带的负电荷减少。

（a） （b）

图 14–1 光电效应实验

上述实验表明，经紫外线照射的锌板释放了电子。

许多实验表明，有些金属（如钾、钠、锌等）即使在太阳光的照射下也会发射出电子。金属在光的照射下发射出电子的现象称为**光电效应（photoelectric effect）**，从金属表面逸出的电子叫做**光电子（photoelectron）**。

利用图 14–2 所示的装置可以研究光电效应所遵循的规律。图中 S 是抽成真空的容器，紫外线或可见光可以透过石英小窗 C（石英对紫外线的吸收很少）入射到容器内的金属板 K 上，板 K 的对面是另一块金属板 A，将板 A、K 分别与电源的正、负极相连。用频率、强度一定的光照射板 K，电流表指针发生偏转，这表明板 K 逸出的光电子向板 A 做定向移动形成电流，这种电流称为光电流。

当板 A 的电势高于板 K 的电势时，A、K 之间的电势差 U 称为正向电压。移动滑动变阻器的滑片，即可调节 U 并观察到光电流随正向电压增大而增大。当正向电压增加到一定大小时，光电流达到饱和值（最大值）I_m，不再变化。

光电子从板 K 逸出时具有初动能。即使没有正向电压的加速作用，初动能较大的光电子也可以到达板 A。将图 14–2 中的电源反接，这时板 A 的电势低于板 K 的电势，A、K 之间的电势差 U 称为反向电压。移动滑动变阻器的滑片，当电流表的示数刚好减为零时，意味着在从金属板 K 逸出的光电子中，即便具有最大初动能 E_{km} 的光电子也不能到达板 A。此时的反向电压值称为反向遏止电压 U_c。

用频率一定、强度不同的两束单色光 a、b（入射光 a 的强度较大）分别进行实验，电流表与电压表示数的关系大致如图 14–3 所示。

换用不同金属材料极板，还可以研究光电子最大初动能与极板材料之间的关系。

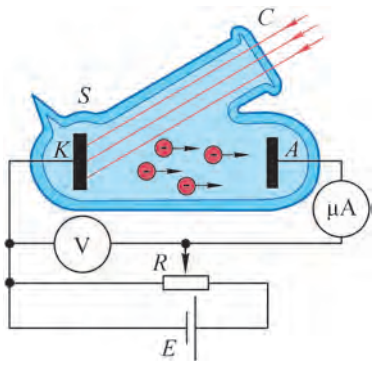


图 14–2　研究光电效应

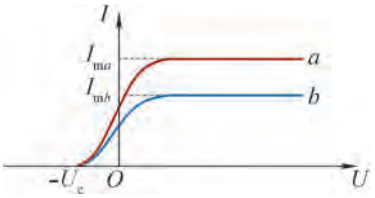


图 14–3　光电流和电压的关系

大家谈

如何根据 I_m、U_c 求出单位时间内从板 K 逸出的光电子数和光电子的最大初动能？若研究逸出光电子最大初动能与板 K 材料之间的关系，需控制哪些变量？

▶ 光电效应的实验规律

实验表明，光电效应遵循以下规律：

（1）对于某种金属，入射光的频率必须大于某一频率才能产生光电效应；低于这一频率时，无论入射光强度多大，照射时间多长，都不能产生光电效应。这个频率称为截止频率。不同金属的截止频率不同，如表 14–1 所示。

表 14–1　几种金属材料的截止频率

金属	铯	钠	锌	银	铂
ν_0/Hz	4.545×10^{14}	6×10^{14}	8.065×10^{14}	1.153×10^{15}	1.529×10^{15}

（2）当入射光频率高于截止频率时，单位时间内从金属表面逸出的光电子数与入射光的强度成正比。

（3）当入射光频率高于截止频率时，光电子的最大初动能与入射光的强度无关，只随入射光频率的增大而增大。

（4）当入射光频率高于截止频率时，几乎在光入射金属表面的同时即有光电子逸出。

▶ 光电效应实验规律与经典理论之间的矛盾

19 世纪末，光的电磁理论成功地解释了光的一系列波动现象，取得了巨大的成功。但是，光电效应的实验规律却与经典理论产生了剧烈的冲突。

按照光的电磁理论，光的能量由光的强度决定，而光的强度又由电磁波的振幅决定，与频率无关。那么，只要入射光的强度足够大或照射时间足够长，就可以积蓄足够多的能量产生光电效应。因此，经典理论无法解释金属材料的截止频率，也无法解释光电子的最大初动能为何与入射光的强度无关。此外，根据经典波动理论计算，光照射金属表面需较长的时间才会有光电子逸出。这也不能解释光电效应的实验规律。

当时，还有一个问题也使经典物理学处境维艰。我们知道，所有物体在受热后都会向外辐射电磁波，这种辐射被称为热辐射。19 世纪末 20 世纪初，科学家在用经典理论解释热辐射问题时也遇到困难，经典理论因此受到严峻的挑战。

德国物理学家普朗克（图 14–4）自 1897 年开始研究热辐射问题，获得了与实验结果符合得很好的热辐射公式。1900 年 12 月，普朗克在德国物理学会上作报告，提出了著名的能量子假说。普朗克假设电磁波是由一份一份的“能量子”组成的，每一份的能量是 $h\nu$，ν 为电磁波的频率。

当时名不见经传的专利局技术员爱因斯坦明确地意识到，普朗克的发现标志了物理学的新纪元。爱因斯坦发展了普朗克的能量子假说，提出了光子说，很好地解释了光电效应现象。

图 14–4 普朗克（M. Planck，1858—1947）与爱因斯坦（右）

▶ 光子说

爱因斯坦假设光也是由一份一份能量子组成的，这些能量子后来被称为**光子（photon）**，一个光子的能量 $E = h\nu$，ν 为光的频率。光射到金属上时，一个光子的能量可以被金属中的某个电子完全吸收。电子吸收光子的能量后动能增加，若向金属表面运动就可能逸出。逸出过程中，电子需要克服金属原子实对它的吸引而做功，从而使电子的动能减少，犹如做竖直上抛运动的物体克服重力做功，动能减少。因此只有动能足够大的电子才能逸出成为光电子。

电子从金属表面逸出时的动能称为光电子的初动能，电子克服金属对它的束缚所做功的最小值称为**逸出功**（**work function**）。逸出功是由金属的材料决定的。根据能量守恒定律，光电子的最大初动能 E_{km} 与入射光子的能量 $h\nu$ 和逸出功 W 之间的关系是

$$E_{km} = h\nu - W$$

上式称为光电效应方程，运用光电效应方程可以解释光电效应的规律。

如图 14–5 所示为光电效应示意图，金属内的电子（图中层叠的绿色小球）位于一个“能量阱”中。电子离开“阱”口的距离代表它向金属表面运动并最终逸出过程中必须克服金属对它的束缚做功所损失的动能。“阱”中最上层与“阱口”的竖直距离就代表逸出功。一个入射光子的能量可能会被“阱”中的一个电子完全吸收。电子吸收了入射光子的能量后转化为自身的动能，有的向金属表面运动，有的向金属内部运动而无法逸出。向金属表面运动的电子，原先在“阱”中的深度不同，在逸出途中损失的动能也不同。只有原先能量处于“阱”中最上层的电子直接越出“阱”口才具有最大初动能。

助一臂

假说·按照预先设定，根据已知的科学事实和科学原理，通过对数据的详细分类、归纳分析，对自然现象及其规律提出推测和说明，并得到一个暂时的但是可以被接受的解释。物理学发展的过程中出现过许多假说，例如“安培分子电流假说”等。任何一种科学理论在未得到进一步的实验确证之前都表现为假说。

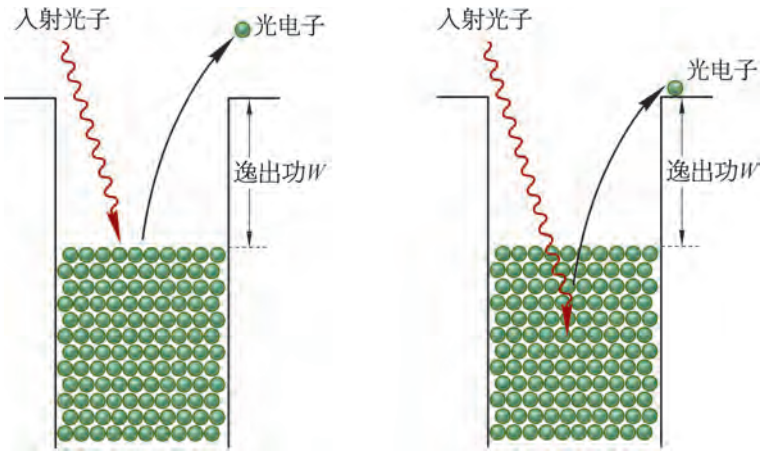


图 14–5　光电效应示意图（电子在图中位置的高低代表电子能量的大小）

对于一定的金属而言，逸出功的值是确定的，所以入射光子的频率越高，光电子的最大初动能就越大。若入射光子的频率较低，电子获得的能量小于逸出功，即使再多的光子都无法使“阱”中最上层的电子越出“阱”口（不产生光电效应），这就是光电效应规律中截止频率的由来。截止频率 ν_0 可表示为

$$h\nu_0 = W，\text{即 } \nu_0 = \frac{W}{h}$$

不同金属的逸出功不同，所以它们的截止频率也不同。入射光频率大于截止频率时，

入射光强度越大，单位时间内射到金属表面的光子数越多，金属材料中更多电子有机会获得能量逸出金属表面。所以，入射光强度越大，产生的光电子越多，光电流饱和值越大。

爱因斯坦的光子说和光电效应方程简洁明了，与已有的实验事实相符。但是这个假说在当时看来实在太“前卫”了，它包含能量量子化的概念，重提光的粒子性。包括普朗克在内的许多物理学家都将光子说看成奇谈怪论。

STSE

除了在建立光子说的过程中扮演了具有历史意义的角色以外，光电效应还具有许多实际的应用价值。如图 14–6 所示，影片后期录音时，利用特殊设备将声音的变化以宽窄不同的条纹记录在电影胶片边缘的音轨上。放映时，强度不变的窄光束通过音轨时，由于音轨上条纹的宽窄变化，通过音轨进入光电管的光的强度也做相应变化。这样，光电管产生的光电流也随之变化，经过电流放大后再通过喇叭将声音放送出来。图 14–7 所示则是广泛用于报警器、自动门等设备中的开关控制电路，当照射光电材料的入射光的强度发生变化时，电路中的电流发生变化，从而改变电磁铁的磁性强弱，实现对开关的吸放效果。

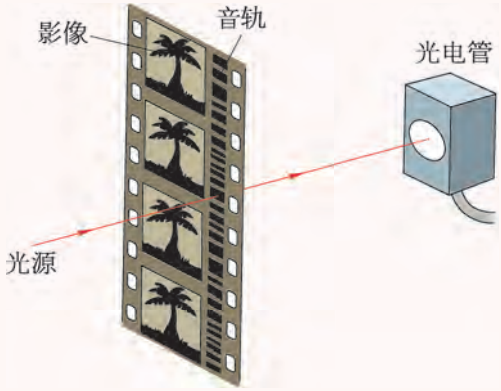


图 14–6 电影胶片

目前，在实际应用中，光电管已普遍被称为光电二极管的半导体器件所代替。在光电二极管中，光子的能量可以使束缚电子释放，进而改变半导体材料的导电能力，并最终改变通过光电二极管的电流。

图 14–7 开关控制电路

▶ 光电效应方程的实验验证

美国物理学家密立根也对光子说抱有极大的怀疑，他决心通过实验来批驳爱因斯坦的假说。

密立根历时十载，仔细地研究了不同金属在各种频率单色光照射下反向遏止电压 U_c

与入射光频率 ν 之间的关系，从而得到了十分精确的实验结果，如图 14–8 所示。

实验结果表明，U_c 与 ν 之间成严格的线性关系。密立根并由此测得普朗克常量，通过与热辐射等实验中测得的数值进行比较，却发现结果一致。由此，爱因斯坦的光电效应方程反而得到了实验验证。

