



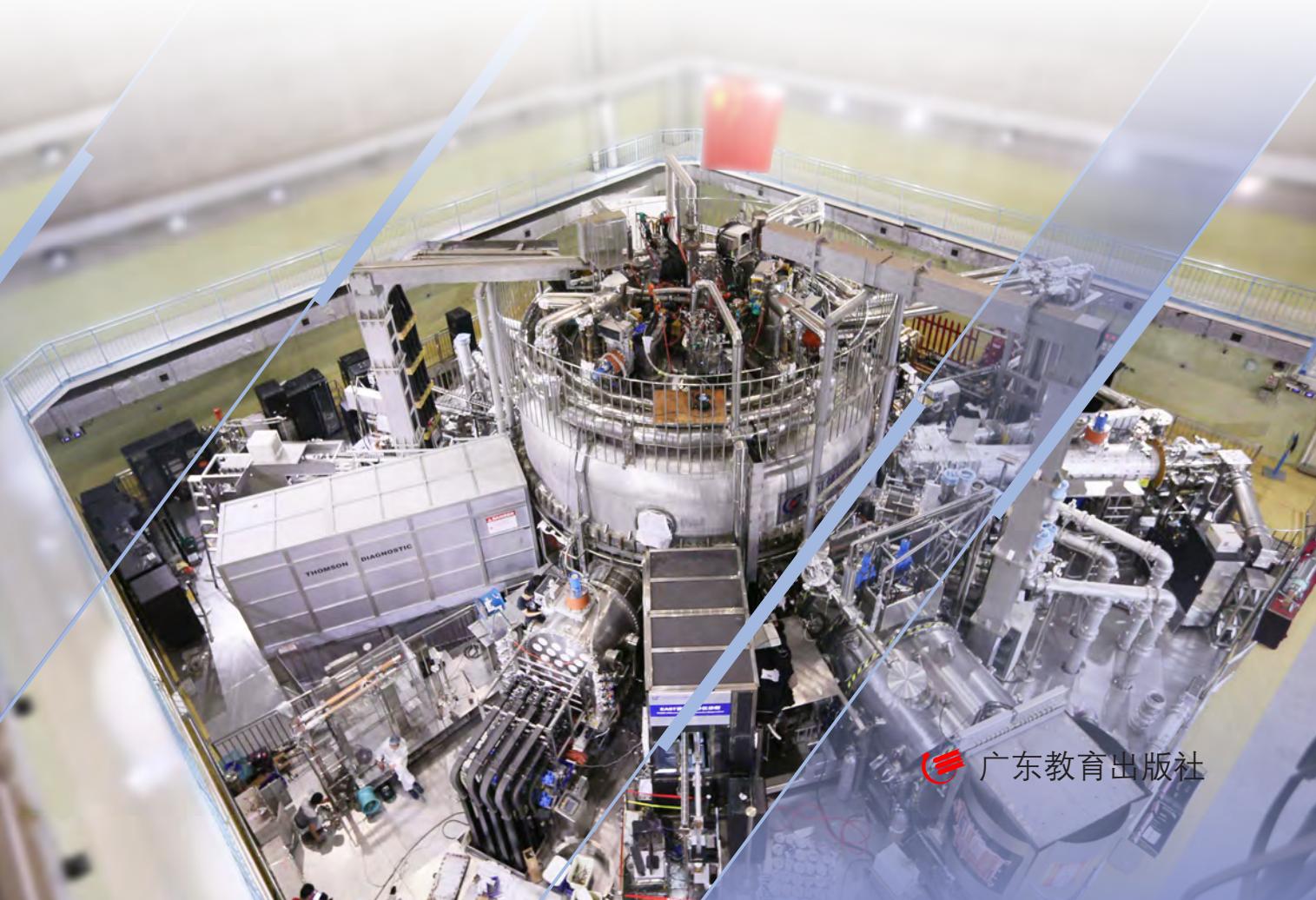
普通高中教科书

W U L I

物理

选择性必修

第三册



广东教育出版社

普通高中教科书

物理

选择性必修

第三册

主编 熊建文



 广东教育出版社
·广州·

图书在版编目(CIP)数据

物理：选择性必修. 第三册 / 熊建文主编. —广州：
广东教育出版社，2020.2 (2021.12重印)

普通高中教科书

ISBN 978-7-5548-2983-7

I. ①物… II. ①熊… III. ①中学物理课—高中—教材

IV. ①G634.71

中国版本图书馆CIP数据核字 (2019) 第186192号

编写单位 广东教育出版社

主 编 熊建文

副 主 编 王笑君 姚跃涌

本册主编 王笑君

本册副主编 周少娜

核心编写人员(以姓氏笔画为序)

朱建平 许桂清 李朝明

吴洪文 何琴玉 张军朋

段红民

出版人 朱文清

责任编辑 李敏怡 李浩奇 蔡潮生

责任技编 杨启承 陈瑾

装帧设计 何维 梁杰

物理 选择性必修 第三册

WULI XUANZEXING BIXIU DISANCE

广东教育出版社出版

(广州市环市东路472号12-15楼)

邮政编码：510075

网址：<http://www.gjs.cn>

广东新华发行集团股份有限公司发行

广州市新思程印刷有限公司印刷

(广州市番禺区沙头街大富村白仙岗4号)

890毫米×1240毫米 16开本 8.75印张 220 000字

2020年2月第1版 2021年12月第5次印刷

ISBN 978-7-5548-2983-7

定价：10.32元

批准文号：粤发改价格〔2017〕434号 举报电话：12315

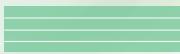
著作权所有·请勿擅用本书制作各类出版物·违者必究

如有印装质量或内容质量问题，请与我社联系。

质量监督电话：020-87613102 邮箱：gjs-quality@nfcb.com.cn

购书咨询电话：020-87772438

前言



欢迎进入《物理》选择性必修第三册的学习.

18世纪，蒸汽机的发明，使人类摆脱了人力、畜力、水力等对生产和生活水平的约束，从此人类进入了机械化工业时代。随着各种机械的改进、效率的提高，人们开始构想各种永动机的制造。此时的人们认为“热”是物体内所含的一种看不见、无质量的特殊物质。直到1798年，英国物理学家伦福德（Rumford，本名本杰明·汤普森，B. Thompson，1753—1814）对钻制炮孔大量放热的现象进行研究，才让人们认识到“热”实质是运动的一种形式。英国物理学家焦耳（J. P. Joule，1818—1889）在1840—1849年间通过磁电机、桨叶搅拌、水通过多孔塞、空气压缩和膨胀等多项实验，测得大量热功当量的数据，用实验结果证明了内能和机械能及电能间的相互转化。大量的事实表明，不同形式的能量可以相互转移与转化，能量守恒定律是自然界的一条基本规律，这为工业革命、科学技术的发展找到了正确的方向。

在物质的组成方面，我国古代学者根据自然界万物的变化，认为金、木、水、火、土是构成物质的基本元素。古希腊哲学家德谟克里特（Democritus，约前460—约前370）由很远就可闻到面包的香味，提出物质由不可再分割的“原子”构成。1800年前后，英国物理学家、化学家道尔顿（J. Dalton，1766—1844）根据某些物质化合成为另一种物质时，总是按相同的比例相互结合，提出了物质的原子学说。1827年，英国植物学家布朗（R. Brown，1773—1858）在显微镜下找到了分子（原子）不停地做无规则运动的间接证据。直到1981年，人类首次通过扫描隧道显微镜直接观察到原子（或分子）的影像。影像虽然模糊，但人们总算“看到”了原子。至于对原子内部结构的认识，则经历了J. J. 汤姆孙（J. J. Thomson，1856—1940）的“枣糕模型”、卢瑟福（E. Rutherford，1871—1937）的核式结构、玻尔（N. Bohr，1885—1962）的能级结构等一系列模型，人们在“实验—假说—实验验证—修正假说—再验证”的不断探索中，逐渐接近事物的真相。

今天，人们普遍认识到物质由分子和原子构成，原子由原子核与核外电子构成，原子核则由质子和中子构成。这些“常识”的获得，都是千百年来不满足于对事物表象认识的思想家、科学家们艰辛努力的结果。其中，科学假说及科学模型既是还原事物真相的一种尝试，也是探索者们智慧的闪现，实验则是科学发展的基石和检验真理的试金石。

在本书中，我们将追寻先人们探索物质世界的足迹。通过油膜法测定分子的大小，

了解分子动理论的基本观点；了解气体、液体和固体的基本物理性质，探寻它们的微观结构；通过热力学定律的学习，体会能量守恒定律是自然界最基本、最普遍的规律，了解到宏观自发过程的不可逆性，形成节能的意识；了解原子及原子核的构成，通过光及实物粒子的波粒二象性、量子论等内容的学习，建构起完整的、科学的物质观念，了解模型建构的方法和意义，体会和掌握测量微观量的思想和方法。

学习物理是一个动手动脑、体验物理学魅力的过程，为此，本书设计了一系列引人入胜的栏目。“观察与思考”栏目，锻炼我们观察、描述、分析物理现象的能力。“实验与探究”栏目，使我们体会问题、证据、解释、交流等要素在开展科学探究中的重要性。“讨论与交流”栏目，使我们展示对物理问题的见解，感受思维碰撞的乐趣。“实践与拓展”栏目，使我们发散思维，在实践性的课题探索中提升创新能力，认识科学、技术、社会与环境发展的关系。“资料活页”栏目，让我们感悟物理学史上科学家们的智慧，感受前沿科技的成就。“练习”和“习题”栏目，巩固我们对物理概念与规律的理解以及解决实际问题的方法。“本章小结”栏目，通过知识结构图梳理全章的知识主线，让我们回顾和整理学习成果，反思自己的学习情况。

学习物理，不仅是为了记住物理概念和认识物理规律，而且还可以帮助我们形成正确的物理观念，指导我们认识自然万物；培养科学思维，辩证地分析实际生产和生活中遇到的问题；学会科学探究的方法，培养基于观察和实验探究自然规律的能力；形成正确的科学态度与社会责任意识。这些才是物理学习的要义，让我们共同努力！

目录



第一章 分子动理论 1

第一节 物质是由大量分子组成的	2
第二节 分子热运动与分子力	7
第三节 气体分子运动的统计规律	12



第二章 气体、液体和固体 19

第一节 气体实验定律（I）	20
第二节 气体实验定律（II）	25
第三节 气体实验定律的微观解释	29
第四节 液体的表面张力	33
第五节 晶体	39
第六节 新材料	45



第三章 热力学定律 55

第一节 热力学第一定律	56
第二节 能量守恒定律及其应用	61
第三节 热力学第二定律	66



第四章 波粒二象性

75

第一节	光电效应	76
第二节	光电效应方程及其意义	81
第三节	光的波粒二象性	86
第四节	德布罗意波	89
第五节	不确定性关系	93



第五章 原子与原子核

101

第一节	原子的结构	102
第二节	放射性元素的衰变	108
第三节	核力与核反应方程	113
第四节	放射性同位素	118
第五节	裂变和聚变	124

第一章 分子动理论

早在两千多年前，古希腊哲学家德谟克里特就认为万物是由不可再分割的微粒组成的，并把这种微粒称为原子。19世纪，人们通过化学实验确定，物质是由大量分子组成的，分子是构成物质并保持物质化学性质的最小微粒。分子由原子组成，有些物质的分子只包含一个原子，有些物质的分子包含多个原子，一些有机大分子则包含上百个甚至成千上万个原子。

在本章的学习中，我们将从宏观现象入手，寻找微观世界分子运动的证据，估测分子的大小，感受分子间的相互作用，了解分子动理论的基本观点，初步学习如何通过建立简化模型、应用统计观点，从微观角度说明宏观物体热现象的方法。



第一节

物质是由大量分子组成的

组成物质的微粒是多种多样的，或是原子（如金属），或是离子（如盐类），或是分子（如有机物）。在本章的学习中，为了简化，我们把构成物质的微粒统称为分子。那么组成物质的分子有多大？怎样描述分子的数量呢？

分子的大小

组成物质的分子很小，不仅用肉眼无法看到它们，而且用高倍的光学显微镜也观察不到。20世纪80年代，人类首次使用可放大上亿倍的扫描隧道显微镜观察到单个的分子或原子。图1-1-1是用扫描隧道显微镜获得的硅晶体表面的原子排列图。一般来说，不同物质分子大小不同，通常是 10^{-10} m 的数量级，也有一些塑料、合成纤维等高分子化合物，其分子大小的数量级可达到 10^{-7} m 。

分子如此小，能否通过简单的实验来估测它的大小呢？根据油酸分子的特性，人们巧妙地设计了油膜法实验来粗略测量分子的大小。当我们把油酸滴在水面上时，密度较小的油酸会在水面散开，形成极薄的一层油膜。油酸分子中较大的“头部”（烃链 $\text{C}_{17}\text{H}_{33}-$ ）不溶于水，而很小的“尾巴”（羧基—COOH）对水有很强的亲和力。因此，油酸分子在水中会竖起来，“头部”露出水面，而“尾巴”则留在水中。若水面足够大，油膜展开得足够充分，则油酸分子就会一个挨一个整齐地紧密排列在水面上，形成单分子层油膜，如图1-1-2所示。若将油酸分子视为球体，忽略分子间距离，则只需测算出一滴溶液中纯油酸的体积 V 和在水面形成的油膜面积 S ，根据 $d = \frac{V}{S}$ 可算出油膜的厚度，即可估测出油酸分子的直径大小。

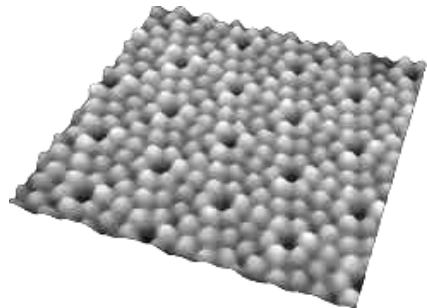


图1-1-1 硅晶体
表面原子的排列



图1-1-2 单分子层
油膜示意图



实验与探究

利用油膜法估测油酸分子的大小.

测算 1 滴溶液中纯油酸的体积 V . 如图 1-1-3 所示, 用滴管将体积分数为 0.2% 的油酸酒精溶液滴入量筒, 根据溶液体积分数、滴数和体积的关系, 可以测算出 1 滴溶液中油酸体积的平均值.

测量油膜面积的关键是让油膜形成明显的边界. 在水平放置的浅盘(约 $30\text{ cm} \times 40\text{ cm}$) 中倒入约 2 cm 深的水, 用纱网(或粉扑) 将适量痱子粉均匀地轻轻撒在水面上, 如图 1-1-4 所示. 用滴管将 1 滴油酸酒精溶液轻轻滴入水面中央, 如图 1-1-5 所示. 油酸立即在水面散开, 形成一块油膜, 通过痱子粉可以清楚地看出油膜的轮廓. 待油膜形状稳定后, 在浅盘上盖上带有网格线的透明塑料盖板, 用彩笔描出油膜的轮廓, 如图 1-1-6 所示. 估算出油膜的面积 S .



图 1-1-3



图 1-1-4



图 1-1-5

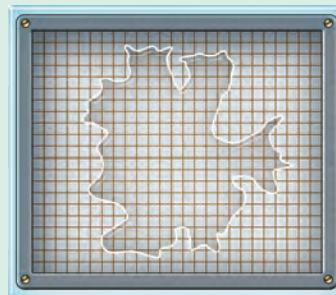


图 1-1-6

洗净浅盘, 擦去塑料盖板上的油膜轮廓线, 重复实验 2~3 次. 将实验数据填入自己设计的表格中, 然后利用公式 $d = \frac{V}{S}$ 计算出油酸分子的直径, 并取其平均值. 思考下列问题:

- (1) 实验中使用酒精来稀释油酸, 请分析为何要稀释油酸.
- (2) 上述实验产生误差的主要原因有哪些?

油酸分子大小的理论值是 $1.12 \times 10^{-9}\text{ m}$, 即使用高倍光学显微镜也无法直接观测, 更无法直接测量. 上述实验借用宏观的体积、面积来估测微观的分子直径, 这是一种借宏观量来研究微观量的方法.

阿伏伽德罗常数

如果把分子看成小球，则一般分子直径的数量级约为 10^{-10} m。例如，水分子直径约为 4.0×10^{-10} m，氢分子直径约为 2.3×10^{-10} m。如果我们比较水分子跟乒乓球的大小，就像比较乒乓球与地球的大小一样，可见两者相差悬殊。

分子很小，则构成物质的分子数目必定很大，我们能否估算这一数目究竟有多大呢？

例题：已知水分子的直径约为 4.0×10^{-10} m，请尝试设计一个案例能让人直观地感受到水分子数目的巨大。如果要数出这些分子，需要多少年才能数完？

分析：本题未明确指出究竟要计算多少水中水分子的数目，可以是一杯水、一壶水，也可以是一桶水，可任选一样来进行计算。

解：假设我们喝下一口水，这口水的体积约为 20 mL，可估算这口水中水分子的数目。设水分子为球体，忽略分子间隙，则水分子的数目为

$$N = \frac{V_{\text{总}}}{V_{\text{分子}}} = \frac{20 \times 10^{-6}}{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{4 \times 10^{-10}}{2}\right)^3} \approx 6 \times 10^{23}.$$

1 年的时间为

$$t = 365 \times 24 \times 3600 \text{ s} \approx 3.15 \times 10^7 \text{ s}.$$

若每秒钟数 2 个，不停歇地数，数完这些水分子所需的时间为

$$t' = \frac{N}{2t} = \frac{6 \times 10^{23}}{2 \times 3.15 \times 10^7} \approx 9.5 \times 10^{15} \text{ (年)} = 9.5 \times 10^7 \text{ (亿年)}.$$

我们在化学课中学过，1 mol 的任何物质所含的分子（或原子）数目都相同，这个数目被称为阿伏伽德罗常数（Avogadro constant），用符号 N_A 表示，在通常的计算中取 $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。例如，1 mol 水的质量是 18 g，1 mol 氧气在 1 个标准大气压、0℃ 的状况下，体积是 22.4 L，它们所包含的分子数都是 6.02×10^{23} 个。

阿伏伽德罗常数是一个重要的常数。它是联系摩尔质量、摩尔体积等宏观物理量与分子质量、分子大小等微观物理量的桥梁，在定量研究热现象时常会用到它。

实践与拓展

历史上，人们曾通过测量分子的大小来估算阿伏伽德罗常数。请查阅相关资料，尝试通过分子的大小估算出阿伏伽罗常数，并将你的结果与课本中的阿伏伽德罗常数相比较。

原子—分子论

物质是由什么构成的？这一问题困扰了人类近两千年。战国时期的《庄子·天下篇》中有“一尺之棰，日取其半，万世不竭”之说，古希腊哲学家德谟克里特则认为万物的本源是“原子”，“原子”是一种不可分割的物质微粒。

1800年前后，英国物理学家、化学家道尔顿发现了关于原子的第一个证据。道尔顿注意到，当某些物质结合生成另一种物质时，它们总是按重量的简单比值相互结合。例如，当氢气与氧气结合生成水时，两种物质的重量比总是 $1:8$ 。如果物质无限可分，就难以理解为什么会有这样的比值，但如果物质是由原子构成的，那么就可以成为其简单的解释。道尔顿把这些实验事实总结概括并加以分析，提出了著名的原子论断：所有物质均由不可分割的原子组成；任一元素的原子性质，包括重量，都完全相同；不同元素的原子重量不同；在所有的化学反应中，所有原子都保持原貌，不会消失。

现在看来，道尔顿关于原子的论断并不完备，然而道尔顿的原子论与德谟克里特的原子论相比较，已有较为充分的科学依据。正是这种坚持依靠证据的思维及方法，使得古代朴素的原子论思想发展成为科学的原子论。

意大利物理学家、化学家阿伏伽德罗（A. Avogadro, 1776—1856）于1811年发表文章，在物质和原子这两种物质层次之间引进一个新的层次——分子，用以解释当时的许多实验事实。阿伏伽德罗认为：对化合物而言，分子即相当于道尔顿所谓的“复杂原子”；对元素单质而言，同样也包含这样一个层次，只不过由几个相同的原子结合成分子。气体物质无论是元素单质还是化合物，其体积与分子数目之间存在着非常简单的关系，即相同温度和压强下，相同体积的任何气体，其中所含的分子数目总是相等的。后来，人们为了纪念阿伏伽德罗的贡献，把1 mol 任何物质中含有的微粒数目称为阿伏伽德罗常数。

阿伏伽德罗常数的提出和测定，使得人们开始在原子—分子水平上认识物质的结构和性质，这标志着人类对物质的探索研究步入微观领域，对自然科学的发展产生了深远的影响。



图1-1-7 道尔顿



练习

1. 在“用油膜法估测分子的大小”的实验中，实验用的盛水浅盘长为40 cm，宽为30 cm。若将油酸分子所占空间视作立方体，其所占体积的边长为 1.12×10^{-9} m，将1滴体积为0.05 mL的纯油酸滴在水面上。

(1) 若该滴油酸形成单分子层油膜，则面积有多大？

(2) 要想这1滴油酸滴在水中时，油酸的油膜能最大限度地展开，同时油膜展开后又不会占满整个盛水浅盘，则至少要将该滴油酸稀释多少倍？

2. 在“用油膜法估测分子的大小”的实验中，所用油酸酒精溶液的体积分数为0.05%，用小量筒测得180滴该溶液约为3 mL。现把1滴该溶液滴入盛水的浅盘里，待水面稳定后，将带有网格线的透明塑料盖板放在浅盘上，用彩笔在塑料盖板上描出油膜的轮廓，其形状和尺寸如图1-1-8所示。塑料盖板上的小方格边长为1 cm，试求：

(1) 油酸膜的面积。

(2) 1滴油酸酒精溶液中含有纯油酸的体积。

(3) 按以上实验数据估测出油酸分子的直径。

3. 环境与人类健康问题越来越受到重视，公共场所都贴有禁止吸烟的标志。在一个面积约 10 m^2 的办公室内，如果因一人吸烟使得办公室内空气中有害气体的分子数占分子总数的万分之五，假设有害气体在室内空气中均匀分布，已知此时室内空气摩尔体积为22.4 L/mol，试估算：

(1) 该办公室内的人每呼吸一次，吸入的有害气体的分子数。（按人正常呼吸一次吸入的气体约为500 mL计算）

(2) 室内空气中每两个有害气体分子的间距。

4. 雨后，湖中荷叶上有1滴体积约为 0.1 cm^3 的水珠，已知水的密度 $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，水的摩尔质量 $M = 1.8 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$ ，试估算：(结果保留两位有效数字)

(1) 该滴水珠含有的水分子数。

(2) 一个水分子的直径大小。

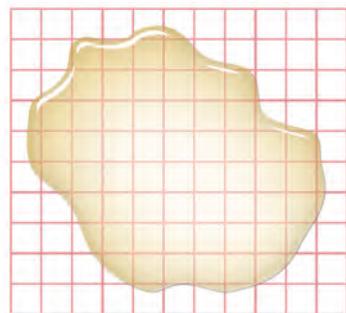


图 1-1-8



图 1-1-9

第二节 分子热运动与分子力

我们已经知道物质是由大量分子组成的，那么，物质内的分子是以怎样的方式聚集在一起的呢？它们之间是否存在相互作用？分子是处于静止状态，还是在不停地运动呢？下面一起来追寻问题的答案。

扩散现象

我们走进饭店，常会闻到饭菜的味道；用完的水彩画笔放在水杯中，杯中的水会慢慢变色。初中学过的知识告诉我们，这些日常生活中的现象都与分子运动有关。

下面我们通过实验进行观察与分析。

观察与思考

- 如图 1-2-1 所示，在一滤纸条上间隔一定距离各滴上一滴酚酞试剂后，将其插入水平放置的试管中，在试管开口处放上一小团棉花（棉花不与滤纸条接触）。用滴管在棉花团上滴上几滴浓氨水后，用胶塞将试管封闭。注意观察试管中滤纸条的颜色变化。

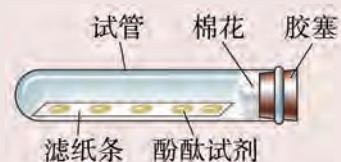


图 1-2-1

- 取两个相同的玻璃杯，在一个杯中倒入凉水，另一个杯中倒入相同体积的热水，然后在两杯中同时轻轻滴入一滴红墨水，注意观察杯中水的颜色变化情况。

如何解释上述实验中所出现的现象呢？

通过实验我们可以发现，试管中滤纸条从试管口向内逐渐变色，热水比凉水红得更快，这就说明无论是气体还是液体，都会发生物质迁移现象。实际上，这种现象在固体中也会发生。我们让一铅块和一金块相互紧密接触，经过一段足够长的时间，就会发现在接触面处的薄层中，铅块内渗入了少量的金，金块内渗入了少量的铅。这种现象就是分子本身不停运动的结果。

物理学中把由于分子不停地运动而产生的物质迁移现象称为扩散 (diffusion). 由上面的实验可知, 温度越高, 物质扩散得越快. 扩散现象说明了物质中的分子在不停地运动着. 那么, 能否通过实验进一步说明, 分子是在做无规则的运动呢?

布朗运动

1827 年, 英国植物学家布朗在用显微镜观察花粉微粒的水溶液时, 发现花粉在不停地做无规则的运动. 下面我们也来做一下这个实验.



观察与思考

在载玻片上滴一滴清水, 把载玻片放在显微镜下, 如图 1-2-2 所示, 调节显微镜手轮, 直到能看到清晰的水滴影像.

把一小滴碳素墨水滴在载玻片的水滴上, 将载玻片放在显微镜下观察炭微粒的运动现象, 如图 1-2-3 所示.

1. 观察炭微粒运动方向情况.
2. 追踪一个炭微粒的运动: 在显微镜影像显示屏上固定一张透明的坐标纸, 在坐标纸上追踪显示某一微粒的运动, 调节节拍器的节拍周期为 5 秒左右, 每次听到节拍器的响声, 就用笔描下这个微粒此时的位置, 并按顺序进行数字编号, 大约取 10 个点. 如图 1-2-4 所示, 把这些点按时间顺序依次连接起来, 得到一条折线.



图 1-2-2 实验装置

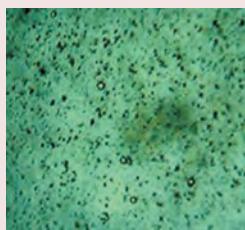


图 1-2-3 显微镜中的影像

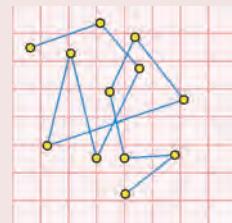


图 1-2-4 炭微粒运动情况折线图

从实验中得出的折线图来看, 这个微粒的运动是有规则的, 还是无规则的?

从实验现象可见, 微粒运动的方向是不断改变的, 而且是无规则的. 后来, 人们把悬浮在液体或气体中的微粒做的这种无规则运动叫作布朗运动 (Brownian motion).

布朗运动究竟是怎么产生的? 开始时, 人们以为是外界因素, 比如液体受到振动或对流等引起的, 但是在尽量消除外界因素影响的实验条件下, 布朗运动仍然存在. 布朗运动的起因问题困扰了人类大半个世纪, 直到 1905 年, 爱因斯坦才从理论上解释了布朗运动.

他认为，布朗运动是大量液体分子对悬浮微粒的不平衡撞击引起的，是大量液体分子不停地做无规则运动所产生的结果。

悬浮在液体中的微粒周围存在大量做无规则运动的液体分子，它们不停地对悬浮微粒进行撞击，如图 1-2-5 所示。一个微粒每秒大约要受到它周围液体分子 10^{21} 次的碰撞。由于液体分子运动的无规则性，在任一瞬间，从不同方向撞击悬浮微粒的液体分子数目各不相同，碰撞的冲击力也不一样。有时沿某一方向的撞击较强，微粒就顺着这一方向运动；当另一方向的撞击较强时，微粒就会改变运动方向。由于液体分子运动的无规则性，使微粒受较强撞击的方向是偶然性的，所以布朗运动是无规则的。我们观察到的悬浮微粒的无规则运动，实际上间接地反映了液体内部的分子在不停地做无规则的运动。

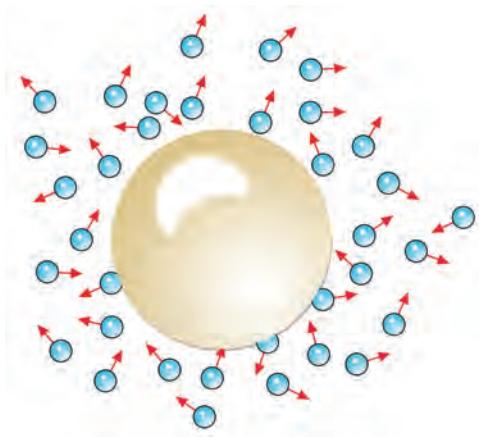


图 1-2-5 一个微粒每秒大约要受到它周围液体分子 10^{21} 次的碰撞

扩散现象和布朗运动的实验还表明，温度越高，分子的扩散越快，悬浮微粒运动就越激烈。这表明物质的温度高低与物质内部分子无规则运动的剧烈程度直接相关，温度越高，分子的无规则运动越剧烈。可以说温度是物质内部分子无规则运动剧烈程度的量度。因此，物理学中把物质内部大量分子的无规则运动称为热运动 (thermal motion)。

分子力

我们日常使用的樟脑丸，由于分子的热运动，最终会挥发殆尽，然而它却能聚成一个硬块且很不容易掰开，这又是为什么呢？人们猜想有可能是因为分子间存在相互吸引的力。下面通过实验验证这种引力的存在。

观察与思考

取两段直径为 2 cm 左右的铅柱，把它们的断面切平磨光，然后用力把两个光滑的面对齐压紧，这两段铅柱就“粘”在一起了，而且下端可以吊起 1 kg 甚至更重的物体，如图 1-2-6 所示。

为什么把铅柱断面切平磨光并且用力对齐压紧，两段铅柱就能“粘”在一起？



图 1-2-6 “粘”在一起的铅柱吊起重物

以上实验表明，物质的分子间存在引力，而且该引力发生作用的距离很小。正是这种相互吸引的作用，才使得大量分子聚集在一起形成固体或液体。我们还知道，固体和液体是很难被压缩的。这说明分子之间除了有引力，还存在斥力。

分子间的相互作用一般不能由实验直接测定，但可以在一定的实验基础上，采用一些简化模型，如假设分子间的相互作用具有球对称性等来加以研究。研究表明，分子间同时存在着引力和斥力，通常表现出来的是它们的合力。分子间引力和斥力的大小都跟分子间的距离有关。图 1-2-7 中的虚曲线分别表示两个分子间的引力和斥力随其距离变化的情形，实线表示引力和斥力的合力，即实际表现出来的分子力随距离变化的情形。由图中可见，当两个分子间的距离等于某一值 r_0 时，分子间的引力和斥力平衡，分子间的作用力为 0。对于不同物质的分子， r_0 的数值稍有不同，数量级约为 10^{-10} m。当分子间的距离小于 r_0 时，分子间的作用力表现为斥力；当分子间的距离大于 r_0 时，分子间的作用力表现为引力；当分子间的距离大于 10^{-9} m 时，分子间的作用力就已十分微弱，可以忽略不计。

分子间的作用力本质上是一种电磁力。分子由原子组成，原子内部有带正电的原子核和带负电的电子，分子间的作用力是由这些带电粒子的相互作用引起的。

19 世纪以后，人们通过对物质微观结构的进一步研究，逐渐建立起分子动理论 (molecular kinetic theory)，其基本观点是物质是由大量分子组成的；分子总在不停地做无规则运动，运动的剧烈程度与物质的温度有关；分子间存在相互作用的引力和斥力。

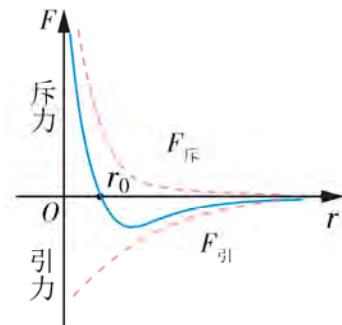


图 1-2-7 分子间作用力与分子间距离关系的示意图

资料活页

壁虎脚下的秘密

许多年来，人们对壁虎能轻松“走壁”的秘诀一直众说纷纭，壁虎脚底的黏着力究竟是怎样产生的呢？很多人认为，壁虎能贴在光滑的天花板上，靠的是四只脚掌上神奇的吸盘，其实情况并非如此。最新的研究表明，看上去不起眼的壁虎，居然是自然界数一数二的“应用物理大师”。它脚底的力量，利用的是最基本的物理学原理——分子作用力。

由于分子作用力过于微弱，通常没有人会注意到。比如，当我们把手贴在墙壁上时，也会产生分子作用力，但由于实际接触面积太小，人的手掌不会被吸附到墙壁上。而壁虎就不一样了，它的每只脚底部长着数百万根极细的刚毛，而每根刚毛末端又有 400~1000 根更细的分支。这种精细结构使得刚毛与物体表面分子间的距离足够近，从而产生分子间引力。虽然每根刚毛产生的力量微不足道，但累积起来就很可观。根据计算，一根刚毛产生的力能提起一只蚂蚁，而一只壁虎如果同时使用全部刚毛，则能够提起 125 kg 的重物。



图 1-2-8 壁虎脚底结构

在壁虎脚趾微结构的启示下，科学家开始研制超级附着技术。例如，有人就模仿壁虎脚趾的微结构研制出一种柔韧的胶布，上面植入上百万根人工合成的、长度不足 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的绒毛，未来可用于无人探测器，增强其越野攀爬能力。

练习

1. 下列各种现象，能否说明分子在不停地运动？为什么？

- (1) 海绵吸水。
- (2) 汽车疾驶而过，落叶飞扬。
- (3) 将香水瓶盖打开后能闻到香味。
- (4) 洒在地上的水，过一段时间就干了。
- (5) 大雾天，空气悬浮着许多小水滴。
- (6) 堆煤的墙角，一段时间后墙体变黑。
- (7) 悬浮在水中的花粉碎末做无规则的运动。
- (8) 在一杯水中放一勺盐，过一段时间后，整杯水会变咸。

2. 微粒的直径小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ ，才能明显观察到布朗运动实验现象，一般来说，花粉的直径为 $30\sim50\text{ }\mu\text{m}$ ，几乎无法观测到布朗运动。在布朗的手稿中，“tiny particles from the pollen grains of flowers”的意思是“从花粉粒中迸出的微粒”，并不是指花粉本身。请从布朗运动的产生机理出发解释：为什么直径大的花粉很难发生布朗运动，而直径小的“从花粉粒中迸出的微粒”比较容易发生布朗运动？为什么温度越高，布朗运动越激烈？

3. 俗话说“破镜难圆”，然而在光学镜头制作中有一种工艺，是将两个镜面研磨得非常光滑后把它们贴放在一起，不用任何黏合剂它们就会紧紧地粘在一起。而通常焊接钢梁，是用电焊机将钢梁的断面熔化从而将钢梁连接起来。请根据分子力的特性来解释这些现象。

第三节

气体分子运动的统计规律

19世纪中叶，人们从“物质是由大量无规则运动的分子组成的”这一观点出发，对微观粒子间相互作用的性质和规律以及热现象的微观过程提出模型和假设，探究其统计规律。统计规律是大量随机事件整体表现出的规律，它表现了这些事件整体的必然联系。下面我们以气体分子运动为例探究气体分子运动的统计规律。

分子沿各个方向运动的概率相等

在抛硬币游戏中，把一枚硬币抛起来后落到地面，硬币的正面向上还是反面向上完全是随机的。当抛币的次数非常多时，硬币正面向上和反面向上的概率是相等的。这表明个别事件的出现具有随机性，但大量事件出现的概率遵从一定的统计规律。

讨论与交流

在日常生活中，还有哪些实例表现出这种统计规律？

在标准状态下， 1 cm^3 气体中约有 2.7×10^{19} 个分子。大量分子都在做无规则运动，分子间不断发生碰撞，一个分子在 1 s 内与其他分子的碰撞次数高达 65 亿次。频繁的碰撞使得每个分子的速度大小和方向频繁地改变。尽管在某一时刻某个分子的速度大小和方向完全是随机的，但是对由大量分子组成的气体整体来说，气体中任一时刻都有向任一方向运动的分子，且气体分子沿各个方向运动的数目相等，即在任一时刻分子沿各个方向运动的概率是相等的。这里所说的“相等”是对大量分子运动情况的统计结果。

分子速率按一定的统计规律分布

气体分子沿各个方向运动的概率相等，就是大量分子在运动方向上整体表现出来的统计规律。那么，气体分子运动的速率分布是否也有一定的统计规律呢？我们先来观察一个实验。

观察与思考

如图1-3-1所示，在一块竖直放置的木板上，顶部设一漏斗形开口，木板的上半部分钉有许多规则排列的小钉子，下半部分用多块竖直的小隔板分隔出许多道等宽的狭槽，板前盖以玻璃。从木板顶部的漏斗形开口投入小球（例如小钢球），小球的直径略小于两隔板间的距离，观察小球落在狭槽内的分布情况。再连续投入大量的小球，按小球在狭槽内分布的情况，用笔在玻璃上画出一条连续的曲线。重复若干次上述实验，观察曲线形状。