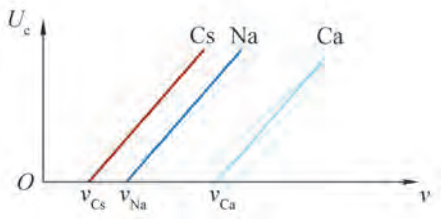


图 14–8　反向遏止电压 U_c 与入射光频率 ν 的关系

大家谈

为什么图 14–8 中三条直线彼此平行？如何由图线求出普朗克常量？

普朗克常量是量子化的量度，普朗克常量的精确测定是一项重要的物理学基础研究工作。1921 年，我国物理学家叶企孙（图 14–9）与合作者利用 X 射线测定普朗克常量的值。叶企孙改进了测量技术，获得精确程度更高的普朗克常量测量值，$h = 6.556 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$。叶企孙的测量结果是当时的最佳数据，这一数据在物理学界沿用达十余年之久。现在，科学界公认的普朗克常量是 $6.626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$。

密立根的实验结果违背了他的初衷，但是在事实面前，密立根反过来宣布爱因斯坦光电效应方程完全正确。这种实事求是的科学态度值得后人学习。

图 14–9　叶企孙（1898—1977）

问题与思考

1. 金属钨的逸出功为 4.52 eV，则其截止频率是多少？用频率介于 3.9×10^{14}~7.5×10^{14} Hz 的可见光照射钨，是否会发生光电效应？

2. 用甲、乙、丙三种不同的单色光照射同一光电管，得到了如图 14–10 所示的三条光电流与电压之间的关系图线。分析比较三种情况下入射光频率、光电子最大初动能和饱和光电流之间的关系。

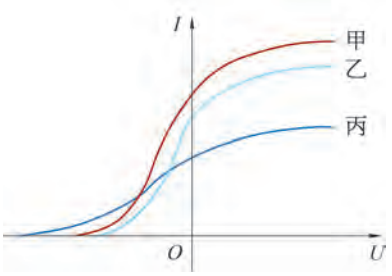


图 14–10

3. 在图 14–2 所示的实验中，为什么光电流不能一直随正向电压增大而增大？光电流达到饱和值后，怎样才能使光电流继续增大？

4. 若一个电子可以同时吸收多个光子的能量，简述光电效应现象会发生怎样的变化。

第二节 波粒二象性

光的干涉、衍射、偏振等现象表明光具有波动性。但 20 世纪初，对光电效应的深入研究又促使人们重新审视光乃至实物粒子的本性问题。

任何重要的物理规律都必须得到至少两种相对独立的实验方法的验证。尽管爱因斯坦的光电效应方程已经得到密立根实验强有力的支持，但要使人们真正接受光子说，还需要新的实验佐证。

▶ 康普顿效应

1923 年，美国物理学家康普顿（图 14–11）在研究 X 射线与物质的散射实验时，证实 X 射线具有粒子性。

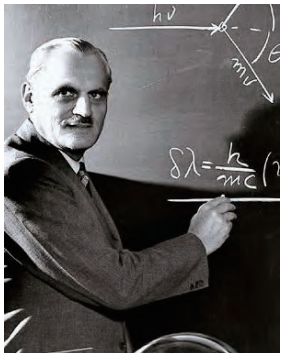


图 14–11 康普顿（A. H. Compton，1892—1962）

图 14–12 吴有训（1897—1977）

经典理论表明，可见光经物质散射时，光的传播方向发生变化，而光的频率与散射前相比保持不变。但康普顿和他的中国学生吴有训（图 14–12）发现，X 射线经石墨散射后沿不同方向的射线中，除波长不变的射线外，还产生了波长随散射角增大而增大的 X 射线，这种现象被称为康普顿效应。

康普顿接受爱因斯坦的观点，认为 X 射线是具有一定能量和动量的光子组成的，并用能量守恒定律和动量守恒定律对康普顿效应的实验结果做出了令人信服的解释。康普顿效应进一步证实了电磁波的粒子性，为爱因斯坦的光子说提供了更完整的证据。此后，光子说被人们普遍接受。

▶ 光的波粒二象性

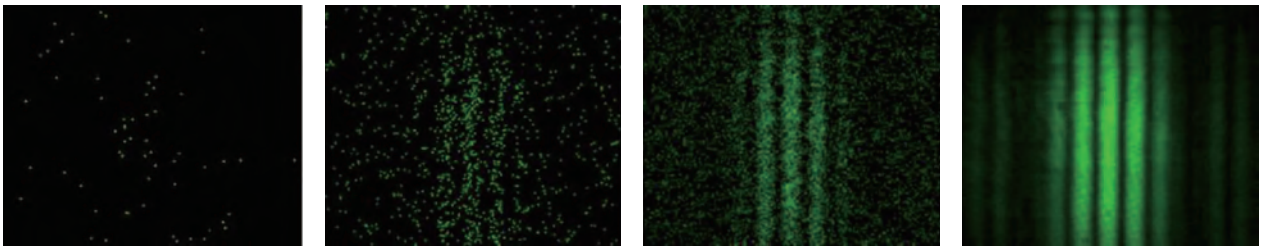
人类对光的本性的认识经历了曲折的、螺旋式上升的过程。近代对于光的研究表明，只能从**波粒二象性（wave-particle duality）**出发，才能理解光的各种行为。就是说，光既有波动性，又有粒子性。

光子具有能量，一个光子的能量 $E = h\nu$，而频率 ν 就表示波动的特征。光子除了有能量外，也具有动量，光子的动量大小为

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

这样，代表波动性的频率 ν 和波长 λ 通过普朗克常量 h 分别与代表粒子性的能量 E 和动量 p 联系起来，普朗克常量 h 成为粒子性和波动性之间的桥梁。

如图 14–13 所示的单光子的双缝干涉实验现象显示了光的波粒二象性。实验中，激光光源的强度被调节得很弱，以至于每次只有一个光子通过双缝装置。光子射到双缝后的荧光屏上产生的闪光光点由相机拍摄下来。



（a）单帧　（b）200 帧叠加　（c）1 000 帧叠加　（d）50 000 帧叠加

图 14–13　光子逐个通过双缝后的干涉图样

照片上的每个光点代表一个光子到达，反映了光的粒子性。图样显示，当相机拍摄帧数较少时 [图 14–13（a）、(b)]，照片上的光点数少，意味着通过双缝的光子数也少。可以看到，这时荧光屏上闪光点的分布是杂乱的。光点分布的无规则性反映了单个光子的运动与宏观尺度下质点的运动不同，它们没有确定的轨道，所以通过双缝后的光子在荧光屏上的落点是随机的。当相机拍摄帧数较多时 [图 14–13（c）、(d)]，照片上的光点数很多，意味着通过双缝的光子数很多。可以看到，这时荧光屏上出现了规则的双缝干涉条纹，这是波动性的表现，从而体现了光的波粒二象性。

大家谈

怎样用概率来解释双缝干涉所形成的明暗条纹？

▶ 实物粒子的波动性

既然电磁波具有粒子的属性，那么根据对称性的思想，实物粒子是否也具有波动的属性呢？

法国物理学家德布罗意（图 14–14）于 1923 年 9 月至 10 月，连续发表了三篇关于波和量子的论文。1924 年，德布罗意向巴黎大学提交了博士学位论文——《量子理论的研究》。在这些论文中，他提出所有实物粒子都具有波粒二象性的假说，并利用狭义相对论

和量子理论导出了实物粒子波长 λ 与动量 p 之间的关系——德布罗意波长公式

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

德布罗意还指出，通过电子被晶体衍射的实验，可能观察到电子的波动性。他认为，一切运动的微观粒子的波长和动量都满足德布罗意波长公式，人们将这种波称为物质波。

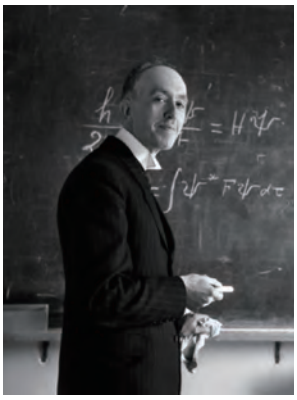


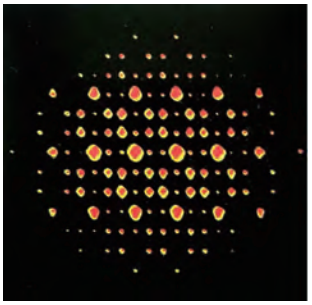
图 14–14 德布罗意
（L. de Broglie，1892—1987）

自主活动

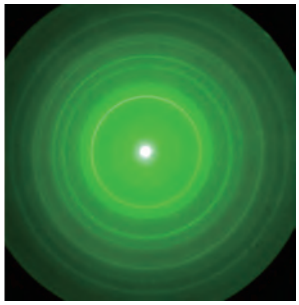
电子电荷量大小为 1.60×10^{-19} C，质量为 9.1×10^{-31} kg。利用实物粒子波长与动量的关系计算静止电子经 200 V 电压加速后的波长。

▶ 电子的衍射实验

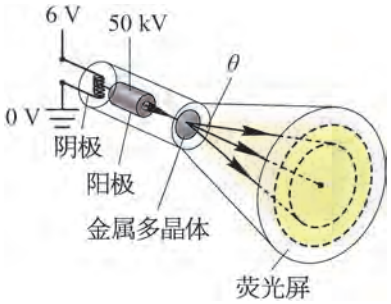
1925 年，美国物理学家戴维孙（C. Davisson，1881—1958）和他的助手第一次在实验中观察到能量为几十电子伏的电子经镍单晶体衍射的图样 [图 14–15（a）]。1927 年，英国物理学家 G. P. 汤姆孙（G. P. Thomson，1892—1975）和他的同事利用如图 14–15（c）所示的装置，通过阴极和阳极之间几万伏的高电压，对灯丝发热后发射出来的电子加速，得到这些电子经金属多晶体衍射的图样 [图 14–15（b）]。



（a）电子经单晶体衍射的图样



（b）电子经多晶体衍射的图样



（c）G. P. 汤姆孙电子衍射装置示意图

图 14–15 电子衍射

STSE

根据物质波的波长公式，我们只要将电子经过适当的加速，就可以使它的波长达到 10^{-10} m 数量级，和固体中原子间距离相近。这时，就可以用电子的衍射现象来研究金属中原子的排列方式以及类似 DNA 等复杂分子的结构（图 14–16）。

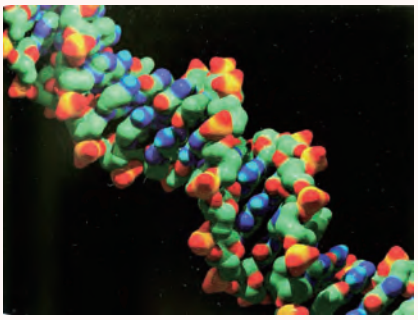


图 14–16　根据电子衍射实验推演的 DNA 大分子结构示意图

电子的衍射现象无可辩驳地证明了电子具有波动性，同时也表明了物质波假说对于微观粒子的普适性。

20 世纪 30 年代以后，科学家陆续观察到中子、质子甚至原子的衍射现象，它们的波长也都适用于德布罗意波长公式。1961 年，德国科学家将托马斯 · 杨的双缝实验进行改造，直接做了电子双缝干涉实验，从屏上摄得了类似杨氏双缝干涉图样的照片。如今，一切物质都具有波粒二象性的观点成为物理学界的共识。

问题与思考

1. 分析比较具有相同动能的电子和质子的物质波波长。
2. 质量为 5 g 的羽毛球离开球拍时的最大速率可达 288 km/h，试求其物质波的波长。是否能观察到它的波动性？简述理由。
3. 简述人类对光的本性认识的发展过程。

第三节 原子结构的量子力学模型

玻尔理论虽然在当时取得了很大的成功，但在解释多电子（核外有两个以上电子）原子结构、原子发射光谱中某些谱线比其他谱线更亮、原子光谱谱线的分裂等问题时无能为力。20 世纪 20 年代，对于物质波本质的讨论，使得物理学家对原子结构产生了新的认识，探索微观世界的理论体系——量子力学逐步建立起来。