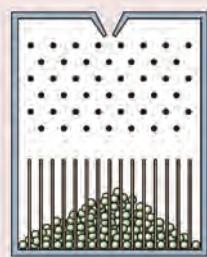


图1-3-1

实验结果表明，尽管单个小球落入哪道狭槽内是随机的，但投入大量小球时，每次实验狭槽内小球分布的情况则是一定的，而且落入某一狭槽内的小球数目与小球总数的比值是稳定的。这就是说，大量的小球落入狭槽时，其整体的分布遵从一定的统计规律。

气体分子做无规则运动，速率有的大、有的小。与上述实验类似，大量气体分子整体的速率分布也遵从一定的统计规律。研究表明，在一定的温度下，不同速率范围内的分子数在总分子数中所占的比值是确定的，表1-3-1和图1-3-2是测定氧气分子分别在0℃和100℃时速率分布的实验结果。

表1-3-1 氧气分子的速率分布

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

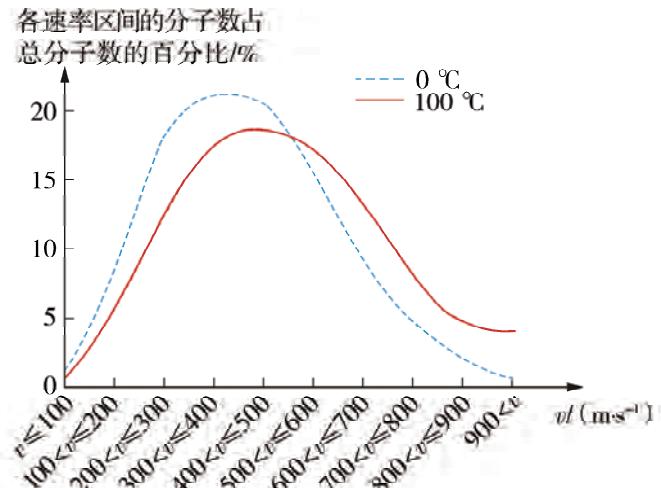


图1-3-2 氧气分子的速率分布曲线

例题：观察表1-3-1和图1-3-2，思考并回答下列问题。

(1) 由图1-3-2可以发现，氧气分子的速率分布具有什么特点？

(2) 由表1-3-1可得如图1-3-3所示的0℃氧气分子的速率分布直方图，实验时速率区间取得越窄，图中整个

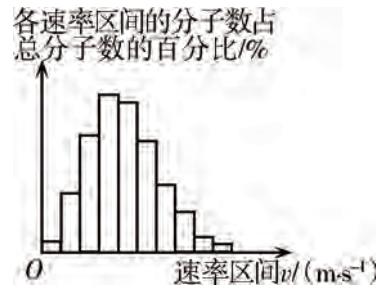


图1-3-3 0 °C氧气分子的速率分布直方图

直方图锯齿形边界就越接近一条光滑曲线。该曲线有何意义？曲线与横坐标所围的面积代表什么意义？能否求得该面积的值？

解：(1) 由图 1-3-2 可以看到，0 ℃ 和 100 ℃ 氧气分子的速率分布都呈现“中间多、两头少”的分布规律，但这两个温度下具有最大比例的速率区间是不同的，0 ℃ 时 $300 < v \leq 400$ 的分子最多，100 ℃ 时 $400 < v \leq 500$ 的分子最多。100 ℃ 的氧气，速率大的分子比例较多，其分子的平均速率比 0 ℃ 的大。

(2) 该曲线体现的是 0 ℃ 氧气分子在不同速率分子数目的分布情况，即氧气分子速率分布情况。曲线与横坐标所围面积为所有速率区间的分子数占气体总分子数的比例，故该面积的值为 1。

通过例题，我们可以知道，在一定的温度下，氧气分子的速率分布是确定的，呈现“中间多、两头少”的分布规律。当温度升高时，分子数最多的速率区间移向速率大的一方，速率小的分子数减少，速率大的分子数增加，分子的平均速率（平均动能）增大。如图 1-3-2 所示的氧气分子运动速率分布曲线直观地描述了这一规律。气体分子速率分布规律也是一种统计规律。

早在 1859 年，英国物理学家、数学家麦克斯韦 (J. C. Maxwell, 1831—1879) 就从理论上推导出气体分子速率分布的规律。60 多年后，麦克斯韦的理论研究成果第一次得到实验证实。以后随着实验方法的不断改进，气体分子速率分布规律得到高度精确的实验证明。奥地利物理学家玻耳兹曼 (L. E. Boltzmann, 1844—1906) 在麦克斯韦的基础上又得出气体分子按能量分布的规律。他们的研究成果奠定了分子动理论的基础。



实践与拓展

若对高中二年级学生的身高进行统计，是否会呈现出“中间多、两头少”的分布规律？是否所有统计的结果都会呈现出这样的分布规律呢？请用生活中的实例说明自己的观点。



练习

- 在一个正方体容器里，任一时刻与容器各侧面碰撞的气体分子数目是否相同？是完全相同吗？这是为什么？
- 由气体分子的速率分布规律可知，一般的分子热运动的速率很大，大多在 200 ~ 600 m/s 之间。但是，对于放在一个面积只有 10 m^2 的房间里的香水，打开瓶盖后，房间里的人要过一会儿才能闻到香味，这是为什么？
- 大量分子频繁地碰撞，使得某个分子的速度方向和大小完全是随机的，而向各个方向运动的分子数量相等，那么各个速率区间的分子数为什么不相等？

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



回顾与评价

1. 从相互作用的观点出发，你认为分子力的本质是什么？
2. 在“用油膜法估测分子的大小”的实验中，你认为最关键的步骤是什么？谈谈你的想法。
3. 研究气体分子速率分布规律时采用了什么统计方法？谈谈你对这种科学的研究方法的认识。

习题一

1. 下列实验能说明分子在做无规则运动的是 () .



- A. 滴在热水中的墨水使热水很快变色



- B. 断面磨平的铅块压紧后能够吊住大钩码



- C. 铅板和金板长时间压紧在一起，铅和金会互相渗透



- D. 抽去玻璃板后，两瓶中的气体逐渐混合

2. 扩散现象能说明 ().

- A. 物质是由大量分子组成的
C. 分子间存在空隙

- B. 分子间存在相互作用力
D. 分子在做无规则的运动

3. 下列关于布朗运动的说法，正确的是 ().

- A. 布朗运动是液体分子的无规则运动
B. 布朗运动是指悬浮在液体中的固体分子的无规则运动
C. 微粒越小，布朗运动越明显
D. 做布朗运动的微粒虽然不是分子，但是它的无规则运动是液体分子无规则运动的反映

4. 墨滴入水，扩而散之，徐徐混匀。下列关于该现象的分析正确的是 ().

- A. 混合均匀主要是由于炭微粒受重力作用
B. 混合均匀的过程中，水分子和炭微粒都做无规则运动
C. 使用炭微粒更小的墨汁，混合均匀的过程会进行得更迅速
D. 墨汁的扩散运动是由于炭微粒和水分子发生化学反应引起的

5. 下列关于热运动的说法，不正确的是（ ）.
- 热运动是物质受热后所做的运动
 - 加热后物质内分子做无规则的运动
 - 单个分子做永不停息的无规则运动
 - 大量分子做永不停息的无规则运动
 - 温度越高，分子无规则运动越剧烈
6. 在“用油膜法估测分子的大小”的实验中，下面的假设与该实验无关的是（ ）.
- 油膜中分子沿直线排列
 - 油膜为单分子且都是球形
 - 分子一个挨一个排列，它们的间隙可忽略
 - 油膜的体积等于总的分子体积之和
7. 为了减少“用油膜法估测分子的大小”的实验误差，下列方法可行的是（ ）.
- 将油酸酒精溶液滴在水面上时，滴管距水面距离尽可能近些
 - 先在浅盘内的水上撒一些痱子粉，再用滴管把油酸酒精溶液滴一滴在水面上
 - 用牙签把水面上的油膜尽量拨弄成规则形状
 - 油酸酒精溶液滴在水面上后，晃动水面使油酸尽可能充分扩展
 - 计算油膜面积时，舍去所有不满一格的方格
8. 下列关于气体分子运动的说法，正确的是（ ）.
- 某一时刻具有任一速率的分子数目是相等的
 - 某一时刻一个分子速度的大小和方向是随机的
 - 某一时刻向任意一个方向运动的分子数目基本相等
 - 某一温度下每个气体分子的速率不会发生变化
9. 下列关于气体分子运动的说法，正确的是（ ）.
- 某时刻某一气体分子向上运动，则下一时刻它向上运动的概率小于向下运动的概率
 - 在一个正方体容器里，任一时刻与容器各侧面碰撞的气体分子数目基本相同
 - 当温度升高时，速率大的气体分子数目增多
 - 气体分子速率呈现“中间多，两头少”的分布规律
10. 把萝卜腌制成咸菜通常需要几天时间，而将萝卜炒熟，使之具有相同的咸味只需几分钟。试解释造成这种差异的主要原因。
11. 在“用油膜法估测分子的大小”的实验中，将 6 mL 的油酸溶于酒精，制成 10 L 的油酸酒精溶液，测得 1 mL 的油酸酒精溶液有 75 滴。现取 1 滴该油酸酒精溶液滴在水面上，待水面稳定后，将带有网格线的透明塑料盖板放在浅盘上，用彩笔在塑料盖板上描出油膜的轮廓，其形状和尺寸如图 1-1 所示，塑料盖板上的小方格边长为 1 cm。则：
- 油酸膜的面积是 _____ cm^2 .

(2) 1滴油酸酒精溶液中含有纯油酸的体积是_____mL.
(结果保留一位有效数字)

(3) 按以上实验数据估测出油酸分子的直径约为_____m.
(结果保留一位有效数字)

(4) 某同学在实验中最终得到的计算结果比大部分同学的结果偏大, 对出现这种结果的原因, 下列说法可能正确的是_____.

A. 错误地将油酸酒精溶液的体积直接作为油酸的体积进行计算

B. 计算油酸膜面积时, 错将不完整的方格作为完整方格处理

C. 计算油酸膜面积时, 只数了完整的方格数

D. 水面上痱子粉撒得较多, 油酸膜没有充分展开

12. 某水银温度计中含有 2 g 汞, 已知汞的摩尔质量 $M = 200.6 \times 10^{-3}$ kg/mol, 密度 $\rho = 13.6 \times 10^3$ kg/m³, 阿伏伽德罗常数 $N_A = 6.0 \times 10^{23}$ mol⁻¹. 求:

(1) 温度计中汞原子个数.

(2) 1 个汞原子的体积. (以上计算结果均保留一位有效数字)

13. 在“用油膜法估测分子的大小”的实验中, 一滴油滴的体积非常小, 但采用累积法可以测出油滴的体积. 请同学们回想一下, 在初中物理课中, 我们是如何用毫米刻度尺, 采用累积法(或叠加法)测量课本纸张的厚度与细线的直径的, 其方法与用油膜厚度来确定分子大小的方法相比较, 有什么异同?

14. 在对固体、液体分子的大小以及气体分子所占空间的计算中, 使用模型有何不同? 运用这些模型并不能对分子的大小(或所占空间)进行准确的计算, 为何还是要用这些模型?

15. 有同学说分子间的作用力像弹簧的弹力, “压, 分子力就向外推; 拉, 分子力就往回拉”. 试分析分子力和弹力变化规律的异同.

16. 有人将布朗运动与股票价格行为联系在一起, 建立起金融数学模型. 查找相关资料, 体会物理学是自然科学领域的基础学科, 以及其对自然科学技术的重要影响, 并谈谈自己的见解.

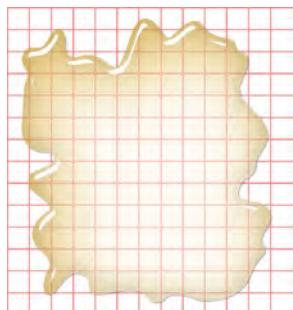


图 1-1

第二章 气体、液体和固体

气态、液态、固态是最常见的三种物质形态，这些不同形态的物质材料的应用，对人类社会的发展起到了重大的推动作用。可以说，人类社会的发展史是一部伴随生活、生产资料的发展与利用的历史。人类历经石器时代、青铜器时代、铁器时代……直到今天各种新材料的涌现，每一次进步都标志着人类社会生产水平的一大跨越。

在本章的学习中，我们将通过实验学习气体实验定律及其微观解释，液体表面张力及其微观解释，进一步了解固体的宏观结构和微观结构，并通过实例体会材料科学的发展对人类生活、社会发展的影响。



第一节 气体实验定律（I）

用打气筒给足球打气时，随着活塞杆的下压，会感到越来越吃力，这说明随着气体体积减小，其压强会增大；将压瘪的乒乓球放入热水中，乒乓球会自动复原，说明球内的气体在温度升高时压强也会增大。日常生活中的很多现象说明，一定质量的气体，其压强、温度、体积三个量之间存在着某种关系。

下面我们采用控制变量法探究一定质量的气体，在温度不变时，其压强与体积之间的变化关系。

观察与思考

如图 2-1-1 所示，用注射器的柱塞和下端的橡皮塞把一段空气柱封闭在注射器玻璃管中，这段空气柱就是我们研究的对象。在实验过程中，空气柱的质量是不变的，只要其体积变化不太快，它的温度就不会有明显的变化，大致等于环境温度。空气柱的压强可以从注射器上方的气压计指针读出，空气柱的长度可以从注射器玻璃管侧的刻度尺读出。

现向下压或向上提注射器的柱塞，观察空气柱体积与压强的变化情况，能发现什么变化规律？

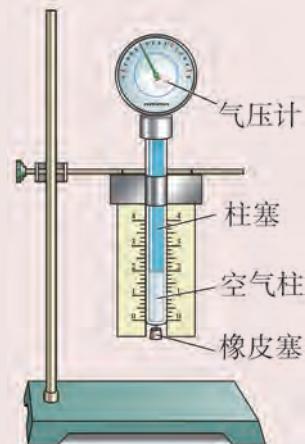


图 2-1-1 实验装置示意图

从实验中可以发现，注射器内空气柱的体积越小，压强就越大，其体积越大，压强就越小。那么，一定质量的气体，在温度不变时，其压强的大小是否跟体积成反比关系呢？

玻意耳定律

为了探究一定质量的气体，在温度不变时，其压强的大小与体积的大小是否成反比关系，我们通过进一步的实验记录多组数据，对其规律进行研究。



实验与探究

如图 2-1-1 所示的实验装置可以验证一定质量的气体，在温度不变时，其压强和体积的关系。但是气压计的读数误差相对较大，因此，为了更精确地测量气体压强，我们引进压强传感器和数据采集器获取数据，并借助计算机处理数据，以提高测量精度和效率。其实验原理图如图 2-1-2 所示。

实验中，为了做到封闭气体，不让气体泄漏，可以在活塞上涂润滑油。而为了控制气体温度这一变量，活塞移动速度不能太快，且要避免用手握住注射器封闭气体部分导致气体温度改变。

实验装置如图 2-1-3 所示。通过改变注射器内气体的体积，可以获得对应的气体压强值并记录数据。

启用系统“绘图”功能，计算机将显示压强与体积的关系图线，如图 2-1-4 所示为某次实验得出的 $p-V$ 图线。将气体体积 V 取倒数，获得压强与体积倒数的关系图线，如图 2-1-5 所示。分析实验数据和 $p-V$ 、

$p-\frac{1}{V}$ 关系图线，可以发现气体压强和体积有什么关系？

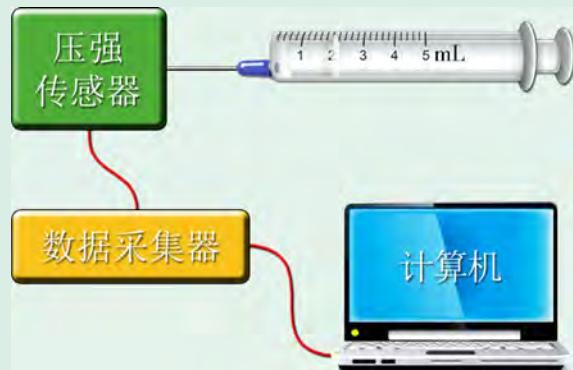


图 2-1-2 实验原理图

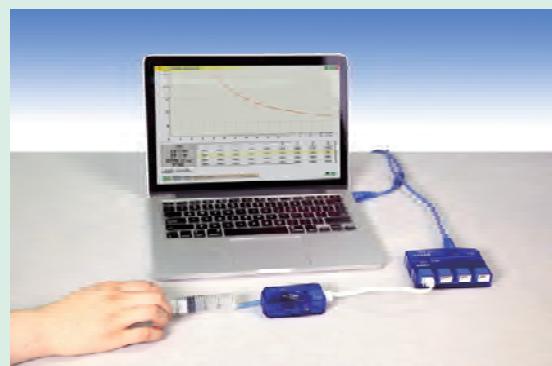


图 2-1-3 实验装置图

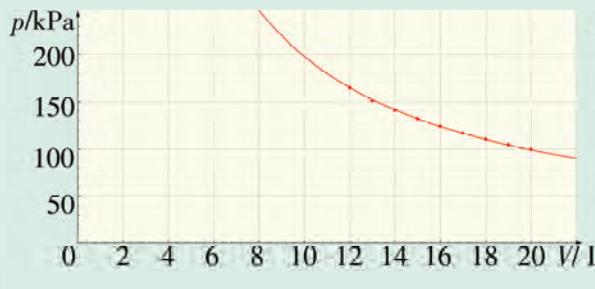


图 2-1-4 等温过程的 $p-V$ 图线

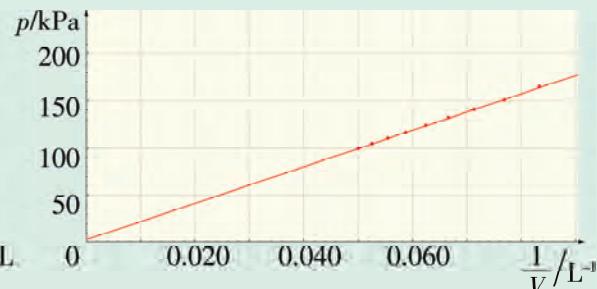


图 2-1-5 等温过程的 $p-\frac{1}{V}$ 图线

实验表明，一定质量的气体，在温度不变的情况下，其压强与体积成反比。即

$$p \propto \frac{1}{V}$$

设初态时气体体积为 V_1 ，压强为 p_1 ，末态时气体体积为 V_2 ，压强为 p_2 ，则

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (2.1.1)$$

这一规律是英国科学家玻意耳 (R. Boyle, 1627—1691) 和法国科学家马略特 (E. Mariotte, 1620—1684) 在互不知情的情况下各自独立通过实验发现的，由于马略特的发现时间较晚，因此人们习惯将其称为玻意耳定律 (Boyle law)。

等温图像

气体在温度不变的情况下发生的状态变化过程，称为等温过程 (isothermal process)。一定质量气体的等温过程在 $p - \frac{1}{V}$ 图上是过原点的直线，在 $p - V$ 图上是双曲线的一支，这种表示等温过程的图线称为等温线 (isotherm)。

等温线上的某一点表示气体处于某一状态，该点的坐标 (p , V) 表示气体在该状态下的状态参量。如图 2-1-6 所示的状态 A 的压强 $p_1 = 1 \text{ atm}$ (1 atm 即为 1 个标准大气压，约等于 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$)，体积 $V_1 = 2 \text{ L}$ ，状态 B 的压强 $p_2 = 0.5 \text{ atm}$ ，体积 $V_2 = 4 \text{ L}$ ，图中箭头表示过程进行的方向，气体由状态 A 经等温过程变化到状态 B。

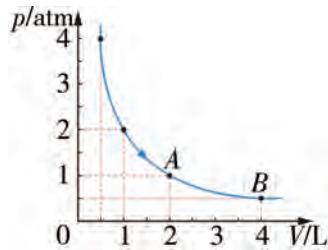


图 2-1-6

例题：人们使用气压式保温瓶时，只需按压保温瓶顶端，即可将水从瓶中压出。如图 2-1-7 所示是气压式保温瓶结构图，请分析回答下列问题。

(1) 保温瓶中的水越少，需按压瓶盖的次数越多，才能将水从瓶中压出，请分析其原因。

(2) 已知保温瓶中水的占比，估测出水所需的按压次数，需用到什么气体实验定律？若要满足该气体定律的适用条件，应怎样选取研究对象？

(3) 若保温瓶中只有半瓶水时，希望按压两次就能出水，则还需要满足什么条件？

分析：根据保温瓶的结构图可知，按压瓶盖往瓶中注入更多的空气，使得瓶中压强增大，水被挤压出保温瓶。影响按压次数的主要因素是瓶盖下方气室的体积、保温瓶内水上方的空气体积，以及出水管口距水面的高度。据此选择解决问题的定律，并明确适用条件，选取合适的研究对象。

解：(1) 由气压式保温瓶的结构图可知：水越少，出水管口距水面的高度越大，压出

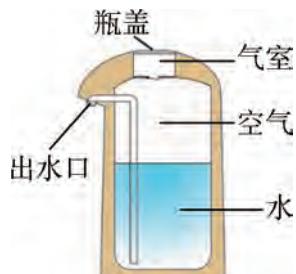


图 2-1-7 气压式
保温瓶结构图

水所需的压强越大；同时，保温瓶内水上方的空气体积也越大，而瓶盖下方气室的体积一定，每次按压能压入的空气相对水上方的空气体积的比例就越小，故需按压的次数就越多。

(2) 需要运用玻意耳定律来估测按压次数，因此必须满足气体质量一定、温度不变的条件。

通常情况下，保温瓶内水上方的空气体积远大于气室的体积，因此，气体被压缩时温度的变化非常微小，可近似看作温度不变。按压瓶盖往瓶中注入空气，瓶中气体质量必定增大，然而若将压入瓶中的空气和瓶中原有的空气看作一个整体，以其为研究对象，则满足了气体质量一定的条件，从而可运用玻意耳定律来解答本题。

(3) 如图 2-1-8 所示，设保温瓶可盛水的体积为 V_1 ，瓶盖下方气室的体积为 V_2 ，出水管口到瓶中水面的高度为 h ，水的密度为 ρ ，外界大气压为 p_0 。若瓶中只有半瓶水，希望按压两次就能出水，则保温瓶内水上方的空气压强至少要达到 $p_0 + \rho gh$ ，忽略不计出水管体积，根据玻意耳定律，可得

$$p_0 \left(\frac{V_1}{2} + 2V_2 \right) = (p_0 + \rho gh) \frac{V_1}{2},$$

$$\text{解得 } \frac{V_1}{V_2} = \frac{4p_0}{\rho gh}.$$

即保温瓶可盛水的体积与气室体积之比满足上述关系式时，瓶中只有半瓶水，按压两次就能出水。

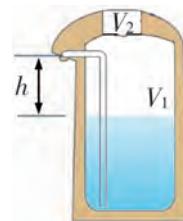


图 2-1-8



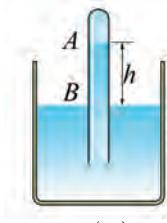
实践与拓展

在用如图 2-1-3 所示的实验装置探究玻意耳定律时，可能造成实验误差的主要原因是什么？如何改进实验方法来尽可能减小这些误差？

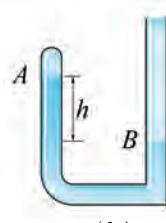


练习

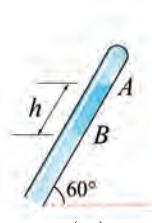
1. 如图 2-1-9 所示的各装置均处于静止状态，若已知大气压强为 p_0 ，重力加速度为 g ，液体密度均为 ρ ，求各段被封闭气体的压强。



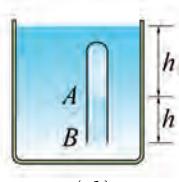
(a)



(b)



(c)



(d)

图 2-1-9

2. 如图 2-1-10 所示是某公司设计的一款婴儿防胀气奶瓶示意图，通过奶瓶的特殊设计，宝宝用奶瓶喝奶时，能有效地减少宝宝吸人气泡，从而减少宝宝胀气、打嗝和吐奶。请尝试结合本节所学的知识对这种奶瓶的原理进行解释说明。结合自己的生活体验，列举出利用类似原理制成的其他器材。



图 2-1-10

3. 假定某足球的最大容积是 2.5 L，用一打气筒给这个足球打气，每一次能把体积 125 cm^3 、压强 1 atm 的空气全部打入足球。如果足球打气前内部没有空气，那么打了 30 次以后，足球内部空气的压强为多大？（假定空气温度不变）

4. 如图 2-1-11 所示是一种测定肺活量（标准大气压下，人一次呼出气体的体积）的装置， A 为排尽空气并倒扣在水中的开口薄壁圆筒。测量时，被测者尽力吸足空气，再通过 B 管用力将自己肺部的空气吹入 A 中，使 A 浮起。设整个过程中呼出气体的温度保持不变，圆筒 A 的横截面积为 S ，外界大气压强为标准大气压 p_0 ，水的密度为 ρ 。若某同学使得圆筒 A 浮出水面的高度为 h ，圆筒内外水面的高度差为 Δh ，试求该同学的肺活量。

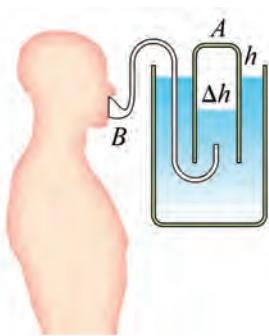


图 2-1-11

5. 一气象探测气球，在充有压强为 1.00 atm、温度为 27.0 °C 的氦气时，体积为 3.50 m^3 ，在上升至海拔 6.00 km 高空的过程中，气球内氦气体积逐渐增大，此高度的大气压约等同于 36.0 cm 高的水银柱产生的压强，气球内部因启动持续加热装置而维持其温度不变。求此时气球的体积。

第二节 | 气体实验定律(Ⅱ)

在上一节中，我们通过实验探究了一定质量的气体，在温度不变时，其压强与体积之间的变化关系。那么，一定质量的气体，在体积不变时，其压强是怎样随温度变化的呢？在压强不变时，其体积又是怎样随温度变化的呢？

查理定律

我们先来观察一定质量的气体，在体积不变时，其压强是怎样随温度变化的。

观察与思考

如图 2-2-1 所示是一个探究气体压强与温度变化关系的实验装置示意图，实验中，往细玻璃管内注入适量的红墨水，通过红墨水的移动观察气压的改变。把瓶先后放入盛着冰水混合物的容器和盛着热水的容器中，设法保持瓶内气体的体积不变，观察红墨水的移动情况，思考该过程气体压强和温度变化的关系。

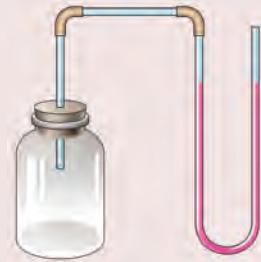


图 2-2-1 实验装置示意图

通过实验可以发现，保持瓶内气体体积不变，将瓶放入热水中时的瓶内压强大于放在冰水混合物中时的瓶内压强。法国物理学家查理 (J. Charles, 1746—1823) 通过实验发现，当气体体积一定时，各种气体的压强都随温度的升高而均匀增大，如图 2-2-2 (a) 所示，人们把此规律叫作查理定律 (Charles law)。气体在体积保持不变的情况下发生的状态变化过程，叫作等容过程 (isochoric process)。

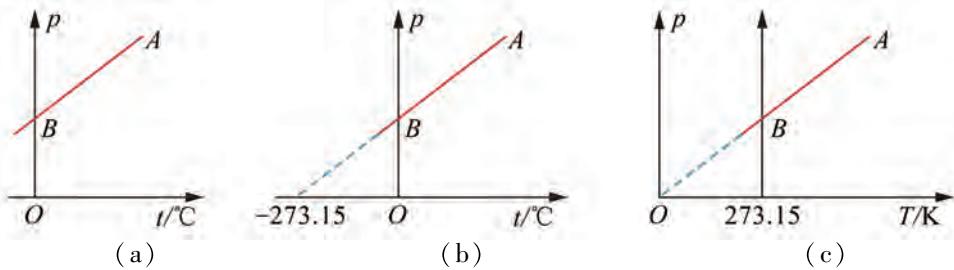


图 2-2-2 气体等容变化

由图 2-2-2 (a) 可知, 在等容过程中, 气体压强 p 与摄氏温度 t 呈线性关系, 但不是简单的正比关系. 如图 2-2-2 (b) 所示, 延长直线 AB , 与横坐标相交, 则交点为 $(-273.15, 0)$. 如果以该交点为原点, 建立新坐标系如图 2-2-2 (c) 所示, 横坐标仍然表示温度, 则此时气体压强与温度就是正比例关系了. 若将这新的温度记为 T , 它与摄氏温度 t 的大小换算关系为 $T = t + 273.15$, 人们将这一新的温度称为热力学温度 (thermodynamic temperature), 国际单位为开尔文, 简称开, 符号为 K. 由图 2-2-2 (c) 可知, 原点表示气体压强为 0 时, 热力学温度为 0. 理论和实践表明, 热力学温度 0 K (即绝对零度) 是不可能实现的.

由此, 查理定律可简化为一定质量的气体, 在体积不变的情况下, 其压强 p 与热力学温度 T 成正比. 即

$$p \propto T.$$

设气体温度为 T_1 时, 压强为 p_1 , 温度为 T_2 时, 压强为 p_2 , 则

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (2.2.1)$$

例题 1: 汽车轮胎的气压是影响汽车节油及行驶安全的重要因素, 据统计, 在高速公路上有 40% 以上的交通事故是由于轮胎发生故障引起的. 汽车在高速行驶时车胎因反复形变而升温, 车胎内气压随之升高. 某品牌的汽车轮胎说明书上标有“最大胎压 3 kg/cm^2 ”. 该车在夏天以 120 km/h 的速度行驶时, 车胎内气体温度可达 70°C . 为保证汽车在最高限速 120 km/h 的高速路上安全行驶, 则在 30°C 的气温下, 汽车出发前给车胎充气的气压上限是多少?

分析: 空气注入车胎后, 其质量不变, 忽略车胎因温度的变化而发生的体积变化, 则符合查理定律的适用条件, 可用该定律来解答.

解: 设 30°C 时车胎能充的最大气压为 p_1 , 温度达 70°C 时的气压为 p_2 , 由题可知

$$p_2 = 3.0 \times 9.8 \text{ N/cm}^2 = 2.94 \times 10^5 \text{ N/m}^2.$$

根据查理定律, 由 $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$,

$$\text{得 } \frac{p_1}{273.15 + 30} = \frac{2.94 \times 10^5}{273.15 + 70},$$

$$\text{解得 } p_1 \approx 2.60 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \approx 2.65 \text{ kg/cm}^2.$$

即在 30°C 的气温下, 汽车出发前给车胎充气, 车胎气压不能超过 2.65 kg/cm^2 .

在对实验数据的处理中, 通过对图线的合理延伸, 发现其新的含义, 这是物理学研究中一种常用的方法.

盖-吕萨克定律

我们知道了气体的等温过程和等容过程中的规律, 那么, 一定质量的气体, 当压强不变时, 气体体积与温度的关系又如何呢?


观察与思考

将如图 2-1-1 所示的实验装置先后放入盛着热水的容器和盛着冰水混合物的容器中，设法保持压强不变，观察玻璃管中空气柱体积的变化情况，思考气体体积与温度的关系。

实验表明，一定质量的气体，在压强不变的情况下，其体积 V 与热力学温度 T 成正比。即

$$V \propto T.$$

设气体温度为 T_1 时，体积为 V_1 ，温度为 T_2 时，体积为 V_2 ，则

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (2.2.2)$$

该规律由法国化学家、物理学家盖-吕萨克 (J. Gay-Lussac, 1778—1850) 发现，人们将其称为盖-吕萨克定律 (Gay-Lussac law)。气体在压强不变情况下发生的状态变化过程，称为等压过程 (isobaric process)。气体等压过程可以用图线来表示，如图 2-2-3 所示。

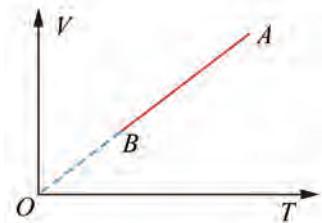


图 2-2-3 气体等压变化

例题 2：炎热的夏天，当我们在教室开空调时，除了温度以外，教室内空气的质量其实也发生了改变。请估算降温前后教室内空气的质量变化量。（已知 1 个标准大气压下，温度为 0 ℃时，空气密度为 1.29 kg/m^3 ）

分析：教室的空间不变，即空气的总体积不变。当室内温度降低时，气压会降低，因教室不是密闭空间，室外空气会进入室内，使得室内外空气的压强保持动态的平衡，因此室内空气的质量增加、压强不变。在降温过程中，如果把从室外进入室内的空气与原来室内的空气看成一个整体，则可以采用盖-吕萨克定律求解。可设教室为长方形，长、宽、高分别为 L 、 D 、 H ，设空调使室内空气从温度 t_1 降到 t_2 ，从而估算降温前后室内空气质量的变化量。

解：设教室为长方形，长、宽、高分别为 $L = 10 \text{ m}$, $D = 6 \text{ m}$, $H = 3 \text{ m}$ ，开空调使室内空气从温度 $t_1 = 33^\circ\text{C}$ 降到 $t_2 = 26^\circ\text{C}$ ，室内气压近似保持为 1 个标准大气压。把降温过程中从室外进入室内的空气与原来室内的空气看成一个整体，则气体质量恒定。设在 0°C 、 33°C 、 26°C 时，整个气体的体积分别为 V_0 、 V_1 、 V_2 ，根据盖-吕萨克定律，有

$$\frac{V_0}{273.15} = \frac{V_1}{273.15 + t_1} = \frac{V_2}{273.15 + t_2}.$$

而 $V_2 = LDH = 180 \text{ m}^3$ ，由此求得

$$V_0 \approx 164.36 \text{ m}^3, V_1 \approx 184.21 \text{ m}^3.$$

设 33°C 时空气密度为 ρ_1 , 则 $\rho_0 V_0 = \rho_1 V_1$, 且已知 1 个标准大气压下, 温度为 0°C 时, 空气密度 $\rho_0 = 1.29 \text{ kg/m}^3$, 则

$$\rho_1 = \frac{\rho_0 V_0}{V_1} = \frac{1.29 \times 164.36}{184.21} \text{ kg/m}^3 \approx 1.15 \text{ kg/m}^3.$$

而室内空气的质量变化量等于外界进入室内的空气质量, 即

$$\Delta m = \rho_1 (V_1 - V_2) = 1.15 \times (184.21 - 180) \text{ kg} \approx 4.84 \text{ kg}.$$

则从温度 $t_1 = 33^{\circ}\text{C}$ 降到 $t_2 = 26^{\circ}\text{C}$, 室内空气约增加了 4.84 kg .

练习

1. 如图 2-2-4 所示, 一个敞口的瓶子被放在空气中, 气温为 27°C . 现对瓶子加热, 由于瓶子中的空气受热膨胀, 一部分空气被排出. 当瓶子中空气的温度上升到 57°C 时, 瓶中剩余空气的质量是原来的多少?



图 2-2-4

2. 如图 2-2-5 所示, 热气球的下端有一小口, 使球内外的空气可以流通, 以保持球内外压强相等. 球内有温度调节器, 以便调节球内空气的温度, 使热气球可以上升或下降. 设热气球的总体积 $V_0 = 500 \text{ m}^3$ (忽略球壳体积), 除球内空气外, 热气球质量 $M = 180 \text{ kg}$. 已知地球表面大气温度 $T_0 = 280 \text{ K}$, 密度 $\rho_0 = 1.20 \text{ kg/m}^3$, 如果把大气视为理想气体, 它的组成和温度几乎不随高度变化, 那么为使热气球从地面升起, 球内气温最低要加热到多少?



图 2-2-5

3. 如图 2-2-6 所示是右端开口的圆筒形容器, 底面积为 S , 活塞可以沿容器壁自由滑动. 开始时, 活塞把一定质量的理想气体封闭在容器内, 活塞与容器底部的距离为 L , 气体温度为 T_0 , 大气压强为 p_0 . 若给容器内气体加热, 让气体膨胀, 活塞缓慢移动到与容器底部距离为 $2L$ 处, 求:

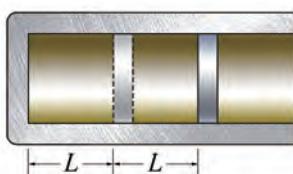


图 2-2-6

(1) 气体膨胀后的温度.

(2) 气体膨胀后把活塞固定, 让气体温度缓慢地变回 T_0 , 求此时气体的压强, 并画出在此过程中气体压强 p 随温度 T 变化的图线.