▶ 物质波的本质

德布罗意在提出实物粒子的波粒二象性时，利用物质波的波长公式和玻尔理论中的轨道量子化条件，计算了核外电子轨道所满足的条件

$$2\pi r = n\lambda，\ n = 1，\ 2，\ 3，\ \cdots \qquad (1)$$

式（1）表明，原子核外电子的稳定轨道周长必须等于电子物质波波长的正整数倍。如图 14–17 所示，当 n 不满足上述要求时，相应的电子轨道是不稳定的。这时原子也不能形成玻尔模型所要求的定态。

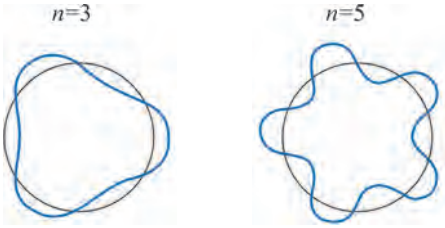


图 14–17 核外电子轨道周长与电子波长的关系

自主活动

利用德布罗意波长公式和玻尔理论中的核外电子轨道量子化条件推导出式（1）。

但是，德布罗意并没有给出物质波所满足的波动方程，因此无法知道物质波如何随时间变化。德布罗意的理论受到奥地利物理学家薛定谔（图 14–18）的极大关注。1926 年 1

月，薛定谔建立了物质波的波动方程，这个著名的方程就是描述原子中电子运动的薛定谔方程。薛定谔方程的解称为波函数 Ψ，Ψ 是随时间和位置变化的复数函数。求解薛定谔方程，就可以得到运动电子的量子化能级，而不需要人为地规定某些量子化条件。

薛定谔方程解决了原子结构、原子光谱的一系列疑难问题，与实验结果符合得很好。薛定谔将自己的新理论称为波动力学，波动力学是量子力学的一种重要表现形式。

尽管波动力学取得了极大的成功，但是物质波既不是机械波，也不是电磁波。人们（包括薛定谔本人在内）对诸如波函数等波动力学重要概念的物理意义并不明确。1927 年，德国物理学家玻恩（图 14–19）提出了波函数的统计诠释。玻恩指出，某一时刻，空间某一位置波函数模的二次方 $|\Psi|^2$ 正比于在该处单位体积内找到波函数所描述的粒子的概率。按玻恩的解释，物质波是一种概率波。利用玻恩关于波函数的统计诠释可以很好地理解单光子的双缝干涉实验。

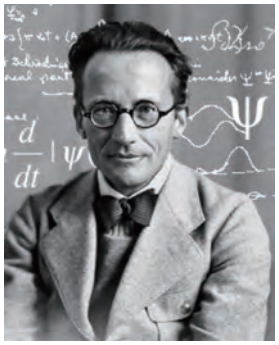


图 14–18　薛定谔（E. Schrödinger，1887—1961）

图 14–19　玻恩（M. Born，1882—1970）

▶ 电子云

经典力学对宏观质点运动的基本观点是：质点沿确定的轨道运动，在任意时刻都有确定的位置和确定的动量。然而，微观粒子表现出波动性，对于微观粒子上述观点是否成立是需要重新考虑的。

拓展视野

1927 年，德国物理学家海森堡（图 14–20）提出了不确定原理，揭示了微观粒子位置和动量之间的关系。不确定原理表明，如果微观粒子的位置完全确定，则粒子的动量完全不确定；反之，若微观粒子的动量完全确定，则其位置完全不确定。

微观粒子若沿确定的轨道运动，则粒子的位置确定。根据不确定原理，此时粒子的动量完全不确定，则粒子此后的运动亦无法确定。因此，微观粒子的运动无法用轨道的概念来描述。

海森堡还提出了量子力学的另一种形式——矩阵力学，矩阵力学被证明与波动力学等价。

图 14–20　海森堡（W. Heisenberg，1901—1976）

从量子力学的观点来看，原子核外的电子不存在确定的运动轨道。根据薛定谔方程，我们只能知道电子在原子内各处出现的概率分布。以基态氢原子为例，原子核外电子出现概率最大的区域是以原子核为球心的一个球壳，该球壳的半径约为 5.3×10^{-11} m，这个数值恰好与玻尔理论计算出来的基态氢原子核外电子轨道半径相同。由此可见，玻尔的电子轨道就是电子出现概率最大的地方。

我们用小圆点的疏密表示电子在核外各处出现的概率分布。这样，原子核似乎被一层“云雾”所笼罩，我们将这种“云雾”称为**电子云**。图 14–21 就是基态氢原子电子云的大致形状。

图 14–21　基态氢原子的电子云

20 世纪 20 年代，包括玻尔在内的一批物理学家建立了量子力学。玻尔理论的基本假设成为量子力学理论推导出来的必然结果。量子力学还成功地解释了许多玻尔理论所不能解释的现象，在说明原子结构方面取得了巨大的成功。现在它的应用已远远超出了原子结构的范围，成为物理学家研究微观世界的基本理论。

问题与思考

1. 简述物质波的统计意义。
2. 玻尔理论中哪些方面不符合量子力学对原子的描述？
3. 简述电子云的含义。

小结

· 基本概念和基本规律

光电效应：金属在光的照射下发射出电子的现象。

光电子：光电效应中从金属表面发射出来的电子。

光子：光是由一份一份能量子组成的，这些能量子被称为光子。

光电效应方程：$E_{km} = h\nu - W$。

波粒二象性：微观粒子既有波动性又有粒子性。

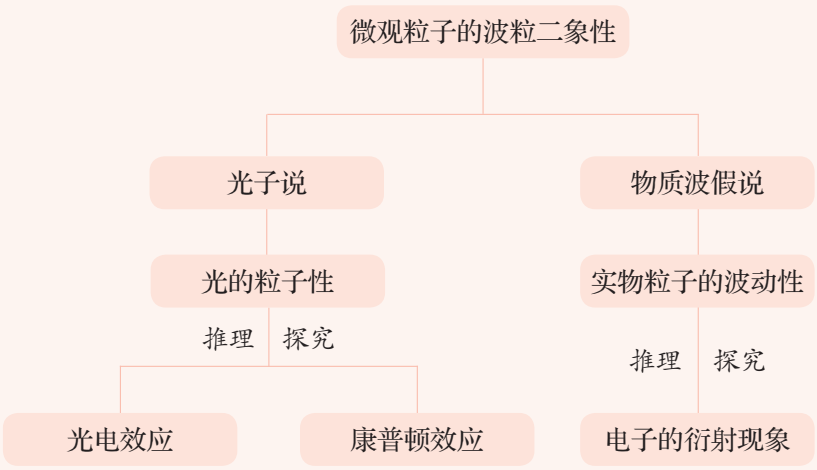
电子云：如“云雾”般用小黑点的疏密表示电子在核外各处出现的概率分布，这种“云雾”称为电子云。

· 基本方法

通过光子说、物质波假说建立过程的学习，感受物理学中建立假说的方法。

通过光电效应、康普顿效应、电子衍射现象的学习，感受利用证据通过科学推理进行科学论证的方法。

· 知识结构图



复习与巩固

1. 用光子说解释入射光的频率必须大于截止频率才能产生光电效应的原因。

2. 用氢原子赖曼系光谱中的紫外线逐一照射锌板，光电子最大初动能的最小值为多少？将所有最大初动能可能的取值画成的“能级图”与氢原子能级图赖曼系部分的关系如何？（氢原子的赖曼系光谱介绍参见 P72 拓展视野，锌的截止频率为 8.065×10^{14} Hz）

3. 经典粒子动量大小的变化往往意味着粒子速率的变化。真空中光子与静止电子碰撞后，光子的动量减小，其速率是否也减小？

4. 光子的能量为 $E = cp$，其中 c 为真空中的光速、p 为光子动量。利用这一关系推导物质波波长公式。

5. 如果 LED 灯消耗的电功率有 80% 产生可见光，试估算 10 W 的 LED 灯泡 1 s 内发出的可见光光子数数量级。

6. 以表格形式列举本章学习过的光具有波动性和粒子性的证据。

7. 蜻蜓质量约 1 g，其飞行速度可以达到 40 km/h。已知普朗克常量 $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J · s，计算快速飞行的蜻蜓的物质波波长，简述日常生活中没有察觉到物体波动性的原因。

*8. 普朗克在《热辐射理论》一书中，用引力常量 G、光速 c 和普朗克常量 h 导出了具有长度、时间和质量单位的三个物理量，即普朗克长度 L_P、普朗克时间 T_P、普朗克质量 m_P。已知 $G = 6.67 \times 10^{-11}$ N · m²/kg²、$c = 3.0 \times 10^8$ m/s、$h = 6.63 \times 10^{-34}$ J · s，猜测普朗克质量 m_P 的表达式并计算数值。

*9. 我们已经知道动量守恒定律适用于康普顿效应，试判断在光电效应中动量守恒定律是否适用于光子和电子组成的系统。

第十五章

原子核

天然放射现象揭示了原子核也是有结构的。物理学家利用人工方法，发现了组成原子核的粒子。对原子核结构的研究，使人类进入了开发和利用核能的时代。同时，随着大型粒子加速器的建设和使用，物理学家掌握了打开原子核的“利器”；种类繁多的亚原子粒子相继被发现。更为奇特的是，物理学最大的研究对象——宇宙和最小的研究对象——基本粒子居然联系起来了。人类对物质结构、相互作用乃至宇宙早期演化的认识不断深入。

在必修第三册中，我们已经学习了核能的初步知识，在本书第十三章中又学习了原子的结构。在本章中将了解放射性和原子核衰变；知道半衰期及其统计意义；了解原子核的组成和核力的性质；知道四种基本相互作用；认识原子核的结合能并了解核裂变、核聚变反应。通过了解人类对物质结构的探索历程，加深、完善对物质、能量和相互作用观念的认识，体会、关注核物理理论和核技术应用对人类生活和社会发展的影响，提升社会责任感。

第一节 天然放射现象 原子核的衰变

图 15–1 贝克勒尔（A. H. Becquerel，1852—1908）

α 粒子散射实验表明原子核的存在。物理学家在研究原子结构的同时，也开始对原子核进行深入的研究。1896 年，法国物理学家贝克勒尔（图 15–1）将含铀矿石放在用两张不透光的黑纸包裹的照相底片上并放在阳光下暴晒，试图观察强光能否使矿石放出 X 射线。结果照相底片感光了，底片上留下了矿石轮廓的像。贝克勒尔稍后发现，放在避光抽屉中的含铀矿石依然能使照相底片感光，而且照相底片上出现了非常清晰的含铀矿石的廓影（图 15–2）。贝克勒尔意识到，是铀或含铀矿石发出的某种未知的不可见射线使包在黑纸中的照相底片感光。

▶ 天然放射现象 放射性

进一步的实验表明，含铀矿石所放出的射线能使空气电离。不同于 X 射线，这种射线在电场或磁场中会发生偏转，并且这种射线的产生无需任何外界诱因。

我们将物质自发放出射线的现象称为**天然放射现象**，将物质发射射线的性质称为**放射性（radioactivity）**。如果元素具有放射性，则称为**放射性元素（radioactive element）**。

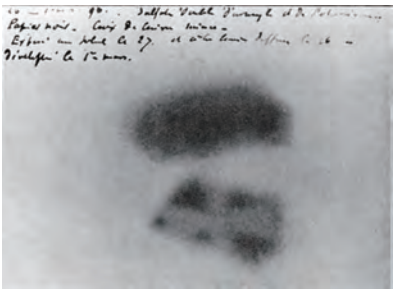


图 15–2 铀辐射照片

贝克勒尔建议法国物理学家 M. 居里（M. Curie，1867—1934）和她的丈夫 P. 居里（P. Curie，1859—1906）继续深入研究铀和各种含铀矿石的放射性。不久，居里夫妇（图 15–3）从含铀矿石中分离出两种具有很强放射性的新元素，命名为钋（Po）和镭（Ra）。M. 居里认为，放射性并不是铀元素所特有的性质，它具有普遍性。现在我们知道，原子序数大于 83 的所有天然存在的元素都具有放射性，原子序数小于 83 的元素中，有的也有放射性。