第三节

气体实验定律的微观解释

玻意耳定律、查理定律和盖-吕萨克定律，这三个定律都是通过实验研究获得的，人们将这三个定律统称为气体实验定律。它们反映了一定质量的气体，温度、体积、压强三个参量之间的变化关系。下面我们将从微观的角度，探寻气体参量的变化遵循气体实验定律的缘由。

气体压强的微观解释

从微观分子的运动及统计规律来看，气体的压强是大量气体分子频繁碰撞器壁的结果。我们都有这样的经验：当稀疏的雨点打在伞上时，我们感到伞上各处受力是不均匀的，而且是断续的；但当密集的雨点打到伞上时，就会感到雨伞受到一个均匀的、持续的压力（如图2-3-1所示）。气体压强产生的原因与此相似，单个分子对器壁的冲力是短暂的，分子运动的速率各不相同，对器壁的冲力也各不相同，但大量分子频繁地碰撞器壁，就会对器壁产生持续的、均匀的压力。所以，从分子动理论的观点来看，气体压强是大量气体分子对器壁作用的宏观效果，大小等于大量气体分子作用在器壁单位面积上的平均作用力。

气体实验定律的微观解释

由分子动理论和气体分子运动的统计规律可以知道，就大量分子而言，气体质量一定时，如果温度不变，体积越小，单位体积内气体分子数目越多，撞击器壁的分子数目越多，撞击的平均作用力越大，压强越大；如果体积不变，温度越高，气体分子热运动的平均速率越大，撞击频率越高，撞击的平均作用力越大，压强越大。据此我们能很好地解释气体实验定律。

一定质量的气体，温度保持不变时，气体分子热运动的平均速率一定，若气体体积减小，分子的密集程度增大，气体压强增大。反之，若气体体积增大，分子的密集程度减小，气体压强减小。这就是玻意耳定律的微观解释。

一定质量的气体，体积保持不变时，气体分子的密集程度保持不变，若气体温度升



图2-3-1 雨点密集地落在伞面上，对伞面施加了压力

高，分子的热运动的平均速率增大，气体压强增大。反之，若气体温度降低，分子热运动的平均速率减小，气体压强减小。这就是查理定律的微观解释。

讨论与交流

根据以上对玻意耳定律和查理定律的微观解释，试应用分子动理论和气体分子运动的统计规律解释盖-吕萨克定律。

理想气体

气体实验定律是通过实验研究获得的，那么在实际条件下，气体是否严格遵循这些定律呢？

讨论与交流

有人做过这样一个实验：在1个标准大气压下，取空气、氢气、一氧化碳和二氧化碳各 1 dm^3 ，分别将它们等温压缩至其压强均为2个标准大气压，测其体积，计算 pV 的乘积，结果如表2-3-1所示。

表2-3-1 气体压强和体积的乘积

气体	空气	氢气	一氧化碳	二氧化碳
pV	0.99977	1.00028	0.99974	0.99720

观察表中数据，实际气体压缩过程是否严格遵循气体实验定律？

在对气体实验定律的进一步精确实验研究中可以发现，任何实际气体都只是在压强不太大、温度不太低的情况下近似地遵循相关的定律。当压强较大、温度很低时，气体实验定律就不适用了。压强越大，单位体积内分子数目越多，这种偏离就越显著。事实上，任何气体在高压、低温下都会发生液化甚至成为固体。正因为如此，在 $p-T$ 图线或 $V-T$ 图线中，等容线和等压线在温度很低的一段是用虚线表示的。

虽然实际气体不严格遵循气体实验定律，但为了研究方便，我们可以设想有一种严格遵循气体实验定律的气体，这样的气体被称为理想气体（ideal gas）。根据气体实验定律，可以推导出一定质量的某种理想气体，其压强、体积和热力学温度三个参量满足以下关系：

$$\frac{pV}{T} = c \quad (2.3.1)$$

式中 c 是与 p 、 V 、 T 无关的常量，表明压强跟体积的乘积与热力学温度的比值保持不变。这就是一定质量的理想气体状态方程。

理想气体实际上是不存在的，它是对实际气体的一种理想化的简化模型。在通常的条件下，氢气、氧气、空气等气体都能很好地遵循气体实验定律，因此常把它们当作理想气体处理。

为何实际气体不严格遵循气体实验定律呢？人们通过理论分析确认，如果忽略分子的大小，将分子看作质点，同时忽略分子间的相互作用（除相互碰撞外），则气体将会严格遵循气体实验定律。因此，理想气体的理想化微观模型是分子有质量而没有体积，分子间除相互碰撞外，没有相互作用力。而实际气体，只有在常温常压下，分子间间距较大，分子的大小及相互作用力可以忽略时，才基本遵循气体实验定律。当气体压强很大、温度很低时，单位体积内分子数很多，分子非常密集，分子的大小及分子间相互作用力不可忽略时，气体实验定律也就不适用了。

理想气体状态方程的推导

资料活页

一定质量的某种理想气体，它在状态 1 时压强、热力学温度、体积三个状态参量的值分别为 p_1 、 T_1 、 V_1 ，当它三个状态参量都发生变化达到状态 3 时，三个状态参量的值分别为 p_3 、 T_3 、 V_3 。现在我们利用气体实验定律，推导压强、热力学温度、体积三个状态参量间的变化规律。

由状态 1 至状态 3，虽然三个状态参量都发生了变化，但我们可以做一些假设。如图 2-3-2 所示，假定气体先经过等容过程从状态 1 变化至状态 2，再经等温过程从状态 2 变化到状态 3。

由状态 1 到状态 2，根据查理定律，有

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

由状态 2 到状态 3，根据玻意耳定律，有

$$p_2 V_2 = p_3 V_3.$$

两式联立，消去两个方程中状态 2 的压强，得

$$\frac{p_1 V_2}{T_1} = \frac{p_3 V_3}{T_2}.$$

由于经等容过程从状态 1 到状态 2，故 $V_1 = V_2$ 。由于经等温过程从状态 2 到状态 3，故 $T_2 = T_3$ 。代入上式，得

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_3 V_3}{T_3}.$$

因为状态 1、状态 3 是气体的两个任意状态，所以上式表明，一定质量的某

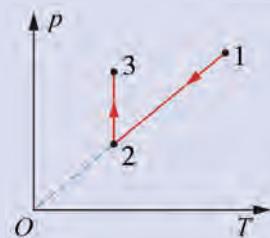


图 2-3-2

种理想气体，从状态1变化到状态3时，尽管 p 、 V 、 T 都可能改变，但压强跟体积的乘积与热力学温度的比值保持不变。即

$$\frac{pV}{T} = c.$$

式中 c 是与 p 、 V 、 T 无关的常量。

上式被称为一定质量的某种理想气体的状态方程（state equation of ideal gas），其揭示了理想气体状态变化的规律，并不涉及气体从一个状态变化到另一个状态的具体方式。在由气体实验定律推导理想气体状态方程的过程中，我们假定气体先经过等容过程从状态1到状态2，再经等温过程从状态2到状态3。也可假定经过其他的变化过程来推导，结果是完全一致的。因此，理想气体的始末状态，与过程无关，只与温度、压强和体积有关。

练习

1. 如图2-3-3所示，一名同学将一个用水柱封闭的玻璃瓶放入热水中，发现水柱向右移动。试用分子动理论解释这个现象。

2. 试用气体压强、温度和体积的变化规律解释热气球能载人升空的原因。试举出类似的生活现象并进行解释。

3. 夏天停放在太阳底下暴晒的自行车容易“爆胎”。某同学为了防止“爆胎”，给车胎打的气总是比冬天稍少一些。试用分子动理论的观点解释“爆胎”现象，分析该同学这样做的道理。

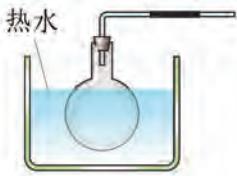


图2-3-3

第四节

液体的表面张力



在日常生活中，有时会发现一些有趣的现象：挂在草叶尖的水珠是球状的，水黾可以停在水面上而不会沉入水里，硬币能浮在水面上……这些现象都发生在液体的表面。



图 2-4-1 挂在草尖上的水珠



图 2-4-2 水黾停在水面上



图 2-4-3 硬币浮在水面上

表面张力

下面我们利用身边的材料，通过实验探究液体的表面现象，并从微观的角度加以解释。



观察与思考

记录以下实验中的现象，并思考这些现象说明了什么。

1. 把一根棉线的两端系在铁丝环上（棉线不要拉紧），然后把铁丝环浸入肥皂水里，再拿出来，铁丝环上就布满了肥皂水的薄膜。这时棉线圈是松弛的，如图 2-4-4 所示。

(1) 用烧热的针先刺破棉线一侧的薄膜，观察薄膜和棉线发生的变化，并在图 2-4-5 中画出薄膜和棉线变化后的形状。

(2) 再用烧热的针刺破棉线另一侧的薄膜，并在图 2-4-6 中画出棉线变化后的形状。

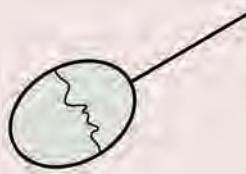


图 2-4-4



图 2-4-5



图 2-4-6

2. 把一个棉线圈系在铁丝环上，使环上布满肥皂水的薄膜，这时膜上的棉线圈是松弛的，如图 2-4-7 所示。用烧热的针刺破棉线圈里的肥皂膜，观察棉线圈外的薄膜和棉线圈有什么变化，并在图 2-4-8 中画出薄膜和棉线圈发生变化后的形状。

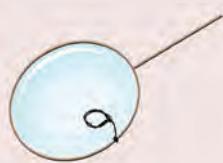


图 2-4-7



图 2-4-8

上述实验表明，液体的表面就像绷紧的橡皮膜一样，总是有收缩的趋势。我们可以从液体微观结构中分子力的角度来解释。

从微观的角度来看，液体的表面并不是一个几何面，而是一个厚度为分子力有效作用距离（数量级为 10^{-9} m）的薄层。位于液体表面层内的分子与液体内部分子，它们所受到的分子力是有区别的。

我们可以把分子力的作用范围认为是一个半径等于分子力有效作用距离的球，这个球称为分子作用球。由于分子斥力的有效作用距离比分子引力的有效作用距离小得多，分子斥力作用球的半径远小于分子引力作用球的半径。

设液体内有一分子 A，如图 2-4-9 所示，由于分子 A 的分子作用球处于液体内部，液体内的分子均匀分布，对于分子 A 来说其分布是球对称的，因此液体内所有分子对分子 A 的斥力和引力的合力为零。

设在液体表面层内有一分子 B，如图 2-4-9 所示，以分子 B 为中心的分子作用球一部分在液体外，由于分子斥力作用球的半径远小于分子引力作用球的半径，分子 B 的分子斥力作用球仍处于液体内，其受到的分子斥力仍是球对称的，但分子 B 所受的分子引力就不再是球对称的。由于缺少了液体表面层外这部分分子的引力，作用在分子 B 上的全部分子引力的合力 f 垂直液面指向液体内。由此，液体表面层单位体积内的分子数目相对液体内部会更少，分子间距相对更大一些。因而表面层分子间的分子力表现为引力，液体的表面总是有一种收缩的趋势，就好像被绷紧的橡皮膜。设想在液体表面画一条直线，如图 2-4-10 所示，则直线两旁的液膜表现出使液体表面收缩的相互作用的拉力，液体表面出现的这种张力称为表面张力（surface tension）。

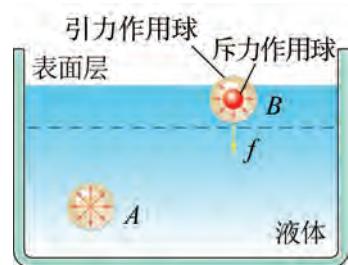


图 2-4-9 液体表面附近
分子分布的示意图

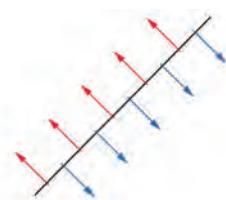


图 2-4-10 液体
的表面张力

讨论与交流

尝试利用表面张力的知识解释：为什么草叶上的小水珠是球形的？为什么水黾可以停在水面上？为什么密度比水大的硬币可以被水托住而不会沉到水里？

正是由于表面张力的作用，液体表面这种收缩的趋势会使得液滴的表面积尽可能地减小。在体积一定的情况下，球形在所有几何体中的表面积最小，所以露珠的形状更接近于球形。难怪唐代诗人白居易（772—846）看到美丽的露珠后，情不自禁地发出“露似珍珠月似弓”的咏吟。

毛细现象

既然草叶上的小水珠是球形的，那么将水滴在玻璃板上还会成球状吗？我们可以通过观察实验来了解。

观察与思考

1. 取两块小玻璃板，在其中一块玻璃板上均匀涂上石蜡。用滴管将同样大小的两滴小水珠分别滴在这两块玻璃板上，观察两块玻璃板上水滴的形状是否相同。

2. 取两支试管和两根两端开口的细玻璃管，如图 2-4-11 所示，在一支试管中倒入水银（水银对人体有害，在实验操作时注意戴好防护手套与口罩），然后将一根细玻璃管紧靠试管壁插入水银中，明显可见细玻璃管中水银面与试管中的不一样高。在另一支试管中倒入水，同样将另一根细玻璃管插入水中，观察管内外水面是否一样高？与图 2-4-11 所示的是否一致？除细玻璃管内外液面高度不同以外，还可以观察到什么现象？



图 2-4-11 水银的实验现象

上述两个实验的现象有什么相似之处？如何解释这些实验现象？

通过实验可知，液体与固体接触时，因材料的不同，在其接触面会出现两种不同的情况：一种是液体与固体的接触面有扩张的趋势，液体会附着在固体上，如图 2-4-12 所示；另一种是液体与固体的接触面有收缩的趋势，液体不会附着在固体上，如图 2-4-13 所示。我们将前一种现象称为浸润，后一种现象称为不浸润。

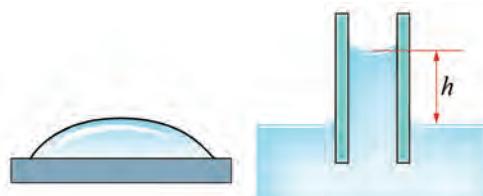


图 2-4-12 水的浸润现象



图 2-4-13 水银的不浸润现象

由上面的实验可知，水不浸润石蜡而浸润玻璃，而水银不浸润玻璃。水对不同材料的这种浸润与不浸润的性质，在实际生活与生产中有着广泛的应用。例如，鸭子用嘴把油脂涂到羽毛上，使水不能浸润羽毛；人们采用表面经过特殊涂层处理的织物来制成防水布料，如图 2-4-14 所示；而医院使用脱脂棉来吸收药液等。

浸润与不浸润现象产生的原因与产生表面张力的原因相似。在液体与固体接触的地方也有薄薄的一层液体，其性质与液体内部不同，我们称其为附着层。附着层的液体分子既要受液体内分子力的作用，也要受固体分子力的作用。若液体内分子的引力更大，则附着层中液体分子的密度变小，液体分子间距增大，相互间的分子力表现为引力，此时附着层有收缩的趋势，表现为不浸润。若固体分子的引力更强，则附着层中液体分子的密度更大，液体分子间距减小，相互间的分子力表现为斥力，此时附着层有扩张趋势，从而表现为浸润。



图 2-4-14 防水布料

讨论与交流

如果先将硬币用水冲洗一下，再置于水面，会出现什么情况？

在图 2-4-12 与图 2-4-13 中，浸润液体在细管中上升，不浸润液体在细管中下降，我们将这种现象称为毛细现象（capillarity）。

毛细现象是液体的浸润（或不浸润）与表面张力现象共同作用的结果。液体浸润细管时，浸润液体的附着层沿细管壁有扩张趋势，故附着层液体顺着管壁往上升，此时管内液面弯曲，面积变大。而表面张力使液面收缩，从而拉动管中液体上升。当管中液柱的重力与表面张力 F 上拉的合力平衡时，液柱不再上升，如图 2-4-15 所示。若管的内径增大，则管中液体的体积与重力相应增大，且比液体面积增大得更快。因而管的内径越细，液体上升得越高，如图 2-4-16 所示。液体不浸润细管时，表现出的毛细现象则与液体浸润细管情况相反，如图 2-4-17 所示。

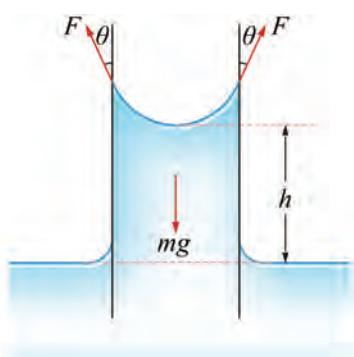


图 2-4-15 浸润时，表面张力将管中液体向上拉

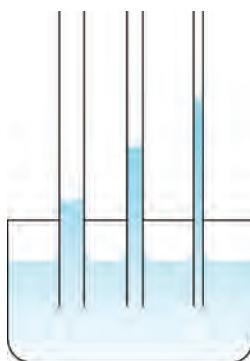


图 2-4-16 浸润液体在毛细管里上升

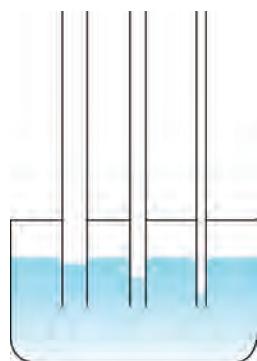


图 2-4-17 不浸润液体在毛细管里下降

在自然界中，植物之所以能吸收到土壤的水分，正是由于毛细现象将地下水通过泥土中的缝隙上升至植物的根部。同样，实验室常用酒精灯也是由于毛细现象，才使棉质的酒精灯芯自动地将酒精输送到灯芯的顶端。



实践与拓展

在一块洁净的玻璃平板上倒一些滴有红墨水的清水时，我们知道，由于浸润现象，水会向四周扩展，形成一层薄薄的水层。此时，再向水层中间轻轻滴几滴酒精，能观察到什么现象？并解释该现象。在生活中，是否还有类似的现象，请举例说明。

生物也“懂”物理

如果一只动物不小心从树上掉了下来，它们当然不会知道这是地球重力的作用。不过，这并不意味着动物们不会利用物理规律来适应环境。当我们掌握了相关物理知识，将会理解一些令人觉得不可思议的动物“神技”和生活习性。

红颈瓣蹼鹬是一种小型水禽，喙又细又长，以微型甲壳类生物为食。大部分水禽在收集了少量含有食物的水之后，会通过吸或用舌头将其送入喉咙，并过滤出其中的食物。而红颈瓣蹼鹬则是从水里“啄”出食物，然后用长长的喙一点点地夹食物，把食物送进喉咙。

红颈瓣蹼鹬为什么可以通过细长的嘴



图 2-4-18 红颈瓣蹼鹬

把食物送进喉咙里呢？它既不靠吸，也不用舌头，而是靠表面张力。红颈瓣蹼鹬在进食时，喙并不会张得很大。它会先让一滴含有浮游生物的水滴“粘”在它的上、下颌上，然后迅速张开喙。这时水滴散开，喙中的水滴会向后移动，离喉咙较近的那部分水带着食物进入喉咙。当喙再次合上时，就可以进行下次进食了。