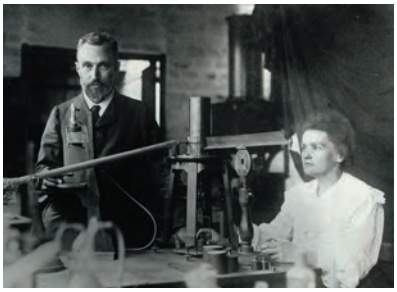


图 15–3 居里夫妇在做实验

所有关于放射性的研究都表明，不可能通过物理或化学的方法改变物质的放射性。这说明放射性元素所放出的射线来自位于原子“深处”的原子核。

▶ 三种射线

1898 年至 1902 年间，卢瑟福等人先后从含铀物质的射线中发现了三种穿透能力不同的成分，卢瑟福将这三种射线分别命名为 α 射线、β 射线和 γ 射线。

根据三种射线在电场或磁场中的偏转情况发现，α 射线是带正电的 α 粒子流，α 粒子就是氦原子核；β 射线是带负电的 β 粒子流，β 粒子就是电子；γ 射线是中性 γ 粒子流，γ 粒子就是光子。

如图 15–4 所示，α 射线的穿透能力很弱，几乎不能穿透一张纸，在空气中也只能行进几厘米，但电离能力很强，很容易使空气发生电离，使照相底片发生感光的作用也很强。β 射线的穿透能力较强，能穿透几毫米厚的铝板，但电离能力较弱。γ 射线的电离能力最弱，穿透能力最强，可以穿透几厘米的铅板。

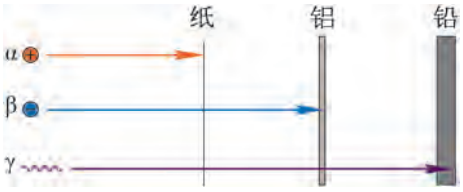


图 15–4　三种射线穿透能力的比较

大家谈

如图 15–5 所示，放射性样品放出的射线从铅盒上的小孔射入电场。射线在电场中被分成三束。由于 α 粒子的电荷量大小是电子电荷量大小的 2 倍，所以 α 粒子受到的电场力是电子的 2 倍。但是图中 α 射线的偏转程度明显弱于 β 射线。请对此进行分析并给出解释。

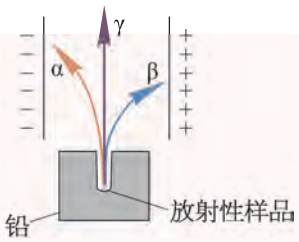


图 15–5　三种射线在电场中的偏转

▶ 原子核的衰变

放射性元素的原子核放出某种粒子而转变成新核的过程叫做原子核的**衰变**（**radioactive decay**）。

在物理学中，用符号 ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ 来表示某种元素的原子核。其中 X 为元素符号，A 表示原子核的质量数，Z 表示原子核的核电荷数，也就是原子序数。

原子核发生衰变的过程可以用核反应方程来表示，衰变过程满足质量数守恒和电荷数守恒的规律。原子核放出 α 粒子的衰变过程称为 α 衰变。许多重元素原子核的衰变是从 α 衰变开始的，α 衰变的过程可以表示为

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} $$

原子核放出 β 粒子的衰变过程称为 β 衰变，β 衰变的过程可以表示为 *

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathrm{Y} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e} $$

---

* 发生 β 衰变时，除了产生电子 ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$ 外，还产生反电子中微子 $\bar{\nu}_{e}$。

自主活动

铀元素的放射性核 $^{238}_{92}U$（也称为铀 238）经过一次 α 衰变变成钍（Th）元素的放射性核，这个核再经过一次 β 衰变变成镤（Pa）原子核。试写出这两种衰变的核反应方程。

发生 α 衰变或 β 衰变后，有些原子核处于激发态，处于激发态的原子核可以通过发射 γ 射线的方式跃迁到基态。原子核放出 γ 射线时，其质量数和电荷数不发生变化。

STSE

许多人对放射性物质所发出的射线感到恐惧。实际上，α 射线的危害是很小的，除非 α 射线源被直接吞入体内。但 β 射线和 γ 射线却会导致放射性烧伤以及对人和动物的 DNA 造成长期损伤。当我们接触放射源时，一般要穿戴防辐射服，并用长臂钳移取放射源，不要使放射源靠近眼睛。放射源应储存在用铅做衬里的、带锁的柜子中。

▶ 放射性元素的半衰期

原子核的衰变是一个随机的过程。然而，大量放射性元素原子核在一定时间内发生衰变的比例却是符合统计规律的。

放射性元素原子核的数目由于衰变减少至原来一半所经过的时间称为**半衰期（half-life）**。每种放射性元素都有确定的半衰期，半衰期与放射性元素处于何种物态、是单质还是化合物都没有关系。不同的放射性元素，半衰期不同，甚至差别很大。例如，$^{238}_{92}U$ 的半衰期是 4.5×10^{9} 年，$^{30}_{15}P$ 的半衰期是 2.5 min，而人造的放射性元素铸（$^{268}_{109}Mt$）的半衰期只有约 2×10^{-4} s。

问题与思考

1. 放射性元素发出三种射线，通过水平向右的匀强电场时呈现如图 15–6 所示的三种不同轨迹①、②、③，试指出它们分别是何种射线。

2. 带电的验电器在放射线的照射下电荷会很快消失，简述其原因。

3. $^{210}_{83}Bi$ 的半衰期是 5 天。10 g $^{210}_{83}Bi$ 经过 20 天后还剩下多少？

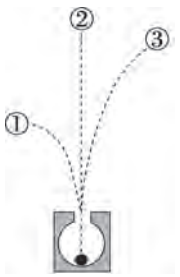


图 15–6

第二节　原子核的组成

天然放射现象表明原子核有内部结构，原子核的结构也可以发生变化。20 世纪上半叶，物理学家开始通过人工方法使原子核的结构发生变化，并借助这种方法探明了原子核的组成。我们知道原子核由质子和中子组成，它们是如何被发现的呢？

▶ 质子的发现

1914 年，卢瑟福的学生在实验中发现，有些 α 粒子穿越空气时的距离竟然长达 40 cm，远超过 α 粒子在空气中一般的穿越距离。这是什么原因呢？

卢瑟福对此进行了深入而细致的研究。1917 年至 1919 年间，卢瑟福再度利用 α 射线作为“探针”成功地“击破”了原子核，解决了这一问题。

图 15–7 为卢瑟福的实验装置示意图。容器 *C* 中放置着放射性物质 *A*，*A* 可以在底座支架上左右移动，并可以由底座上的标尺测出 *A* 离开银箔 *F* 的距离。从 *A* 中射出的 α 粒子可以射到 *F* 上。当 *F* 厚度适当时，α 粒子恰好可以被 *F* 完全吸收而不能透过 *F*。*F* 后放置一荧光屏 *S*，通过 *S* 后的显微镜 *M* 可以观察 *S* 上是否发生由粒子入射引起的闪光。*C* 上的两个阀门 *T* 可以分别向 *C* 内充入或抽出氮气。

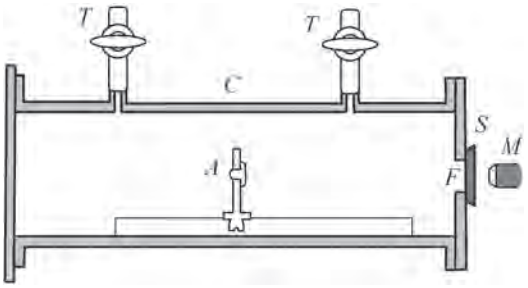


图 15–7　卢瑟福发现质子的实验装置示意图

卢瑟福经过研究发现，荧光屏 *S* 上的闪光是 α 粒子击中氮原子核后产生的新粒子透过银箔所致。将这种新粒子引进磁场和电场，可以确认是氢原子核，也就是质子，用符号 ${}_1^1\mathrm{H}$ 或 p 表示。这是历史上第一次利用一定能量的粒子轰击原子核，实现原子核结构转变的过程。我们将这样的过程称为**核反应（nuclear reaction）**。核反应的过程也遵循质量数和电荷数守恒的规律。

对上述质子产生的机制曾有两种不同的猜测：一种是 α 粒子直接从氮原子核中打出了

质子，同时 α 粒子被氮原子核散射；另一种是 α 粒子打进氮原子核后形成的复合核衰变放出了质子。1925 年，英国物理学家布拉凯特（P. Blackett，1897—1974）又在充有氮气的云室中重做了这个实验。布拉凯特拍摄了 2 万多张云室照片，从 40 多万条 α 粒子的径迹中，发现有 8 条产生了两分叉的情况。如图 15–8 所示，分叉后细而长的是 ${}_{1}^{1}\mathrm{H}$ 的径迹，短而粗的是 ${}_{8}^{17}\mathrm{O}$ 的径迹，由此证明后一种猜测是正确的。卢瑟福发现质子的核反应可以写成

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

图 15–8 布拉凯特所摄的云室照片

大家谈

为何 40 万条 α 粒子的径迹仅有 8 条产生了分叉的情况？若按第一种猜测，α 粒子击中氮原子核后径迹的情况又如何？请谈谈你对这两个问题的观点。

卢瑟福和他的助手又用类似的方法实现了硼、氟、钠、铝、磷等原子核的人工转变，并且都产生了质子，由此可以判定质子是原子核的组成部分。

拓展视野

云室是一种早期的核辐射探测仪器。如图 15–9（a）所示，在一个圆柱形容器内放入 α 射线源，盖上玻璃板，将它放在干冰上。在粒子通过的路径上，空气分子被电离，成为凝结核，生成雾珠从而显示出带电粒子的径迹（犹如夜晚温度降低时会起雾一样）。如图 15–9（b）所示，从 α 射线源发出的一缕缕辐射状的直线就是 α 射线的径迹。

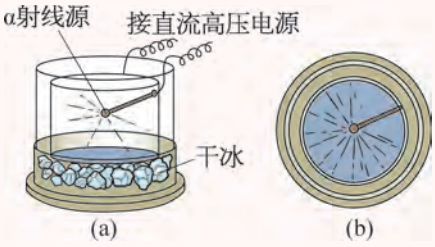


图 15–9 云室

▶ 中子的发现

人们用质谱仪测量发现，原子核的质量都是质子数的整数倍。结合质子的发现，有人认为原子核全是由质子组成的。但大量事实表明，多数原子核的电荷数都小于质量数。例如，氦原子核的质量数是 4，电荷数是 2。

卢瑟福猜想原子核内可能存在由一个电子和一个质子紧密结合的中性双子，这种中性

双子的质量近似等于一个质子的质量。卢瑟福认为，要解释原子核的组成，这种中性双子的存在几乎是必需的。卢瑟福将这种还未被实验发现的粒子称为中子，这就是著名的卢瑟福中子假说。

图 15–10　查德威克（J. Chadwick，1891—1974）

1930 年，德国物理学家用 α 粒子轰击铍原子核，获得一种穿透性极强的、不带电的射线，他们认为这是一种 γ 射线。不久，法国居里实验室的约里奥 – 居里夫妇（F. Juliot–Curie，1897—1956 和 I. Juliot–Curie，1900—1958）发现，如果用来自铍的这种射线轰击含氢的石蜡，竟然能将质子从石蜡中打出来。他们依然认为这种穿透性极强的射线是 γ 射线。

卢瑟福的学生查德威克（图 15–10）自 1921 年起就致力于寻找中子的研究工作。查德威克采用新的探测仪器再度做了上述实验，并仔细地复核实验的有关数据。他确信，如果实验中放出的是 γ 射线，则实验数据不符合动量守恒和能量守恒，除非假定这种射线是一种质量接近质子的中性粒子流。他进一步用云室和质谱仪进行研究，发现射线中粒子的质量为 $1.674\,920 \times 10^{-27}$ kg（质子的质量为 $1.672\,614 \times 10^{-27}$ kg），确实与质子的质量十分接近，中子终于“现形”了。然而中子并不是卢瑟福所想象的中性双子，我们用 n 表示中子。