红颈瓣蹼鹬虽然不懂物理，却会巧妙地利用水的表面张力来进食。这个例子说明了生物是如何巧妙地利用大自然的物理规律来适应环境的。

练习

1. 水比沙的密度小，同样是刮大风，沙漠上会是漫天黄沙，而海上却仅仅是扬起少量水沫，这是为什么呢？
2. 如图 2-4-19 所示是我国航天员王亚平在“天宫一号”太空授课中的一幕，她从液体注射器挤出水，水最终呈现完美的球状，结合本节课内容，谈谈其成因。



图 2-4-19



图 2-4-20

3. 如图 2-4-20 所示，在竖直的玻璃板上喷上水珠，水珠沿玻璃板下滑时会与沿途悬挂在玻璃板上的水珠汇聚成越来越大的水珠。请你用所学的知识解释该现象。

4. 如图 2-4-21 所示，在一个大碗中加入大半碗的水，将三支竹筷用水浸湿后，使它们成“品”字形并在一起，将其一端立于碗中，调整好位置，可使竹筷立于水中。请动手做这个实验，并解释相关实验现象。



图 2-4-21

第五节 晶体

固态是物质常见形态中分子聚集最紧密的一种状态。固体宏观上表现出的一些特殊性质，能否从微观结构中寻找其根源呢？

晶体与非晶体

固体可以分成晶体（crystal）和非晶体（amorphous matter）两类。石英、云母、明矾、食盐、味精、蔗糖等属于晶体，具有天然规则的几何形状。例如，食盐的晶体是正立方体形的；石英的晶体（透明的石英晶体叫水晶）中间是一个六棱柱，两端是六棱锥；雪花是水蒸气在空气中凝华形成的晶体，它们的形状一般是六角形的规则图案。每种晶体都有其特定的天然几何形状，矿物学上常常依据晶体的这些形状特点来鉴别矿石。



图 2-5-1 食盐晶体



图 2-5-2 水晶晶体



图 2-5-3 雪花晶体

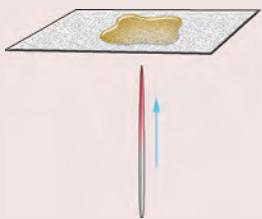
玻璃、松香、沥青、橡胶等都是非晶体，没有天然规则的几何形状。

蔗糖受潮后会粘在一起形成糖块，看起来没有特定的几何形状。但是用放大镜仔细观察，会发现组成糖块的是一个个晶体颗粒。粘在一起的糖块是多晶体（polycrystal），单个的晶体颗粒是单晶体（monocrystal）。由于多晶体是由许多单晶体杂乱无章组合而成的，所以多晶体没有特定的几何形状。金属和岩石就是两种最常见的多晶体。

在初中的学习中我们知道，晶体有固定的熔点，非晶体没有固定的熔点。通过加热熔化的方法可判断哪种固体物质是晶体，哪种是非晶体。那么，晶体与非晶体的物理性质还有什么差异呢？


观察与思考

取一张云母片，在上面涂一层很薄的石蜡，然后用烧热的钢针去接触云母片，如图 2-5-4 (a) 所示，观察接触点周围的石蜡熔化后所成的形状，再在玻璃片上做同样的实验。最后在图 2-5-4 (b) (c) 中分别画出熔化了的石蜡在云母片和玻璃片上的形状，比较观察到的实验现象，并与同学交流对该实验现象的看法。



(a) 烧热的钢针



(b) 云母片



(c) 玻璃片

图 2-5-4 石蜡熔化区域的形状

上述实验现象表明，云母片沿不同方向上的导热性能是不同的，而玻璃片沿不同方向的导热性能是相同的。事实上，单晶体在不同的方向上不仅导热性能不同，而且机械强度、导电性能和光的折射率等其他物理性质也不同，这类现象称为各向异性 (anisotropy)。非晶体沿各个方向的物理性质都是一样的，这叫作各向同性 (isotropy)。由于多晶体是由许多单晶体杂乱无章地组合而成的，所以多晶体在一般情况下是各向同性的。

晶体的微观结构

晶体和非晶体在外形和物理性质上存在这么大的差异，人们猜想可能是由于它们的微观结构不同。同时，人们发现一些天然晶体或矿石，无论大小，都有特定的相似形状。那么，是否是微观排列相似导致特定的形状？1848 年，法国物理学家布拉维 (A. Bravais, 1811—1863) 提出空间点阵的假说，认为晶体内部的微粒是有规则地排列着的。1912 年，德国物理学家劳厄 (M. Laue, 1879—1960) 利用 X 射线进行晶体衍射实验，证实了这种假说。

在晶体中，晶体微粒都是按照一定的规则排列的，具有空间上的周期性。如图 2-5-5 所示是食盐的晶体微观结构示意图，在晶体中，晶体微粒间相互作用很强，其热运动不足以克服它们相互间的的作用力而远离，最终表现为在某平衡位置附近不停地振动，图中所画的点为它们振动的平衡位置。

在不同条件下，同种物质的微粒在空间按不同的规则排列，会生成不同的晶体。它们宏观的几何形状不同，物理性质也会不同。如

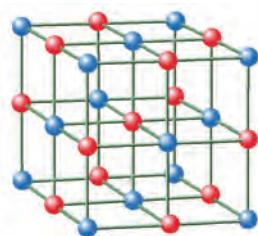
图 2-5-5 食盐
晶体的微观结构

图2-5-6 (a) 所示, 碳原子按图中排列就成为金刚石, 原子间的相互作用力很强, 因而硬度大, 可用来做切割工具; 碳原子按图 2-5-6 (b) 排列就成为石墨, 它呈层状分布, 层与层间距较大, 原子间相互作用力较小, 故石墨质地松软, 可用来做润滑剂. 1985 年, 人们制备出了由 60 个碳原子构成的富勒烯 (又称足球烯), 如图 2-5-6 (c) 所示, 科学家们又陆续发现了碳原子个数分别为 78, 82, 84, 90, 96 等多个同素异形体. 它们的应用价值也在不断探索中. 2004 年, 英国物理学家安德烈·海姆 (A. Geim, 1958—) 和俄罗斯物理学家康斯坦丁·诺沃肖洛夫 (K. Novoselov, 1974—) 成功从石墨中分离出石墨烯, 如图 2-5-6 (d) 所示, 两人因此获得 2010 年的诺贝尔物理学奖.

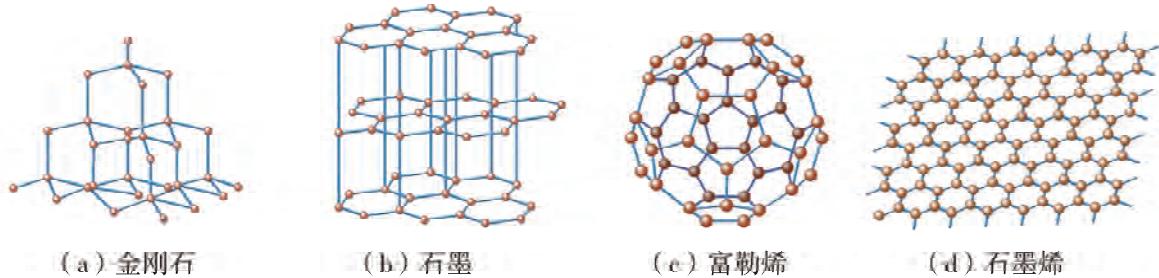


图 2-5-6 碳的四种不同微观结构

讨论与交流

如图 2-5-7 所示是一个平面上晶体微粒排列的情况. 请观察沿不同方向单位长度上微粒的数目是否相同, 并思考引起晶体各向异性的原因.

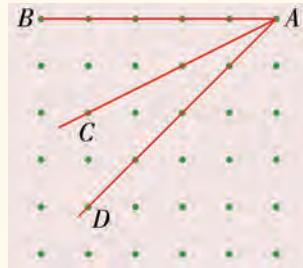


图 2-5-7 晶体各向异性
的微观解释

组成晶体的微粒是对称排列的, 形成很规则的几何空间点阵, 空间点阵排列成不同的形状, 就在宏观上呈现为晶体不同的几何形状. 而非晶体内部的微粒是无规则地均匀排列的, 没有一个方向比另一个方向特殊, 因此表现为各向同性.

人类对晶体与非晶体的原子种类与排列的人工组合的研究, 促进了材料科学与技术的不断发展. 例如, 在高纯度单晶硅中掺入某些特定的杂质会导致导电性能突变, 该特性的发现促进了半导体技术的迅猛发展; 单晶空心叶片在航空发动机的应用, 使得发动机的使用寿命与性能大幅提升等.

液晶

1888 年, 奥地利植物学家莱尼兹尔 (F. Reinitzer, 1857—1927) 在合成胆甾醇时发现,

此类有机化合物在固态向液态转化的过程中存在着混浊的中间态。次年，德国物理学家莱曼（O. Lehmann, 1855—1922）发现，这个由固态向液态转化的中间态液体具有与晶体相似的性质，故称为液态晶体，简称液晶（liquid crystal）。液晶在力学性质上与液体相同，具有流动性、连续性，可以形成液滴；在光学性质、电学性质等方面又具有明显的各向异性，因而又具有晶体的某些性质。液晶刚被发现时并没有得到太大关注，直到近百年后，人们发现液晶分子的排列可以受到电的控制而改变其光学性质，从而可当作显示材料，这才重新引起人们的极大兴趣。

液晶的分子有些是长棒状的，有些是碟状或板状的。以长棒状液晶为例，在自然状态下分子有彼此平行排列的倾向。它们沿一定方向的排列比较整齐，但彼此间前后左右的位置可以变动。这好像装在铅笔盒中的许多铅笔，它们既能左右滚动，又能前后滑动，但始终保持排列的方向不变，如图2-5-8所示。

长棒状液晶对外界的某些作用很敏感。在外加电压的影响下，液晶的分子不再平行排列，液晶会由透明状态变成混浊状态，去掉电压又恢复透明。利用液晶的这一特性可以制作显示元件。在两电极间用液晶涂写文字或数码，加上适当电压，透明的液晶变得混浊，文字或数码就显示出来了。这就是早期的液晶数码管（如图2-5-9所示）的显示原理。

随着电子技术和其他技术的迅速发展，液晶显示技术已取得了重大突破。目前，人们把大规模集成电路技术与液晶技术结合在一起，生产出高响应速度、高亮度、高对比度，色彩艳丽、节能的液晶显示屏（如图2-5-10所示），其被广泛应用于手机、电脑显示器、液晶电视机等。近年来，液晶理论在细胞生物学和分子生物学中也得到了发展，液晶的基础理论研究成为凝聚态物理学的一个重要分支。随着科学技术的进步，液晶的理论和技术已在电子工业、航空、生物、医学等领域取得长足发展和广泛应用。

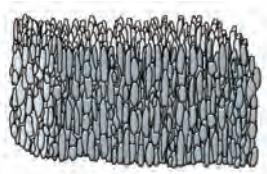


图2-5-8 长棒状（向列型）液晶

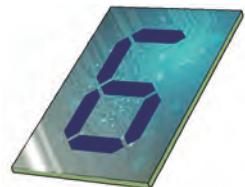


图2-5-9 液晶数码管



图2-5-10 液晶显示屏



实践与拓展

- 将食糖颗粒和高锰酸钾颗粒置于放大镜下观察，注意用针翻动晶体，仔细看清晶体各个面的形状，画出观察到的晶体立体图，并跟同学相互交流观察的结果。
- 搜集相关资料，通过具体事例描述液晶给我们生活带来的巨大变化。

律动的 OLED 显示屏

2017 年底，中国首个互动体验型“OLED 新视界”落户广州塔。据了解，广州塔内的“OLED 新视界”设有三处体验区：一是在登塔大厅的一组波浪形超级大屏幕，被称为“OLED 波浪穹顶”；二是“OLED 隧道”，是现今全球最大规模的“OLED 隧道”；三是位于广州塔一层缓行通道的“OLED 显示材料科普馆”，展示主题包括显示技术的进化、OLED 时代的到来和 OLED 最尖端显示屏等，游客可以在馆内了解 OLED 的前世今生。

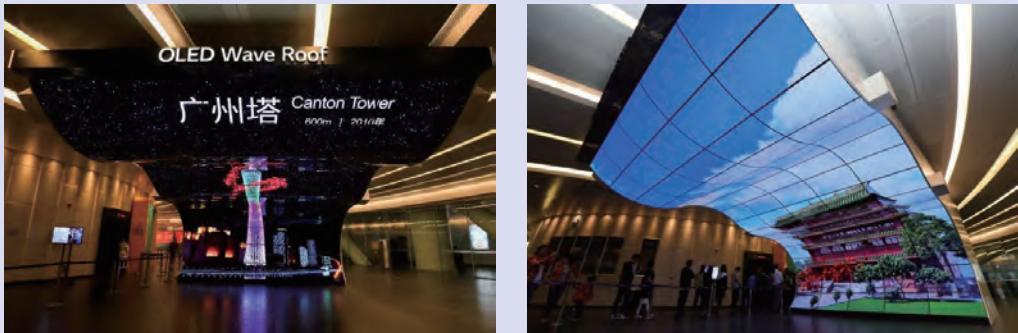


图 2-5-11 广州塔内的 OLED 波浪穹顶

OLED (Organic Light-Emitting Diode) 即有机发光二极管，是一种由有机分子薄片组成的固态设备。根据材料特性的不同，通电之后可以发出红、绿、蓝三色光，构成基本色彩。OLED 具有不需背光源、对比度高、厚度薄、视角广、反应速度快、使用温度范围广、构造及制程较简单等优点，甚至可以实现卷曲、折叠、透明等外观设计，极大地拓展了显示器的物理形态。

OLED 显示技术现已广泛应用于智能手机、电视面板、平板电脑、车载面板、智能可穿戴设备和 AR/VR 等领域，和液晶一样是现在主流的显示技术之一。据估算，到 2020 年，全球 OLED 出货量将达到 9 亿片。我国 OLED 产业具备一定的研发及产业化能力，部分领域拥有自主技术。2017 年 10 月 26 日，我国首条柔性显示屏生产线量产，该生产线是由我国企业完全自主设计、开发和建造，采用了世界上最先进的蒸镀工艺，每年可生产 7000 万块柔性显示屏。该生产线的量产，彻底打破了国外企业在该领域的垄断，大大增强了我国柔性显示屏的竞争力，将有力推动我国显示屏制造产业走向世界最先进行列。

我国在“十三五”国家重点研发计划中已经把发展印刷 OLED 技术作为重点支持项目之一。据不完全统计，2017 年全球正在建设及规划中的 OLED 生产线有 15 条，其中有 11 条设在中国，投资金额达到 4000 亿元。我国已成为当今世界 OLED 产业发展最迅猛的国家之一。



练习

1. 观察对比图 2-5-6 中金刚石、石墨、富勒烯和石墨烯的微观结构，判断下列几种说法的正误，并说明原因。

- (1) 它们的物理性质有很大的差异。
 - (2) 金刚石是单晶体，富勒烯是多晶体。
 - (3) 它们是同一物质，只是内部微粒的排列不同。
 - (4) 由于它们内部微粒排列规则不同，所以金刚石是晶体，石墨是非晶体。
2. 关于晶体与非晶体，下列说法正确的是（ ）。
- A. 晶体能溶于水，而非晶体不能溶于水
 - B. 晶体内部的物质微粒是有规则地排列，而非晶体内部的物质微粒是不规则地排列
 - C. 晶体内部的物质微粒是静止的，而非晶体内部的物质微粒在不停地运动着
 - D. 在物质内部的各个平面上，微粒数相等的是晶体，不相等的是非晶体
3. 如图 2-5-12 所示是常见的灯饰水晶球。通过其外形，你能判断出其是晶体，还是非晶体？有什么方法可以进一步验证你的判断？
4. 晶体和非晶体在熔解时有什么不同，怎样从它们的微观结构来说明这种不同？
5. 请列举出液晶显示器相对于其他显示器的优缺点。除教科书介绍的内容外，你还知道液晶有哪些应用？根据液晶的特点，设计一项“应用液晶”的小发明或写一篇关于液晶的小论文。



图 2-5-12

第六节

新材料

材料的发展推动了人类文明和社会不断地进步，可以说，人类发展史就是人类不断发明和使用新材料的过程。现在，人类已进入新材料时代，各种新材料层出不穷。下面我们简单介绍一些典型的新材料。

半导体材料

半导体材料 (semiconductor material) 的导电能力介于导体与绝缘体之间。它有一个最重要的性质，如果在纯净的半导体中掺入某些微量元素作为杂质，则其导电性能将会发生显著变化，即半导体的导电性能可通过掺杂来控制。人们利用半导体这一特性制造出了各种不同用途的半导体电子器件。

硅、锗是目前应用最广泛的半导体材料，95%以上的集成电路芯片都是在单晶硅片上制作的。随着集成工艺的提高，其内部元器件的工艺尺寸已缩小到几个纳米的大小，晶片上可集成超过10亿个电子元器件。电路及电子元器件的高度集成，使得各种功能组件小型化、微型化成为可能。现在一部手掌大的手机，集成了光线、距离、重力、加速度、磁场、指纹等十几种传感器，以及多个功能模块以支持通话、上网、导航、拍照等各种功能。



图 2-6-1 将单晶硅锭
切成的圆晶片

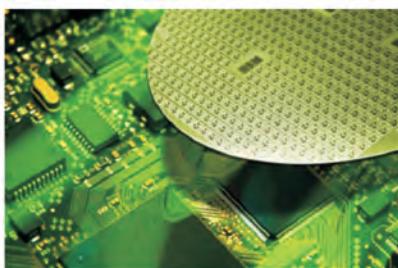


图 2-6-2 用圆晶片
制成的集成芯片

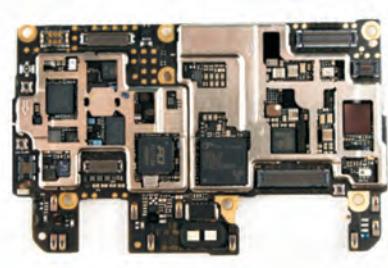


图 2-6-3 手机内部的
集成芯片和电子元件

近些年，半导体材料在太阳能发电、余热发电领域成为科学的研究热点。半导体制成的光伏材料能将太阳能直接转化为电能。目前，人们致力于降低光伏材料成本和提高发电效率，使光伏发电的成本与传统发电方式相当，从而为大规模应用创造条件。半导体热电材料是将热能直接转化为电能的材料，已在航天领域得到应用。在航天探测器上，人们采用热电材料将放射性同位素衰变时放出的热量转化成电能来维持探测器电子设备的运行。