发现中子的核反应方程是

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

实验证实，从许多原子核中都能打出中子，可见中子也是原子核的组成部分。

中子的发现为原子核模型理论提供重要的证据，引发了人工放射性、慢中子和核裂变的研究，为人类打开了利用核能的大门。

自主活动

许多科学家用中子代替 α 粒子轰击原子核，发现中子更容易打进原子核。请对此加以解释。

▶ 同位素

中子被发现后，原子核由质子和中子组成（图 15–11）的观点得到了公认。我们将质子和中子统称为**核子（nucleon）**。由于中子不带电，质子和中子的质量几乎相等，都等于一个原子质量单位，所以原子核的电荷数就等于它的质子数，原子核的质量数就等于它的核子数。

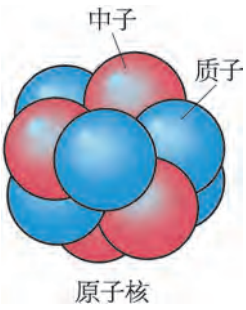


图 15–11　原子核模型

自主活动

原子核中没有电子，但发生 β 衰变时，原子核放出 1 个电子的同时，核内的中子数减少 1 而质子数增加 1。请对此加以分析并写出相应的核反应方程。

具有相同质子数、不同中子数的原子核互称为**同位素（isotope）**。例如，$^{11}_{6}C$、$^{12}_{6}C$、$^{13}_{6}C$、$^{14}_{6}C$、$^{15}_{6}C$ 都是碳的同位素，但碳的各种同位素在自然界中的含量不同。譬如自然界中碳 12 是含量最多的碳同位素，占碳元素总量的 98.9%。同位素的化学性质相同。有些同位素具有放射性，称为放射性同位素。

STSE

呼气法是检测幽门螺旋杆菌的常用方法。被测试者口服含有碳同位素的尿素胶囊，如果胃部存在幽门螺旋杆菌，尿素胶囊就会被幽门螺旋杆菌分泌的尿素酶水解，形成二氧化碳随血液进入肺部并以气体排出。尿素中除了碳 12 外还分别加入了微量的碳 14 或碳 13 以区别正常呼吸气体中的碳元素（正常呼吸气体中几乎没有碳 14 和碳 13）。检测被测试者呼出气体中是否有碳 14 或碳 13 即可判断被测试者胃部是否有幽门螺旋杆菌。

▶ 人工放射性

1932 年，美国物理学家安德森（C. D. Anderson，1905—1991）发现正电子。正电子的质量和电荷量大小与电子相同，但电性与电子相反，正电子的符号是 $^{0}_{1}e$，它是人类发现的首个反物质基本粒子。

1934 年，约里奥 – 居里夫妇用 α 粒子轰击铝箔后，除了探测到正常的中子以外，还意外地探测到正电子。更令他们感到吃惊的是，移走 α 放射源后，铝箔不再放出中子，但继续放出正电子。而且这种放射性随时间衰减的规律与放射性衰变一样，也有确定的半衰期。铝原子核被 α 粒子轰击后发生的核反应是

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

这一核反应的生成物磷 30 具有放射性，发生正电子衰变，衰变方程是

$$^{30}_{15}P \rightarrow ^{30}_{14}Si + ^{0}_{1}e$$

磷 30 是首个通过人工方法获得的放射性同位素，这是一个重要发现。此后，科学家用质子、氘核、中子和 γ 粒子轰击原子核，也都得到了放射性同位素。此前，我们已经知道原子序数大于 83 的天然存在的元素都具有放射性。事实上，天然放射性元素只有 40 多种，原子序数超过 92 的放射性同位素都是通过人工方法获得的。现在，利用原子能反应堆和粒子加速器生成的同位素已经超过 2 000 种，每种元素都有放射性同位素。

▶ 放射性同位素的应用

放射性同位素在科学研究和人们的日常生活中得到了广泛的应用。利用射线的穿透能力与物质密度、厚度的关系可以检查各种产品厚度、密封在容器中的液面高度等。

放射性同位素放出的射线会致癌，但我们也用射线对某些癌症患者进行放射性治疗（放疗）。射线对迅速生长的癌细胞有破坏作用，但同时也会破坏周边的正常细胞。因此，放射性治疗会对患者产生副作用。为了减少副作用，临床上需要先对肿瘤定位，然后用很细的 γ 射线或 X 射线来照射肿瘤。如图 15–12 所示，当射线对准肿瘤所在部位后，往往采用使放射源或患者身体旋转的方式使射线充分照射肿瘤的各个部分，同时又使射线的剂量尽可能降低。临床上一般用钴 60 或 X 射线机所产生的 0.2~5 MeV 能量的光子束进行放疗。

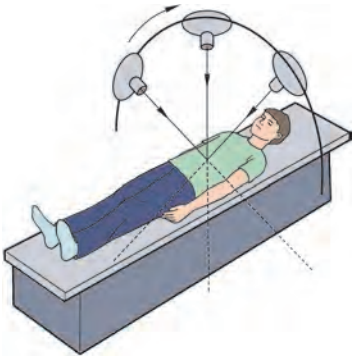


图 15–12　患者正在进行放射性治疗

在某种元素中掺进适量的放射性同位素，放射性同位素会跟随这种元素一起运动。通过探测放射性同位素放出的射线，就可以知道这种元素的踪迹。我们将作这种用途的放射性同位素称为示踪原子。

1965 年 9 月，我国科学家完成了结晶牛胰岛素的人工全合成，这是世界上第一个人工合成的蛋白质，为人类认识生命、揭开生命奥秘迈出了可喜的一大步（图 15–13）。在合成的过程中，科学家将碳 14 作为示踪原子掺入人工合成的牛胰岛素并与天然牛胰岛素混合，经过多次结晶，得到了碳 14 均匀分布的牛胰岛素结晶，证明人工牛胰岛素与天然牛胰岛素是同一种物质。

图 15–13　人工全合成结晶牛胰岛素五十周年纪念邮票

问题与思考

1. 原子核 *A* 比原子核 *B* 的质量大，能否判定 *A* 也一定具有更大的原子序数？简述理由。

2. 锶（Sr）的原子序数是 38、质量数是 95，一个锶核有多少个中子、多少个质子？

3. 用 α 粒子轰击氮 14，产生一个中子和一个反冲核，写出其核反应方程。

4. 估算氢原子核的密度。

第三节 核能及其应用

原子核衰变过程中伴有能量的释放。用经过人工加速的粒子轰击原子核，原子核发生人工转变过程中也有能量的释放。物理学家自 20 世纪 30 年代开始研究从核反应中获得能量的可能性。

▶ 核力

大家谈

原子核的半径很小，核子之间距离很近，质子之间的库仑斥力一定很强。为什么原子核还能保持稳定？

原子核内部的质子都带正电，库仑斥力有使质子彼此远离并使原子核解体的趋势，但原子核通常是稳定的。这一事实表明，原子核内一定有一种比库仑斥力更强的吸引力，使得核子彼此吸引并紧密地结合在一起。原子核内部的这种力称为**核力（nuclear force）**。

质子和质子、质子和中子以及中子和中子之间都存在核力，且核力大小是相同的，与核子是否带电无关。核力的作用范围大约在 1.4×10^{-15} m（大约相当于质子的半径）以内，超出这一范围，核力迅速减小为零。因此，原子核中的每个核子仅仅与邻近的少数核子发生核力作用，核力比库仑力强 100 倍以上。

大家谈

指出库仑力与核力的不同之处。

▶ 原子核的结合能和平均结合能

要使一个核子脱离原子核，外界必须克服核力做功。因此，将原子核分解成彼此分离的核子，所有核子的能量之和比未分离的原子核能量大。例如，用能量为 2.22 MeV 的 γ

粒子照射氘核（${}_1^2\mathrm{H}$），会发生如下的核反应

$$\gamma + {}_1^2\mathrm{H} \rightarrow {}_1^1\mathrm{H} + {}_0^1\mathrm{n}$$

反之，在中子和质子结合成氘核的过程中会放出一个能量为 2.22 MeV 的 γ 粒子。这表明，原子核分解成核子需要吸收一定的能量；核子结合成原子核时则放出同样大的能量。原子核各个核子彼此分离时的总能量与该原子核能量之差称为原子核的**结合能**（**binding energy**）。氘核的结合能为 2.22 MeV。原子核的核子数越多，结合能越大。

事实上，原子核的质量小于组成原子核的所有核子的总质量，两者之差称为质量亏损。质量亏损 Δm 与原子核的结合能 E 之间的关系符合爱因斯坦提出的质能方程，即

$$E = \Delta mc^2$$

物理学家用平均结合能反映原子核结合的紧密程度，平均结合能等于原子核结合能与核子数之比。平均结合能越大，原子核越稳定。

图 15–14 反映了元素原子核的平均结合能随核子数变化的关系。绝大多数元素原子核的平均结合能在 8 MeV 左右，图线左侧是轻核（核子数很小的原子核），例如，${}_1^2\mathrm{H}$ 和 ${}_2^3\mathrm{He}$ 的结合能小于 3 MeV，这些原子核中的核子结合得不太紧密。平均结合能在铁 56 附近达到最大值，这些原子核结合得最紧密，原子核最稳定。图线右侧重核（核子数很大的原子核）的平均结合能均小于中等质量原子核（核子数在 50~60 左右）的平均结合能，例如，铀 238 的平均结合能比铁 56 小 1 MeV 左右。当重核分裂成两个或多个中等质量的原子核时，将有一部分结合能释放出来。

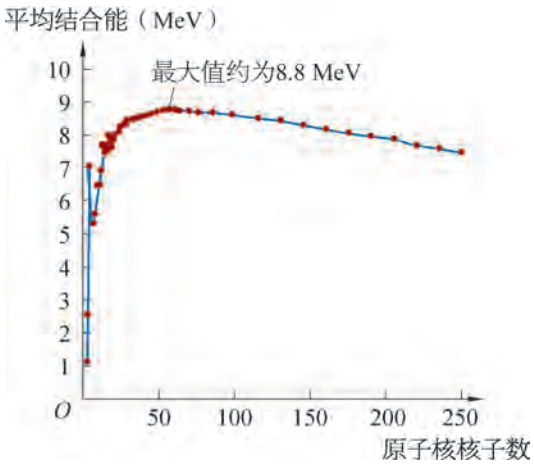


图 15–14　平均结合能与核子数的关系

▶ 原子核的裂变

1938 年，德国物理学家哈恩与助手发现中子轰击铀 235 后，产生一个钡原子核。奥地利物理学家迈特纳和弗利胥用“液滴模型”对哈恩发现的核反应做了解释。

如图 15–15（a）所示，将铀 235 看成一个液滴，中子打进铀 235 后形成一个处于激发态的复合核铀 236。进入铀核的中子所携带的能量使核内原来的核子运动加剧，并使复合核被“拉长”[图 15–15（b）]。由于核力是短程力，当复合核“拉长”至图 15–15（c）

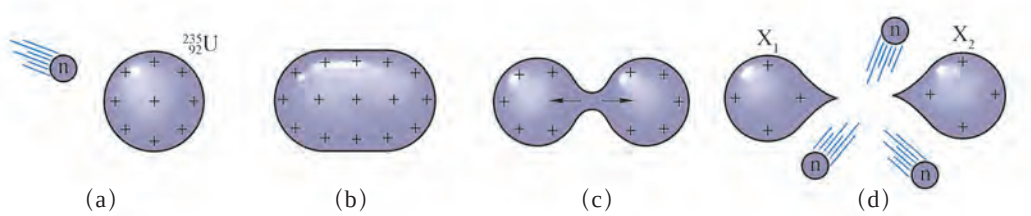


图 15–15　铀 235 裂变的液滴模型

所示的形状时，复合核核子间距的增大使得核力迅速减小并弱于库仑斥力，这样复合核便分裂成两个部分 X_1、X_2，并放出几个中子（典型情况为 2~3 个中子），如图 15–15（d）所示。迈特纳和弗利胥将这种重核受到中子轰击后分裂成中等质量的原子核，同时放出能量的核反应称为**核裂变（nuclear fission）**。

复合核铀 236 存在的时间很短，不超过 10^{-12} s。裂变产生的两个原子核的质量一般分别为铀 235 质量的 40% 左右和 60% 左右，裂变产生两个等质量原子核的概率很小。一种典型的铀 235 裂变的核反应是

$$^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{235}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{141}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{92}_{36}\mathrm{Kr} + 3{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

铀 235 的裂变产物可能为氙和锶、钡和氪或者锑和铌，同时放出 2~3 个中子和巨大的能量。1946 年至 1948 年间，我国核物理学家钱三强（1913—1992）、何泽慧（1914—2011）夫妇（图 15–16）及其合作者首次发现铀 235 还有极低概率裂变为三个或四个原子核（三分裂、四分裂）的现象发生。

图 15–16 钱三强夫妇

如果按一个铀 235 原子核裂变时放出 200 MeV 能量计算，1 kg 铀全部裂变所放出的核能相当于 2.5×10^6 kg 优质煤完全燃烧所放出的化学能。重核裂变成为人类利用核能的一种重要途径。

▶ 链式反应

一个原子核发生裂变所产生的能量还是微不足道的，但是许多原子核在短时间内一起发生裂变，将释放大量能量。从每一次重核裂变过程中放出来的 2~3 个中子可以用来继续引发其他重核发生裂变再产生下一代中子，并使裂变反应不断进行下去，造成连锁式的裂变效果，放出巨大的能量（图 15–17）。这种裂变反应称为**链式反应（chain reaction）**。

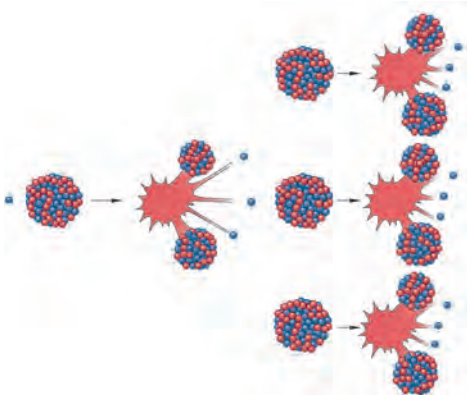


图 15–17 铀 235 链式反应示意图

要产生自发、持续的链式反应还需要具备三方面的条件。

首先，铀 235 是一种用来产生链式反应的典型同位素材料，只有较慢的中子（称为慢中子）轰击铀 235 时，才会有较大概率使铀 235 发生裂变。但铀 235 发生裂变后放出的中子速度较快（称为快中子），因此使链式反应持续进行的首要条件是使裂变产生的快中子减速为慢中子。

其次，天然铀中铀 238 占 99.3%，铀 235 仅占 0.7%。由于铀 238 比铀 235 稳定，只有能量高于 1 MeV 的快中子才能使铀 238 发生裂变，而这种裂变和铀 238 对快中子的吸收概率都很低，因此经常采用扩散和离心分离技术将天然铀制成浓缩铀（铀 235 含量高于天然铀）。

最后，铀块的体积是链式反应能否发生的决定性条件。由于裂变过程中产生的中子有可能在引起下一步裂变之前就从铀块表面逸出，铀块的体积必须足够大才能保证链式反应的发生。能够发生链式反应的铀块的最小体积叫做临界体积。

慢中子进入超过临界体积的铀 235 时，在极短的时间内链式反应会放出巨大的能量并发生猛烈的核爆炸，原子弹就是根据这一原理制成的。我国第一颗原子弹于 1964 年 10 月 16 日在新疆罗布泊成功爆炸。

▶ 核裂变反应堆

核裂变反应堆是人工控制链式反应的装置。世界上第一座核裂变反应堆于 1942 年在美国芝加哥大学建成。

反应堆中所用的核燃料是用天然铀或浓缩铀制成的铀棒。在裂变反应堆中用来使中子减速的物质称为减速剂。常用的减速剂是重水（D_2O）、轻水（即普通水 H_2O）和石墨（图 15–18）。由于轻水吸收中子的概率较大，所以轻水裂变反应堆中需要用浓缩铀作为核燃料，而使用重水或石墨作为减速剂的裂变反应堆，使用天然铀作为核燃料即可。

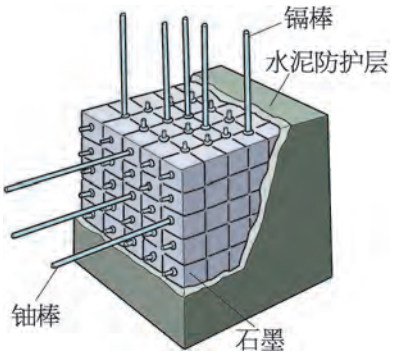


图 15–18　采用石墨作为减速剂的核反应堆示意图

为了使链式反应得以持续，平均而言，每个由裂变产生的中子必须能够继续引发至少一次新的裂变。把一切中子的损失考虑在内，任何一代中子总数与上一代中子总数的比值称为增殖因数 f。只有当 $f \geqslant 1$ 时，链式反应才能得以持续。将 $f > 1$ 称为裂变反应堆的超临界状态，处于超临界状态的裂变反应堆有可能发生危险的核爆炸。因此，裂变反应堆中常装有用镉或硼制成的控制棒。控制棒吸收中子的能力很强，通过调节控制棒插入反应堆的深度，可以控制链式反应的速度。

为了阻止中子的逃逸，在裂变反应堆中心部分周围装有反射层。反射层一般由石墨材料制成。铀裂变会产生各种对人体和动物有害的射线，为了隔挡这些射线，必须对裂变反应堆实施封闭。封闭设施由金属套、防止中子外逸的水层和 1~2 m 厚的钢筋混凝土墙构成。

图 15–19 是核电站的示意图。反应堆工作时，链式反应所释放的核能将转化成内能使裂变反应堆温度升高。利用水、液态金属钠或空气等流体作为冷却剂，在

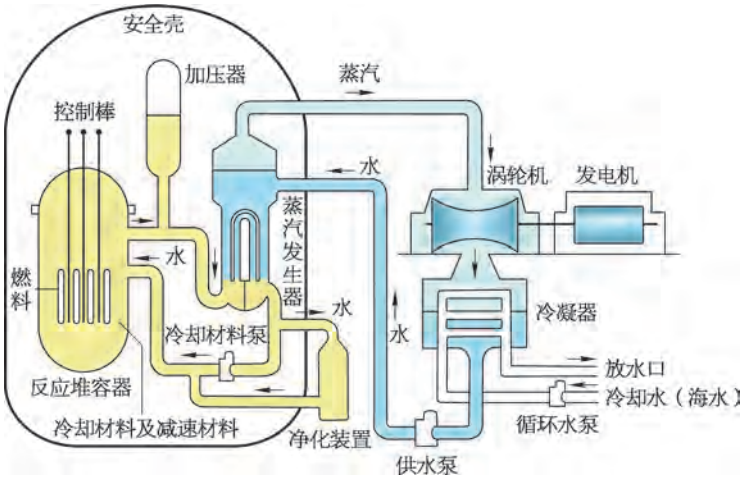


图 15–19　核电站示意图

反应堆内外循环流动，不断带走热量。利用这些热量使水汽化并驱动汽轮发电机发电。一座百万千瓦级的核电站每年约消耗 30 吨浓缩铀，而同样功率的火电站，每年约消耗 250 万吨煤。

裂变核反应堆不仅能提供巨大的能量，它产生的大量中子还可以被用来进行各种核物理实验，生产人工放射性同位素。

▶ 原子核的聚变

相对于重核（如铀 235）而言，轻核（如氘）的平均结合能更小，某些轻核结合成质量较大的原子核时，能释放更多的结合能。轻核结合成质量较大的原子核的核反应称为**核聚变（nuclear fusion）**，宇宙中的许多元素最初都是通过聚变的方式形成的。包括太阳在内的恒星，内部不断地发生着轻核聚变并向外辐射能量。

将轻核聚变与重核裂变释放的核能进行比较可以发现，在核燃料质量一定的条件下，聚变释放的能量更大。此外，可以用自然界中含量丰富的氘（1 L 海水中大约有 0.03 g 氘）作为聚变的核燃料。因此，从聚变中获得能量具有十分诱人的前景。

为了使原子核发生聚变，原子核必须具有足够大的动能以克服核之间相互作用的库仑斥力，使原子核之间的距离达到核力能发生作用的范围。要使大量的轻核具有足够大的动能，意味着需要将它们加热到很高的温度，因此这类聚变反应又称为热核反应。太阳等恒星内部的温度高达几百万摄氏度，其中的原子核具有足够的动能使聚变发生。聚变释放的能量又使高温得以维持，并引发进一步的聚变。重核裂变所引发的核爆炸可以产生 10^8 K 的高温，因此可以用原子弹来触发热核反应，氢弹就是利用这一原理制成的。1967 年 6 月 17 日，我国第一颗氢弹成功爆炸（图 15–20）。

原子弹、氢弹的研制成功对我国的安全和发展具有重大战略意义。以邓稼先（图 15–21）为代表的一大批科学家为之付出了青春和热血。1950 年，26 岁的邓稼先在美国获得了博士学位后，便毅然回国投身祖国建设。1958 年，邓稼先突然隐姓埋名，开始了他长达 28 年核武器研制的秘密历程。邓稼先为我国的核武器事业呕心沥血，至死不懈。干惊天动地事，做隐姓埋名人。直到生命的最后时刻，他的名字和作为我国核武器研制工作的开拓者和奠基者的重要贡献，才为人知晓。

图 15–20 我国第一颗氢弹爆炸成功

图 15–21 邓稼先（1924—1986）

自主活动

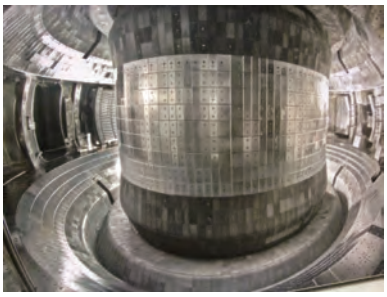
太阳内部所发生的核聚变反应称为 p−p 循环：① ${}_1^1\mathrm{H} + {}_1^1\mathrm{H} \rightarrow {}_1^2\mathrm{H} + {}_1^0\mathrm{e}$（0.42 MeV）；② ${}_1^1\mathrm{H} + {}_1^2\mathrm{H} \rightarrow {}_2^3\mathrm{He}$（5.49 MeV）；③ ${}_2^3\mathrm{He} + {}_2^3\mathrm{He} \rightarrow {}_2^4\mathrm{He} + 2{}_1^1\mathrm{H}$（12.86 MeV）。以上三步核聚变反应方程后括号内的数据为每一步反应放出的能量。求发生一次 p−p 循环所放出的总能量。

▶ 可控核聚变

为了从聚变中获取可利用的能量，必须建成速度可控的聚变反应堆。除了高温条件以外，参与聚变的原子核的数密度也必须足够大，这样才能保证原子核发生相互碰撞的概率足够大。实现可控核聚变的难点是，必须使高密度的原子核约束在聚变反应堆内的时间足够长。

当温度达到核聚变的要求时，原子核外的电子已完全与原子脱离，原子核与电子组成等离子体。一般的材料在几千摄氏度时已熔化并蒸发，因此无法找到“盛放”热等离子体的“容器”。目前，技术上主要采用磁约束和惯性约束的方法来“盛放”热等离子体。磁约束就是利用磁场对带电粒子的作用，将热等离子体约束在一定的空间内做高速运动。其中，将等离子体约束在环形空间的一种磁约束装置称为托卡马克装置（图 15–22），我国设计建造的“东方超环”是国际上第一个建成并投入运行的全超导托卡马克核聚变实验装置。

（a）“东方超环”外形



（b）托卡马克装置真空室

图 15–22　托卡马克装置

1964 年，我国著名核物理学家王淦昌（图 15–23）独立地提出了利用惯性约束产生核聚变的构想。用几束强激光从各个方向同时轰击用氘（${}_1^2\mathrm{H}$）和氚（${}_1^3\mathrm{H}$）制成的靶丸（图 15–24），使靶丸完全电离成为等离子体，等离子体在 10^{-11}~10^{-9} s 时间内受到压制并升温至聚变发生。