由于放射性同位素的半衰期较长，故能维持航天探测器长时间的运行。

迄今为止，半导体材料制造的电子产品已广泛应用于我们的生产、生活中，从雷达、火箭到电脑、手机，从互联网、卫星导航到网络购物、视频聊天，都离不开半导体。正是半导体材料与技术的应用，使得微电子等信息技术在 21 世纪迅速崛起，开创了人类信息化的全新时代。

纳米材料

纳米材料（nanomaterial）是当今新材料研究最富有活力和影响力的领域。纳米技术的应用，使得人类能在原子水平操作物质，从而更加自由地搬动原子和重组分子，组成具有特殊性能的新材料。

纳米材料是指在三维空间中至少有一维处于纳米尺度范围（ $1 \sim 100 \text{ nm}$ ）或由它们作为重要单元构成的材料，这大约相当于 $10 \sim 100$ 个原子紧密排列在一起的尺度。与宏观物质相比，纳米材料通常硬度、韧性、延展性等力学性能更好，熔点、磁性、导热和导电性降低，对光和物质具有更好的吸收和吸附性，化学活性大大增加。

纳米材料具有更强的韧性和强度以及吸附性能。如碳纳米管是非常细的中空管状纳米材料，其强度是钢的 100 倍，而密度是钢的 $1/6$ ，故有人设想用碳纳米管来制造从地球到人造卫星的太空云梯。另外，碳纳米管还能够大量地吸附氢气，就好像

自带许多个“纳米钢瓶”，如图 2-6-4 所示。研究表明，常温常压下约 $2/3$ 的氢气能从碳纳米管里释放出来。据预测，对于现在正在研制的氢气汽车，只需要携带 1.5 升左右的碳纳米管，就可以行驶 500 千米。

纳米梯度材料的结构单元尺寸（如晶粒尺寸）在空间上呈梯度变化，从纳米尺度连续增加到宏观尺度，能解决传统工艺和材料中的一些难题。如在航天用的发动机中，燃烧室的内表面需要耐高温，其外表面却要与冷却剂接触。当用金属和陶瓷纳米颗粒按其含量逐渐变化的要求混合后烧结成形时，就能达到燃烧室内侧耐高温、外侧有良好导热性的要求。

纳米材料能改变材料的表面活性和生物活性，可以用来制造冰箱、洗衣机、空调等电器的内壁或外壳，可以有效地防止微生物滋生，从而不留异味、易于清洗。在军事上，将高分子纤维与纳米氧化铝、氧化硅、氧化钛复合纳米粉体以及铁氧体磁性纳米材料结合，形成的复合材料涂装在飞机上，能对雷达起到很强的隐身作用。在医学上，有科学家成功地研制了以纳米磁性材料为载体的靶向药物，可用于癌症、血栓等各种疾病的诊断与治疗。

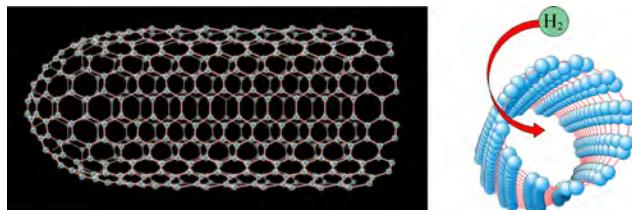


图 2-6-4 碳纳米管



图 2-6-5 歼-20 隐形战机

作为目前发现的最薄、强度最大、导电和导热性能最强的一种新型纳米材料，石墨烯被称为“黑金”，是“新材料之王”，科学家甚至预言石墨烯将“彻底改变21世纪”，极有可能掀起一场席卷全球的颠覆性新技术、新产业革命。

超材料

超材料 (metamaterial) 一般定义为具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构的复合材料，是将人造单元结构以特定方式排列形成的，具有特殊电、磁特征的人造结构材料。典型的超材料包括左手材料、光子晶体、超磁性材料等。

左手材料是指一种介电常数和磁导率同时为负值的材料。电磁波在其传播时，由于波矢、电场和磁场符合左手定则，因此被称为“左手材料”。左手材料可用于制造高指向性天线，用于聚焦微波波束，实现“完美透镜”，或用于电磁波隐身及制造各种新型微波器件。光子晶体能使某一频率范围的电磁波不能在其内部传播，可用于控制光子的流动，制造光子晶体光纤、光子晶体微带天线等。

超常的物理特性使得超材料的应用前景十分广泛，应用范围覆盖工业、军事、生活等各个方面。比如，电磁超材料可以用于慢波结构等元器件的制作。在应用于雷达领域时，利用超材料的频率选择和负折射率特性，可以制造隐身涂层，实现射频隐身，提高战场生存能力。我国在超材料领域已取得了多项原创性成果，基于这些实验成果展开的产业化也在不断地加快，相信在不久的将来超材料会给人类社会的发展带来新的变革。

尽管新材料根据其功能或结构的差异性可以分为有机材料、合成无机材料、复合材料以及人工超结构材料等，然而，它们在分类上也可能有交叉。比如，太阳能电池材料具有人工异质结构，也是半导体材料，吸光层常常又是纳米级别。因此，太阳能电池材料可以属于人工超结构材料中的纳米材料类，也可以属于新性能复合材料，还可以属于无机功能新材料。

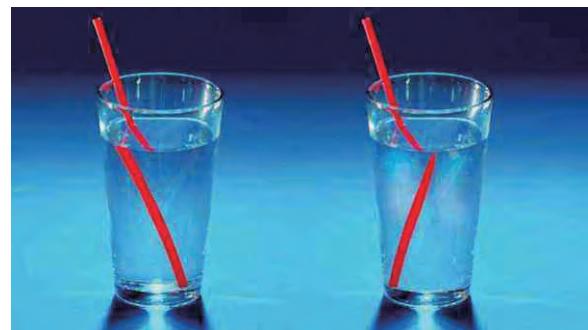


图 2-6-6 左手材料的负折射现象



实践与拓展

查阅资料，了解新材料在生产和科技中的应用。

石墨烯

石墨烯是一种由碳原子组成的六角型呈蜂巢晶格的二维碳纳米材料。其具有优异的光学、电学、力学特性，在材料学、微纳加工、能源、生物医学等方面具有重要的应用前景，被认为是一种未来革命性的材料。

2004年，英国曼彻斯特大学的安德烈·海姆和康斯坦丁·诺沃肖洛夫从高定向热解石墨中剥离出石墨片，然后将薄片的两面粘在一种特殊的胶带上，撕开胶带，就能把石墨片一分为二。不断地这样操作，于是薄片越来越薄。最后，他们得到了仅由一层碳原子构成的薄片，这就是石墨烯。之后，他们又在石墨烯体系中分别发现了整数量子霍尔效应及常温条件下的量子霍尔效应，因此获得2010年度诺贝尔物理学奖。

随着石墨烯的研究与应用开发持续升温，石墨和石墨烯有关的材料在电池电极材料、半导体器件、透明显示屏等各方面显现出广泛的应用前景。例如，石墨烯可以用来制作晶体管，由于石墨烯结构的高度稳定性，使得这种晶体管在接近单个原子的尺度上依然能稳定地工作。相比之下，目前以硅为材料的晶体管在10纳米左右的尺度上就会失去稳定性。另外，石墨烯是电化学生物传感器的理想材料，石墨烯制成的传感器在医学上检测多巴胺、葡萄糖等具有良好的灵敏性。鉴于石墨烯材料优异的性能及其潜在的应用价值，人们一直致力于在不同领域尝试用不同方法来制备低成本、高质量、大面积的石墨烯材料，并逐步走向产业化。

随着批量化生产以及大尺寸等难题的逐步突破，石墨烯的产业化应用步伐正在加快。我国在石墨烯研究方面具有独特的优势，且石墨储备丰富。2018年3月31日，我国首条全自动量产石墨烯有机太阳能光电子器件生产线在山东菏泽启动，该项目主要生产可在弱光下发电的石墨烯有机太阳能电池，破解了应用局限、对角度敏感、不易造型这三大太阳能发电难题。

石墨烯虽然从合成和证实存在到今天只有短短十几年的时间，但是已成为近年科学界研究的热点。其优异的光学、电学、力学、热学性质促使研究人员不断对其进行深入研究，随着石墨烯的制备方法不断被开发，石墨烯必将在不久的将来被更广泛地应用到各个领域中。

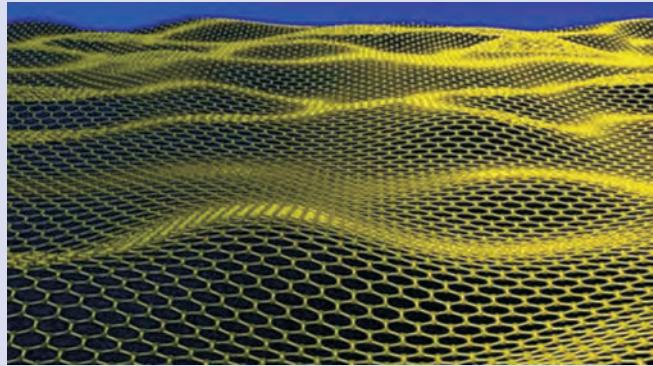


图2-6-7 石墨烯结构



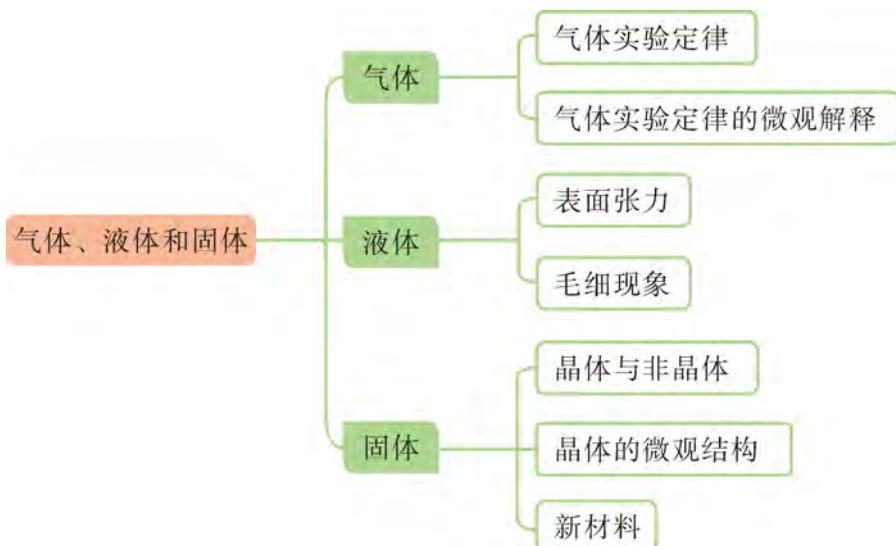
练习

1. 寻找生活中应用陶瓷、金属、半导体、有机高分子等材料的例子，并体会它们在物理性质上的差别.
2. 查阅资料，了解“柔性电子材料”和其主要应用，以及国际上有哪些机构在研究该材料.
3. 书法所用的墨条，其传统的制作方法通常是以松枝或油脂等材料不完全燃烧所产生的烟雾颗粒作为主要原料. 这些烟雾能在空气中随气流袅袅升起，也会消散在空气中，其颗粒非常细小，直径 $30\sim150\text{ nm}$ ，是人类最早利用的纳米材料. 纳米材料在大自然中也有很多的应用，请查阅相关资料，向同学们介绍大自然是如何巧妙应用纳米材料的.
4. 石墨烯特有的物理学特性使其有望被广泛应用于晶体管、触摸屏、复合材料等众多领域，同时有望帮助物理学家在量子物理学研究领域取得新突破. 英国曼彻斯特大学的物理学家安德烈·海姆和康斯坦丁·诺沃肖洛夫因从事石墨烯的研究并揭示其性质而获得2010年的诺贝尔物理学奖. 请查阅相关资料，了解石墨烯除了具有高强韧性的物理性质外，还有哪些特性，在哪些方面具有开发的潜能.

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。

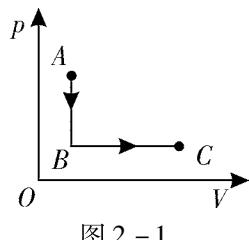


回顾与评价

1. 我们做实验时的气体实际上都不是理想气体，为什么还要建立理想气体模型？
2. 气体实验定律以及液体的表面张力可以用来解释生活中的哪些现象？
3. 谈谈新材料对人类生活和社会发展产生的影响。

习题二

1. 下列关于气体、液体和固体性质的说法，正确的是（ ）.
 - A. 把一枚针轻放在水面上，它会浮在水面，这是由于水表面存在表面张力的缘故
 - B. 水在涂有油脂的玻璃板上能形成水珠，而在干净的玻璃板上却不能，这是因为油脂使水的表面张力增大的缘故
 - C. 在绕地球飞行的空间站中，自由飘浮的水滴呈球形，这是表面张力作用的结果
 - D. 在毛细现象中，毛细管中的液面有的升高，有的降低，这与液体的种类和毛细管的材质有关
 - E. 当两薄玻璃板间夹有一层水膜时，在垂直于玻璃板的方向很难将玻璃板拉开，这是由于水膜具有表面张力的缘故
 - F. 木船浮在水面上是由于表面张力
 - G. 大块塑料粉碎成形状相同的颗粒，每个颗粒即为一个单晶体
 - H. 晶体具有天然的规则的几何形状，是因为物质微粒是规则排列的
 - I. 玻璃、石墨和金刚石都是晶体，木炭是非晶体
2. 下列相关说法正确的是（ ）.
 - A. 制作 LED 灯的核心材料是半导体材料
 - B. 制作手机中央处理器的材料是半导体材料
 - C. 石墨烯是一种纳米材料，它的物质组成只有碳这一种元素
 - D. 同种物质，当它以纳米材料的形态出现时，其物理性质可能会有很大的不同
3. 下列现象是由于液体的表面张力而引起的是（ ）.
 - A. 液体与固体、气体不同，它在不同容器内，尽管形状不同，但体积相同
 - B. 两滴水银相互接触，立即合并成一滴
 - C. 新的棉织品水洗后都要缩水
 - D. 小昆虫能在水面上自由走动
4. 如图 2-1 所示是一定质量理想气体的压强 p 与体积 V 的关系图像，它由状态 A 经等容过程到状态 B，再经等压过程到状态 C。设 A、B、C 状态对应的温度分别为 T_A 、 T_B 、 T_C ，则下列关系式中正确的是（ ）.
 - A. $T_A < T_B$, $T_B < T_C$
 - B. $T_A > T_B$, $T_B = T_C$
 - C. $T_A > T_B$, $T_B < T_C$
 - D. $T_A = T_B$, $T_B > T_C$



5. 如图 2-2 所示的是医院用于静脉滴注的示意图，倒置的输液瓶上方有一气室 E，密封的瓶口处的软木塞上插有两根细管，其中 A 管与大气相通，B 管为输液软管，中间又有一滴壶 C，而其 D 端则通过针头接入人体静脉。

(1) 若气室 E、滴壶 C 中的压强分别为 p_E 、 p_C ，则它们与外界大气压强 p_0 的大小顺序应为_____。

(2) 在输液瓶悬挂高度与输液软管内径确定的情况下，药液滴注的速度是_____（选填“越滴越慢”“越滴越快”或“恒定”）。

(3) 在输液过程中（瓶中尚有液体），下列说法正确的是（ ）。

①瓶中上方气体的压强随液面的下降而增大；②瓶中液面下降，但 E 中气体的压强不变；③滴壶 C 中的气体压强随瓶中液面的下降而减小；④在瓶中药液输完以前，滴壶 C 中的气体压强保持不变。

- A. ①③ B. ①④ C. ②③ D. ②④

6. 如图 2-3 (a) 所示为一种减震垫，上面布满了圆柱形薄膜气泡，每个气泡内充满体积为 V_0 、压强为 p_0 的气体。当平板状物品平放在气泡上时，如图 2-3 (b) 所示，气泡被压缩。若气泡内气体温度保持不变。

- (1) 下列关于圆柱形薄膜气泡内气体压强的说法，正确的是（ ）。

- | | |
|-----------------------|--------------------|
| A. 气泡内压强 p_0 大于大气压强 | B. 该压强是由气体的重力产生的 |
| C. 该压强是由分子的斥力产生的 | D. 该压强是由大量分子的碰撞产生的 |

(2) 当体积压缩到 V 时，气泡与物品接触面的面积为 S ，求此时每个气泡内气体对接触面处薄膜的压力。

(3) 当物品放在气泡上后，气泡内气体的压强增加了 Δp ，求放上物品前后此气泡内气体体积的变化量。

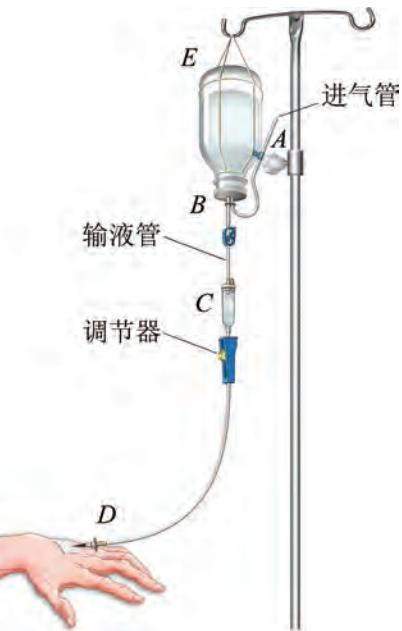
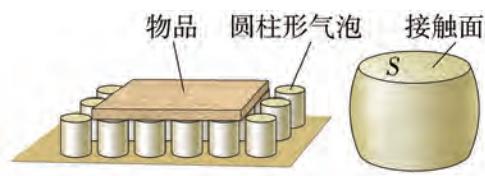


图 2-2



(a)



(b)

图 2-3

7. 如图 2-4 (a) 所示，左端封闭、内径相同的 U 形细玻璃管竖直放置，左管中封闭有长为 $L = 20 \text{ cm}$ 的空气柱，两管水银面相平，水银柱足够长。已知大气压强 $p_0 = 75 \text{ cmHg}$ 。

(1) 若将装置翻转 180°，使 U 形细玻璃管竖直倒置（水银未溢出），如图 2-4 (b) 所示。当管中水银静止时，求左管中空气柱的长度。

(2) 若将图 2-4 (a) 中的阀门 S 打开, 缓慢流出部分水银, 然后关闭阀门 S, 右管水银面下降了 $H = 35 \text{ cm}$, 求左管水银面下降的高度.

8. 用如图 2-5 所示的装置测量某种矿物质的密度, 操作步骤和实验数据如下:

a. 打开阀门 K, 使管 A、容器 B、容器 C 和大气相通. 上下移动管 D, 使水银面与刻度 n 对齐;

b. 关闭阀门 K, 向上举管 D, 使水银面达到刻度 m 处. 这时测得 B、D 两管内水银面高度差 $h_1 = 19.0 \text{ cm}$;

c. 打开阀门 K, 把 $m = 400 \text{ g}$ 的矿物质投入容器 C 中, 使水银面重新与刻度 n 对齐, 然后关闭 K;

d. 向上举管 D, 使水银面重新到达刻度 m 处, 这时测得 B、D 两管内水银面高度差 $h_2 = 20.6 \text{ cm}$.