图 15–23　王淦昌（1907—1998）

图 15–24　直径 1 mm 的氘氚靶丸

与核裂变反应相比，核聚变反应还具有对环境污染小的优点。从核聚变反应中还可以得到大量有用的中

子。因此，可控核聚变反应受到普遍的重视，世界上许多国家都在积极开展可控核聚变反应理论和技术的研究。

人类对核能的研究和利用已近百年。与常规能源相比，核能所具有的明显优势是：核燃料提供的能量巨大；核燃料的储量丰富，核燃料的运输和储存方便；核能是清洁能源，对环境污染小。当然，在开发利用核能的过程中，我们应重视核电站的安全性以及核废料的科学、安全处置。

STSE

巨大的核能是一柄双刃剑，它在造福人类的同时，也可能使人类遭受毁灭。中国拥有核武器伊始便庄重承诺，在任何时候、任何情况下都不会首先使用核武器。中国还无条件承诺不对无核武器国家和地区使用或威胁使用核武器。中国是世界上唯一作出并恪守这一承诺的国家。同时，中国积极致力于核能的和平开发和利用。我国的核电建设始于 20 世纪 80 年代。至 2018 年底，我国在运核电机组达到 45 台；装机容量 4 590 万千瓦，年发电量 2 865 亿千瓦·时，占我国年发电总量的 4%。2020 年 4 月，我国科学家宣布全超导托卡马克大科学装置“东方超环”物理实验获重大突破——实现了 1 亿摄氏度条件下 10 s 高约束等离子体运行，创造了新的世界纪录。“东方超环”的多项实验参数已接近核聚变反应稳定运行的需要，为未来的核聚变实验装置提供了重要的实验依据与科学支持。

问题与思考

1. 简述链式反应发生的条件。
2. 1 g 铀 235 全部裂变后所释放的能量是多少？（每个铀 235 核裂变可释放 200 MeV 能量，铀 235 的摩尔质量是 235 g/mol）
3. 简述核聚变发生的条件。
4. 有人认为，原子核内核子距离很近，因此万有引力非常大，所以原子核非常稳定。请简要评价这一观点。

第四节　粒子物理简介

20 世纪 20 年代，电子、质子和中子被认为是组成物质的基本粒子。自 1912 年发现了宇宙射线后，物理学家利用各种粒子探测器从宇宙射线中发现了许多新的粒子。20 世纪 30 年代以后，原子核物理、宇宙线研究和量子力学理论对人们刚刚形成的物质结构观念形成了强烈的冲击。物理学新的分支——粒子物理学由此诞生。

▶ 中微子和正电子的发现

1914 年，查德威克证明 α 射线和 γ 射线的能量是量子化的，α 粒子和 γ 粒子所带走的能量正好等于衰变前后原子核定态能级的差。然而 β 射线的能量却是连续分布的，衰变产生的电子的能量竟然小于原子核始、末定态的能量差。这个现象令物理学家感到不解。奥地利物理学家泡利（图 15–25）坚信能量守恒定律不可能对 β 衰变失效。

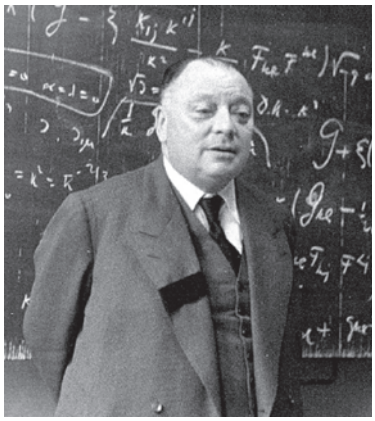


图 15–25　泡利
（W. Pauli，1900—1958）

1930 年，泡利提出，在 β 衰变的过程中，除电子以外，还有一个轻的电中性粒子一起被发射出来。这个中性粒子的穿透力极强，很难被探测到。物理学界将这种还未被实验证实的中性粒子命名为中微子（符号为 ν_e）。β 衰变过程中，核子之间的相互作用不同于核力，物理学家将这种作用称为**弱相互作用（weak interaction）**。

王淦昌曾提出一种探测中微子的实验方案，有人按此方案进行实验，得到了与王淦昌预期相符的实验结果，间接地证实了中微子的存在。1956 年，中微子 ν_e 的存在终于被实验所证实。1962 年和 2000 年，物理学家又分别发现了另外两种中微子 ν_μ 和 ν_τ。

大家谈

根据能量守恒定律，请分析 β 衰变所释放的电子和中微子的能量关系。

1928 年，英国理论物理学家狄拉克（图 15–26）从理论上预言了正电子的存在。通过理论分析，一对能量为 0.51 MeV 的 γ 粒子可在真空中产生一对正负电子对。反过来，如正电子和电子相遇则会发生湮没，化成一对 γ 粒子。此前，我国物理学家赵忠尧

（图 15–27）曾在实验中发现了狄拉克所预言的正负电子对湮没而发出的能量为 0.51 MeV 的辐射。安德森正是受到赵忠尧工作的启发于 1932 年在宇宙线的云室照片上观察到了正电子的径迹（图 15–28）。

反粒子与粒子具有相同的质量、相反的电荷量。20 世纪 50 年代以后，反质子、反中子以及其他反物质粒子相继在实验中被发现。粒子物理学认为，所有粒子都有反粒子，有些粒子（如光子）的反粒子就是它本身。

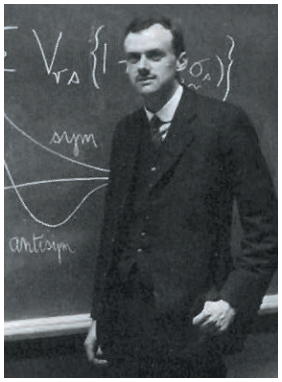


图 15–26 狄拉克（P. Dirac，1902—1984）

图 15–27 赵忠尧（1902—1998）

▶ 加速器与对撞机

加速器是粒子物理学重要的实验工具。我们在必修第三册中曾学习过回旋加速器的工作原理。除了回旋加速器以外，目前应用于粒子物理研究的还有直线加速器和同步加速器。因为研究粒子物理通常需要利用高能加速器，所以粒子物理学也称为高能物理学。

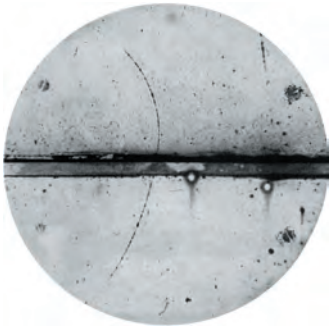


图 15–28 正电子在云室中的径迹（图中自下而上的弯曲径迹）

如图 15–29 所示，在直线加速器中，电子或离子沿直线路径通过一系列漂移管（图中管状导体），加在漂移管上的电场是交变的。例如，对于电子而言，每当电子到达两个相邻漂移管交界处，电子前方的漂移管总是接在电源正极，电子后方的漂移管总是接在电源的负极。这样，电子在漂移管中做匀速运动，在漂移管间隙处被加速。电子加速的初期，速度逐渐增大。由于电子质量很小，经加速后，其速度很快接近光速。故直线加速器前段的漂移管长度逐渐增大，而后段漂移管的长度基本相同。直线加速器特别适合对电子的加速。对肿瘤进行放疗的 γ 射线，就是利用经直线加速器加速达 10 MeV 的电子轰击金属箔后产生的。

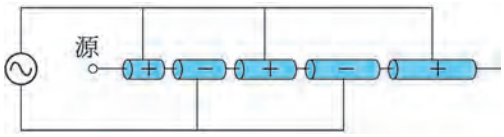
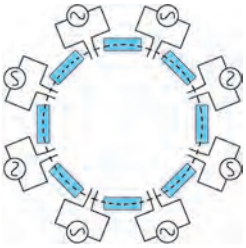


图 15–29 直线加速器原理示意图

同步加速器的运行机制类似于直线加速器，只是同步加速器将长度相同的漂移管排列在半径一定的圆周上。这样，被加速的带电粒子可以通过沿圆周多次绕行获得更大的能量而无需增加加速器的长度。如图 15–30（a）所示，漂移管中超导磁铁的磁场使带电粒子沿圆周运动，而相邻漂移管间的交变电场使粒子加速。经加速的粒子通过每个漂移管的时间越来越短，同时粒子做圆周运动所需的洛伦兹力越来越大。同步加速器采用同步增大磁场磁感应强度和加速电场变化频率的方法将粒子约束在圆周轨道上继续加速。同步加速器中的带电粒子沿圆周运动会向外辐射电磁波，这种辐射称为同步辐射。欧洲核子研究中心建有半径为 4.3 km 的同步加速器 [图 15–30（b）]，可将质子加速至 7 TeV。



（a）同步加速器原理示意图

（b）同步加速器内景

图 15–30　同步加速器

利用粒子相互撞击的实验所获得的数据可以分析被撞击粒子的结构。根据动量守恒和能量守恒定律，粒子碰撞的有效能量（即能引起粒子反应的能量）只取决于粒子的相对速度。所以，采用粒子对撞的方法效果更为明显而且更加经济。这就是粒子对撞机的设计初衷。近几十年发展起来的高能加速器多数是对撞机，粒子先在同步加速器中加速至一定的能量后被注入对撞机。在对撞机中，两束粒子流反向沿圆周运动，同时进一步被加速，在轨道交叉处相互对撞。

我国的北京正负电子对撞机于 1988 年建成，电子和正电子束的对撞能量为 2×2.8 GeV（图 15–31）。目前世界最大的对撞机是欧洲核子研究中心的大型强子对撞机，其圆形轨道周长达 27 km，位于地下 100 m 处，两束质子在其中对撞的能量可达 2×7 TeV。

图 15–31　北京正负电子对撞机首次成功对撞

STSE

加速器除了直接用于粒子物理的基础研究以外，还在其他领域的科学研究和技术应用中发挥了重要的作用。质子和重离子放疗（图 15–32）是国际公认的尖端放疗技术，用同步加速器将质子或碳离子加速至约 0.7 c 后，将离子束引出，对肿瘤患者实施放疗。整个治疗过程好比是针对肿瘤的“立体定向爆破”，能够对肿瘤病灶进行强有力的照射，同时又避免照射正常组织，实现疗效最大化。

同步加速器中所产生的同步辐射（图 15–33）已经成为生命科学、材料科学、环境科学、物理学、化学、医药学、地质学等学科的研究中先进的、不可替代的工具。

图 15–32　上海质子重离子医院的放疗设备

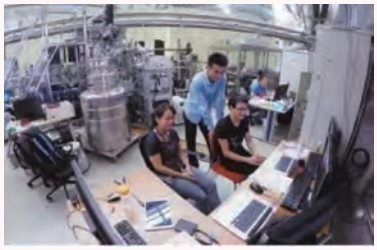


图 15–33　上海同步辐射光源内的线站

▶ 粒子的分类

自从电子、质子及中子被发现后，微观世界的图像变得十分清晰，物质由原子构成，原子由电子与原子核构成，而原子核由质子与中子构成。但随着理论和实验技术的不断发展，物理学家发现了越来越多的微观粒子。很显然，这些粒子不可能都是基本的。1960 年以后，一些物理学家开始尝试寻找物质构成的基本粒子及其内在规律。

1964 年，美国物理学家盖尔曼（M. Gell-Mann，1929—2019）等人提出夸克模型，认为质子、中子等粒子都是由更基本的 3 种夸克组成，分别称为上夸克（符号为 u）、下夸克（符号为 d）和奇异夸克（符号为 s），每一种夸克都有对应的反粒子——反夸克，符号分别是 $\bar{u}$、$\bar{d}$、$\bar{s}$。u 夸克、d 夸克、s 夸克所带的电荷量分别是 $\frac{2}{3}e$、$-\frac{1}{3}e$、$-\frac{1}{3}e$。质子由 2 个 u 夸克和 1 个 d 夸克组成，中子由 1 个 u 夸克和 2 个 d 夸克组成。1 个夸克和 1 个反夸克组成介子，3 个夸克或 3 个反夸克则组成重子，介子和重子统称为强子。利用夸克模型可以对当时所发现的各种粒子进行分类并预言新的粒子。20 世纪 60 年代，中国物理学家也提出了类似的层子模型。

自主活动

质子由 2 个 u 夸克和 1 个 d 夸克组成，表示为 p = uud；中子由 1 个 u 夸克和 2 个 d 夸克组成，表示为 n = udd。试用以上方式表示反质子 $\bar{p}$ 和反中子 $\bar{n}$。

1974 年，美籍华裔物理学家丁肇中（1936— ）及美国物理学家里克特（B. Richter，1931— ）领导的研究组分别发现了 J/ψ 粒子。与同类型的强子相比，J/ψ 粒子有一些新的性质无法用已有的 3 种夸克来解释。为此，物理学家引入了第 4 种夸克——粲夸克（符号为 c），并认为 J/ψ 粒子是由 c 夸克和 $\bar{c}$ 夸克所组成。20 世纪 70 年代中后期，粒子物理学家又利用对撞机先后发现了底夸克（符号为 b）和顶夸克（符号为 t）存在的实验证据。不同的 u、d、s、c、b、t 被称为夸克的味，进一步的研究发现，每一种味的夸克还有红、蓝、绿 3 种不同的色，再加上各自的反夸克，一共有 36 种不同的夸克和反夸克。

需要指出，夸克的味或色只是用来表示夸克的属性，并不是说夸克真有不同的味道或颜色。实际上我们并不能看到自由的夸克，夸克只能通过强子的形式被观察到，这一性质称为夸克禁闭。

电子被发现后，1936 年在宇宙线中发现了与电子相似但质量约为电子质量 200 倍的 μ 子，1975 年又发现了质量更大的 τ 子。这 3 种粒子以及相应的中微子 ν_e、ν_μ、ν_τ 统称为轻子。考虑到反粒子，轻子一共有 12 种。轻子和夸克是目前已知的构成物质的最基本粒

子，在目前的能量条件下，尚未发现轻子和夸克有内部结构。

自然界有四种基本相互作用（fundamental interactions），即强相互作用、弱相互作用、电磁相互作用和引力相互作用。前两种相互作用只在很短的距离内起作用，称为短程力。我们熟知的电磁相互作用和引力相互作用都是长程力。

表 15–1　自然界的四种相互作用

相互作用类型	相地强弱	作用距离
强相互作用	1	10^{-15} m
电磁相互作用	10^{-2}	无穷远
弱相互作用	10^{-6}	10^{-18} m
引力相互作用	10^{-38}	无穷远

1954 年，为了描述这些相互作用，物理学家杨振宁（1922—　）和米尔斯提出了规范场理论，微观粒子通过交换规范玻色子发生相互作用。规范玻色子一共有 12 种，其中带电粒子通过交换光子发生电磁相互作用，夸克通过交换“胶子”（共 8 种）发生强相互作用，弱相互作用则通过交换“中间玻色子”（共 3 种，分别为 W^+、W^- 及 Z^0）发生。

为了解释微观粒子质量的产生，英国物理学家希格斯（P. Higgs，1929—　）在 1964 年引入了希格斯粒子。2013 年欧洲核子研究中心宣布探测到了希格斯粒子。基本的粒子种类达到 61 种。

描述电磁相互作用的理论称为量子电动力学，描述强相互作用的理论称为量子色动力学，描述弱相互作用和电磁相互作用的理论称为弱电统一理论，这些都是规范场理论。规范场理论可以很好地描述微观粒子及其相互作用，与实验结果符合得很好，因而被称为粒子物理的标准模型，它代表着当今人类对微观物质世界的认识。标准模型的成功也推动了天体物理、宇宙学和核物理学等学科的重大发展。现在人类探索物质世界的进程仍在继续。

问题与思考

1. 简述同步加速器与回旋加速器的区别。

2. 试分析直线加速器中漂移管的最小长度与加在漂移管上的交变电压频率之间的关系。

3. 电子、质子和光子是否都是基本的粒子？它们分别属于哪一类粒子？

学期活动

研究“啤酒泡”的“半衰期”。

我们已经在本章第一节中学习了放射性元素的半衰期，但鉴于放射性的危害，关于放射性元素半衰期的实验研究很难在中学物理实验室中开展。有趣的是，我们可以用一个生活中常见又安全的过程——大量“啤酒泡”的不断爆裂与减少来模拟放射性元素的衰变，通过对“啤酒泡”数量随时间变化的统计规律的研究，获得对半衰期的直观感受。请自行设计实验，记录静置于杯中的啤酒液面上方“啤酒泡”数量随时间变化的有关数据，完成研究报告。

活动要求：

(1) 描述放射性元素的半衰期。

(2) 制定研究方案。

(3) 进行实验，处理数据。

(4) 归纳总结，得出结论。

(5) 撰写研究报告。

(6) 交流研究方案和结论，互相评价。

小结

· 基本概念和基本规律

天然放射现象：物质自发放出射线的现象。

原子核的衰变：放射性元素的原子核放出某种粒子而转变成新核的过程。衰变过程满足质量数守恒和电荷数守恒。

半衰期：放射性元素的原子核的数目由于衰变减少至原来一半所经过的时间。

核反应：利用一定能量的粒子轰击原子核，实现原子核结构转变的过程。核反应的过程遵循质量数和电荷数守恒。

核子：质子和中子的统称。

同位素：具有相同质子数、不同中子数的原子核。

核力：使核子彼此吸引并紧密地结合在一起的力。

结合能：原子核各个核子彼此分离时的总能量与该原子核能量之差。

核裂变：重核受到中子轰击后分裂成中等质量的原子核，同时放出能量的核反应。

核聚变：某些轻核结合成质量较大的原子核，并放出能量的核反应。

自然界四种相互作用：强相互作用、弱相互作用、电磁相互作用和引力相互作用。

· 基本方法

通过天然放射现象、质子和中子发现过程的学习，感受利用证据进行科学推理的方法。

通过对原子核的衰变、裂变、聚变的分析，体会守恒思想。

通过对自然界四种基本相互作用的学习，感悟物理学规律普适性和统一性的思想。

· 知识结构图

复习与巩固

1. 简述当人们发现质子后为什么认定原子核中一定还有不带电的未知粒子。

2. 衰变、核裂变、核聚变和人工核转变是 4 种不同类型的原子核变化。请判断下列方程的原子核变化类型。

（1）$^{235}_{92}\mathrm{U}+{}^{1}_{0}\mathrm{n}\rightarrow{}^{140}_{54}\mathrm{Xe}+{}^{94}_{38}\mathrm{Sr}+2{}^{1}_{0}\mathrm{n}$

（2）$^{24}_{11}\mathrm{Na}\rightarrow{}^{24}_{12}\mathrm{Mg}+{}^{0}_{-1}\mathrm{e}$

（3）$^{2}_{1}\mathrm{H}+{}^{3}_{1}\mathrm{H}\rightarrow{}^{4}_{2}\mathrm{He}+{}^{1}_{0}\mathrm{n}$

（4）$^{19}_{9}\mathrm{F}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}\rightarrow{}^{22}_{10}\mathrm{Ne}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}$

3. 有人认为 α 粒子散射实验中使 α 粒子发生偏转的力是核力。简要评价这一观点。

4. 以表格形式列举阴极射线和 β 射线的异同。

5. eV/c^2 是高能物理中的常用单位，这个单位对应什么物理量？简述理由并将 1 MeV/c^2 换算成基本单位。

6. 简述我国科学家如何利用放射性同位素证明人工牛胰岛素与天然牛胰岛素是同一种物质。

7. 某放射性元素经过 6 天后只剩下八分之一没有衰变，它的半衰期是多少天？为估算某水库的库容，可取一瓶含该放射性元素的无毒水溶液，测得瓶内溶液 1 min 衰变 8×10^7 次。现将这瓶溶液倒入水库，8 天后在水库中取水样 1.0 m^3（可认为溶液已均匀分布），测得水样 1 min 衰变 20 次，估算水库的容积。

8. 自然界里有一些放射性重元素会发生一系列连续的衰变，形成放射性元素系。根据图 15–34，判断锕系元素由 U 衰变为 Pb 的过程有几次 α 衰变、几次 β 衰变？

9. 简略比较核能与常规能源。

10. 正负电子湮灭会产生一对 γ 光子，历史上物理学家将 0.51 MeV 的 γ 辐射作为发现正电子的证据。简述理由。（电子质量为 9.11×10^{-31} kg、电子电荷量大小为 1.60×10^{-19} C）

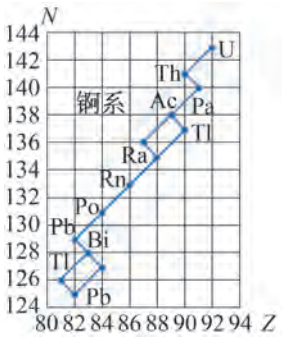


图 15–34

附录

索引

阿伏加德罗常数 / 4
半衰期 / 98
表面张力 / 30
玻尔理论 / 72
波粒二象性 / 86
玻意耳定律 / 21
不浸润 / 31
布朗运动 / 6
查理定律 / 25
等容线 / 25
等温线 / 21
等压线 / 25
电子 / 65
电子云 / 92
放射性 / 96
放射性元素 / 96
非晶体 / 34
分子动理论 / 9
分子平均动能 / 48
分子势能 / 48
盖·吕萨克定律 / 25
各向同性 / 35
各向异性 / 35
光电效应 / 80
光电子 / 80
光谱 / 70
光子 / 82
核反应 / 99
核聚变 / 108
核力 / 104
核裂变 / 106
基本相互作用 / 115
结合能 / 105
浸润 / 31
晶体 / 34
绝对零度 / 25
绝热过程 / 51
扩散 / 6

理想气体 / 27
链式反应 / 106
毛细现象 / 32
内能 / 48
能级 / 73
能量守恒定律 / 53
平均结合能 / 105
热力学第二定律 / 55
热力学第二定律的开尔文表述 / 56
热力学第二定律的克劳修斯表述 / 55
热力学第一定律 / 52
热运动 / 7
弱相互作用 / 111
衰变 / 97
天然放射现象 / 96
同位素 / 102
物质波 / 88
原子的核式结构模型 / 68
枣糕模型 / 66

后记

本教材根据教育部颁布的《普通高中物理课程标准（2017 年版）》编写并经国家教材委员会专家委员会审核通过。

本教材是在上海市高中物理“二期课改”教材的基础上全面改写而成的，当年参加编写的主要人员有张越、徐在新、刘齐煌、谭玉美、唐一鸣、冯容士、蒋元方、倪闽景、王铁桦等。王铁桦、朱广天、汤清修、陈刚、金松、胡卫平、袁芳、桑嫣、潘苏东等给本教材的编写提出了不少宝贵意见。马世红、王祖源、陆昉、陈树德、蒋平、冀敏在本教材编写的各个阶段审阅了书稿。编写过程中，上海市中小学（幼儿园）课程改革委员会专家工作委员会，上海市教育委员会教学研究室，上海市课程方案教育教学研究基地、上海市心理教育教学研究基地、上海市基础教育教材建设研究基地及基地所在单位华东师范大学，上海市物理教育教学研究基地（上海高校“立德树人”人文社会科学重点研究基地）及基地所在单位复旦大学给予了大力支持。在此一并致谢。

本教材出版之前，我们就教材中使用的照片、图片等选用作品，通过多种途径与作者进行了联系，得到了他们的大力支持，在此表示衷心的感谢！对于未联系到的作者，我们也希望作者能及时联系出版社，以便支付相应的稿酬。

欢迎广大师生来电来函指出教材的差错和不足，提出宝贵意见。

2020 年 5 月

本册教材图片提供信息：

本册教材中的图片由视觉中国、IC photo 等提供。

物理 选择性必修 第三册

ISBN 978-7-5478-5296-5

定价：10.10元

绿色印刷产品

YOUJ
365优教
大学生共享家教联盟

致力于用榜样的力量提升学生成绩的共享家教平台

中国家庭教育学会荣誉会员单位

985/211大学生

1对1上门辅导

找家教就像叫“代驾”一样简单

家长们都在偷偷用的家教预约神器

记得拍照留存哦

扫码关注 预约上门

关注送200元优惠券

小初高全科辅导

学霸云集任您挑

学历真实可担保

与优秀大学生同行，激发孩子无限潜能

微信搜索公众号：365优教网

咨询热线：4000—711—365

YOUJ优教

既是找老师，更是找榜样

家教老师全国招募中