已知管 A 和容器 C 的总体积为 $V_{AC} = 1000 \text{ cm}^3$, 求该矿物质的密度.

9. 某同学制作了一个如图 2-6 所示的简易温度计, 其中, 一根两端开口的玻璃管水平穿过玻璃瓶口处的橡皮塞, 玻璃管内有一段长度可忽略的水银柱. 当温度为 $T = 280 \text{ K}$ 时, 水银柱刚好处在瓶口位置, 此时该装置密封气体的体积 $V = 480 \text{ cm}^3$. 已知大气压强为 $p_0 = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$, 玻璃管内部横截面积为 $S = 0.4 \text{ cm}^2$, 瓶口外玻璃管的长度为 $L = 48 \text{ cm}$.

(1) 求该温度计能测量的最高温度.

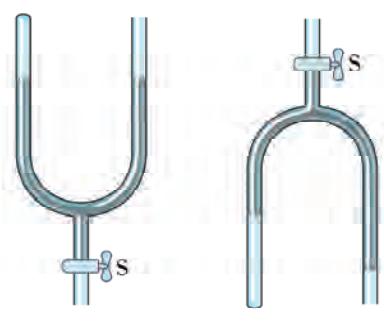
(2) 玻璃管上所标记的温度均匀吗?

(3) 若要提高此温度计测量的范围, 应该如何改进?

10. 如图 2-7 所示, 一水平放置的薄壁气缸, 由截面积不同的两个圆筒连接而成, 质量均为 $m = 1.0 \text{ kg}$ 的活塞 A、B 用一长度为 $3L = 30 \text{ cm}$ 、质量不计的轻细杆连接成整体, 它们可以在筒内无摩擦地左右滑动且不漏气. 活塞 A、B 的面积分别为 $S_A = 200 \text{ cm}^2$ 和 $S_B = 100 \text{ cm}^2$, 气缸内 A 和 B 之间封闭有一定质量的理想气体, A 的左边及 B 的右边都是大气, 大气压强始终保持为 $p_0 = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$. 当气缸内气体的温度为 $T_1 = 500 \text{ K}$ 时, 活塞处于图示位置平衡. 求:

(1) 此时气缸内理想气体的压强为多大?

(2) 当气缸内气体的温度从 $T_1 = 500 \text{ K}$ 缓慢降至 $T_2 = 400 \text{ K}$ 时, 活塞 A、B 将向哪边移动? 移动的位移为多大?



(a) (b)

图 2-4

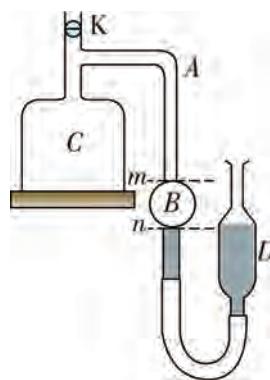


图 2-5



图 2-6

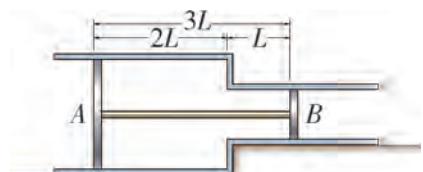
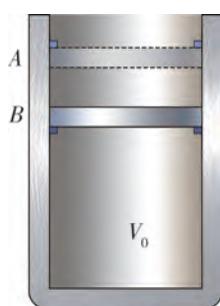


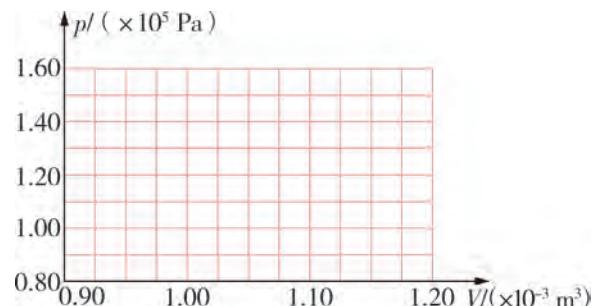
图 2-7

11. 如图 2-8 (a) 所示, 坚直放置的气缸内壁光滑, 横截面积为 $S = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, 活塞的质量为 $m = 2 \text{ kg}$, 厚度不计. 在 A 、 B 两处设有限制装置, 使活塞只能在 A 、 B 之间运动, B 下方气缸的容积为 $V_0 = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$, A 、 B 之间的容积为 $2.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, 外界大气压强 $p_0 = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$. 开始时活塞停在 B 处, 缸内气体的压强为 $0.9p_0$, 温度为 27°C , 现缓慢加热缸内气体, 直至 327°C . 求:

- (1) 活塞刚离开 B 处时气体的温度 t_2 .
- (2) 缸内气体最后的压强.
- (3) 在图 2-8 (b) 中画出整个过程的 p - V 图线.



(a)



(b)

图 2-8

12. 某种喷雾器贮液筒的总容积为 6 L , 若装入 5 L 的药液后将加水口密封盖好, 如图 2-9 所示. 拉压一次与贮液筒相连的活塞式打气筒, 可以把 0.2 L 压强为 1 atm 的空气打进贮液筒. 设打气过程气体温度不变, 求:

(1) 关闭阀门, 用打气筒向贮液筒内再打气两次, 当液面上方气体温度与外界温度相等时, 气体压强为多大? 并从微观上解释气体压强变化的原因.

(2) 要使贮液筒中液面上方的空气压强达到 4 atm , 打气筒要拉压多少次?

(3) 在贮气筒内气体压强达 4 atm 时停止打气, 打开喷雾阀门使其喷雾, 直至内外气体压强相等, 这时筒内还剩多少药液?

(4) 为了保证打气后, 即使打开喷雾阀门不再打气也能把药液喷光, 那么至少要拉压多少次打气筒?

13. 当某一地区受到高温辐射后, 就会形成热气团, 热气团在上升至高空的过程中, 会发生哪些变化? 请通过请教老师、上网查阅等方式, 结合本章的知识, 写一篇证据充分、分析合理、结论基本正确的科普报告.

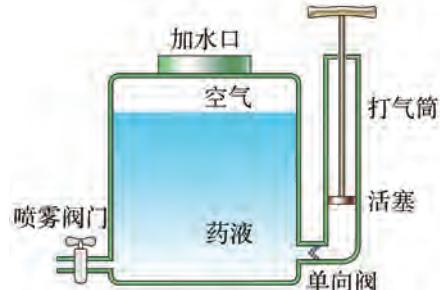


图 2-9

第三章

热力学定律

在自然界中，物质的运动形式千变万化，而运动形式的变化往往伴随着能量的变化。热力学并不考虑物质的微观结构和过程，而是针对宏观现象，从能量观点出发，分析研究宏观热现象中能量传递与转化的关系和条件。因此，热力学的研究对象是非常广泛的，有关能量从一种形式转化为其他形式以及消耗能量做功等问题，都可以用热力学的方法进行研究。

在本章的学习中，我们主要介绍热力学基础知识，包括反映能量传递和转化数量关系的热力学第一定律，被誉为19世纪自然科学三大发现之一的能量守恒定律，以及反映能量传递和转化方向的热力学第二定律。



第一节

热力学第一定律

我们知道，宏观物体因机械运动而具有动能，因高度而具有重力势能，因发生弹性形变而具有弹性势能。在微观领域，物体内部的分子也存在动能和势能。

物体的内能

弹簧具有弹性势能，弹簧没有形变时，弹力为零，弹性势能最小；拉伸或压缩弹簧时，必须克服弹簧的弹力做功，弹簧的弹性势能增大。类似地，由于分子间存在相互作用力，分子间具有由它们的相对位置决定的势能，取无穷远处分子间势能为零，则两分子间的势能和分子间距的关系如图 3-1-1 所示。当分子间的距离为平衡间距时，分子间的作用力为零，分子势能最小；改变分子间距，则必须克服分子间的引力或斥力做功，分子势能增大。另外，物体内部的分子由于做热运动还具有分子动能。我们把物体中所有分子的动能和分子势能的总和，叫作物体的内能（internal energy）。

显然，物体的内能跟物体的温度和体积都有关系。温度变化，分子动能改变，因而物体的内能发生变化；体积变化时，分子间距改变，分子势能发生变化，因而物体的内能发生变化。那么，用什么方式能使物体的温度、体积发生变化，从而改变物体的内能呢？

改变物体内能的两种方式

日常生活和生产中做功改变物体内能的例子很多。例如，擦火柴时，我们克服摩擦力做功，火柴头内能增加，温度升高，引发一系列化学反应使火柴燃烧起来，如图 3-1-2 所示；用锯子锯木头，我们克服摩擦力做功，锯条和木头温度升高，内能增加。这类“摩擦生热”的现象，实际上是因为做功而改变物体的内能。下面观察两个气体做功使内能改变的实验。

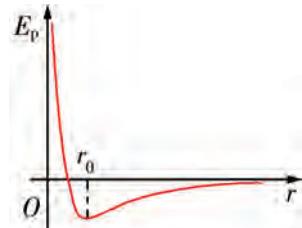


图 3-1-1 两分子间的势能和分子间距的关系



图 3-1-2 火柴头内能增加，温度升高



观察与思考

1. 如图 3-1-3 所示，在一个厚壁的玻璃筒里放一小块浸有乙醚的棉花，迅速压下活塞，能观察到什么现象？



图 3-1-3 观察玻璃筒中棉花的变化

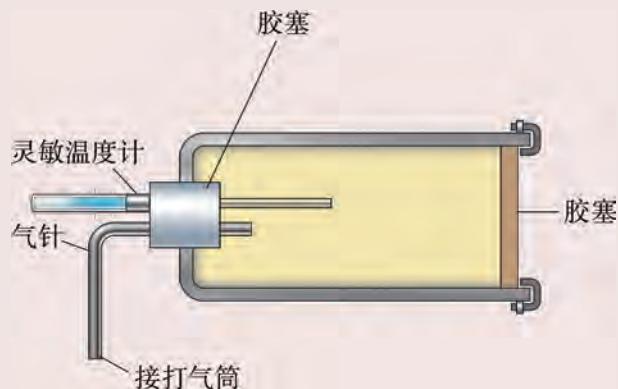


图 3-1-4 观察容器中温度变化

2. 如图 3-1-4 所示，在长圆柱形厚壁容器的一端通过胶塞插进一支灵敏温度计和一根气针，另一端用卡子卡住一个可移动的胶塞。用打气筒慢慢向容器打气，增大容器内的压强。当容器内的压强增大到一定程度时，打开卡子，气体冲开胶塞，可以从灵敏温度计观察到容器的温度会发生什么变化？

思考并解释观察到的实验现象。

上述实验中的气体由于压强不大，温度在常温范围内，因此均可视为理想气体。理想气体分子间距较大，可忽略分子间的相互作用力，即忽略分子间势能。所以理想气体内能只跟温度有关，与体积无关。上述实验表明，气体被压缩时，活塞对筒内的气体做功，气体的温度升高，内能增加；气体膨胀对外做功，气体的温度下降，内能减小。气体被压缩或膨胀时做功，气体的内能就发生变化。

做功可以改变物体的内能。但是，做功并不是改变物体内能的唯一方式。例如，将灼热的小铁块放入一盆水中，铁块的温度降低，内能减少；水的温度升高，内能增加。这个过程是通过热传递来实现的。由此可见，热传递也可以改变物体的内能，热传递过程中物体内能变化的量称为热量（heat）。习惯上我们所说的“物体吸热（或放热）多少”，实际上是指热传递使物体的内能增加（或减少）多少。



讨论与交流

做功和热传递都可以改变物体的内能，二者是等效的。那么，做功和热传递有什么区别呢？

我们可以用加热（热传递）的方法使一根铁棒的温度升高，也可以用摩擦生热（做功）的方法使它升高同样的温度。所以，对于改变物体的内能来说，热传递和做功是等效的，都是改变物体内能的方式。但二者仍有区别，做功的实质是内能与其他形式的能之间的转化，而热传递则是不同物体（或同一物体不同部分）之间内能的转移。

热力学第一定律及其应用

既然做功和热传递都可以改变物体的内能，那么，功、热量和内能的改变量之间又有什么关系呢？

一个物体，如果它和外界不发生热传递，则外界对物体所做的功 W 等于物体内能的增加量 ΔU ；如果外界对物体没有做功，则物体吸收的热量 Q 等于物体内能的增加量 ΔU ；如果外界同时对物体做功和进行热传递，则物体内能的增加量 ΔU 就等于物体吸收的热量 Q 和外界对物体做的功 W 之和。即

$$\Delta U = Q + W \quad (3.1.1)$$

式 (3.1.1) 表示功、热量和内能改变量间的定量关系，在物理学中叫作热力学第一定律 (first law of thermodynamics)。

讨论与交流

我们知道，外界既可以对物体做正功，也可以对物体做负功；物体既可以从外界吸热，也可能向外界放热；物体的内能可能增加，也可能减少。根据热力学第一定律的物理意义，如何规定 Q 、 W 和 ΔU 的符号，才能全面反映功、热量和内能改变量间的定量关系？

$Q > 0$ 表示_____， $Q < 0$ 表示_____；

$W > 0$ 表示_____， $W < 0$ 表示_____；

$\Delta U > 0$ 表示_____， $\Delta U < 0$ 表示_____。

我们知道，理想气体的内能只跟温度有关，与体积无关。下面我们就应用热力学第一定律来讨论理想气体等压过程中的能量转化关系。

如图 3-1-5 所示，设密封在容器内的理想气体在保持压强 p 不变的情况下，体积从 V_1 膨胀到 V_2 ，气体向外推动活塞，外界对气体做负功， $W < 0$ ，由盖-吕萨克定律 $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$

可知， $V_2 > V_1$ ， $T_2 > T_1$ ，气体温度升高，内能增加， $\Delta U > 0$ 。

由热力学第一定律可知， $Q = \Delta U - W > 0$ 。即理想气体在等压膨胀过程中从外界吸热，气体

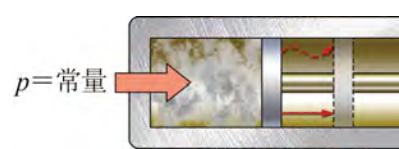


图 3-1-5 气体等压膨胀

吸收的热量一部分用来增加内能，另一部分转化为对外所做的功。

相反，如果在保持压强 p 不变的情况下，理想气体被压缩，体积从 V_1 压缩到 V_2 ，外界对气体做正功， $W > 0$ ，由盖-吕萨克定律 $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ 可知， $V_2 < V_1$ ， $T_2 < T_1$ ，气体温度降低，内能减小， $\Delta U < 0$ 。由热力学第一定律可知， $Q = \Delta U - W < 0$ ，即气体对外界放热，放出的热量等于外界对气体所做的功与气体内能减小量之和。

例题：如图 3-1-6 所示，某同学将空的玻璃瓶开口向下缓缓压入水中。设水温均匀且恒定，瓶内空气无泄漏，不计气体分子间的相互作用，则被淹没的玻璃瓶在下降过程中，气体是吸热还是放热，为什么？

分析：由于不计气体分子间的相互作用，故玻璃瓶内的气体可视为理想气体，其内能只与温度有关。依据热力学第一定律，只要知道气体对外界所做的功就可判断气体吸热还是放热。

解：被淹没的玻璃瓶在下降过程中，瓶内气体的压强随着水变深而逐渐变大，气体温度由于瓶壁导热性能良好，始终与水温一致，故瓶内气体可视为等温变化。由玻意耳定律可知，瓶内空气被等温压缩，体积减小，外界对瓶内气体做正功，气体温度不变，内能不变，即 $\Delta U = 0$ ，故瓶内气体放热，且放出的热量 Q 与外界对气体做的功 W 相等。



图 3-1-6

热量的本质

在历史上，热量这一概念最早是在 18 世纪通过“热质说”提出的。“热质说”认为，热是一种看不见、无重量的特殊物质——热质。物体的冷热程度取决于它所含有热质的多少。热质既不能产生，也不能消灭，只能从较热的物体传递到较冷的物体，在热传递过程中热质守恒。据此还规定了热量的单位“卡”(cal)：1 cal 是在标准大气压下使 1 g 水温度升高 1 ℃ 所需的热量。

“热质说”对热传递过程给出了令人满意的解释，但是，“热质说”不能解释摩擦生热的现象，因为它无法说明摩擦过程中热质的来源。1798 年，英国物理学家伦福德正是从这里找到了突破口，给出了否定热质存在的第一个实验证据。他在进行大炮钻孔加工时发现铜炮在钻了很短一段时间后，就会产生大量的热，而被钻头从大炮上钻削下来的铜屑更热。按照“热质说”的解释，当物质被钻削得越碎时，它容纳热质的热容量就变得越小。照此说来，被切削成屑的金属量越多，产生的热量就越



图 3-1-7 伦福德

多。而且伦福德发现用很钝的钻头钻削时，反而会比用锐利的钻头产生更多的热量。只要钻头长时间地工作下去，便可愈来愈多，甚至于无限多地产生热量。这显然与“热质说”相矛盾。

据此伦福德指出，热并不是一种物质，这些热量只能来自钻头钻削金属的机械运动。他还通过测量得出，钻削中产生的热近似地与钻孔机做的机械功成正比。伦福德的工作实质上表明：热和功之间是相互联系的，摩擦生热的过程是能量由一种形式转化为另一种形式的过程，其总能量保持不变。

由于伦福德的实验无法进行定量测量，因此他的观点并不被同时代的多数人所接受，直到19世纪40年代，英国物理学家焦耳以定量的实验测得热功当量的精确数值，才最终否定了“热质说”。

练习

1. 把一空的矿泉水瓶拧紧瓶盖后放入冰箱，经过一段时间取出，可以观察到什么现象？此过程中瓶内气体的内能如何变化？（不计分子势能）

2. 如图3-1-8所示，用隔板将一绝热气缸分成两部分，隔板左侧充有理想气体，右侧与绝热活塞之间是真空的。现将隔板抽开，气体会自发扩散至整个气缸。待气体达到稳定后，缓慢推压活塞，将气体压回到原来的体积。假设整个系统不漏气，则气体自发扩散前后内能变化了吗？为什么？气体在被压缩的过程中内能如何变化？为什么？

3. 如图3-1-9所示，瓶内装有少量的水，瓶口已塞紧，水上方空气中有水蒸气，用打气筒向瓶内打气，当塞子从瓶口跳出时，瓶内出现“白雾”。某同学对这一现象做了以下解释：水蒸气凝结成小水珠，温度降低。瓶内气体推动瓶塞做功，内能减小。该同学的描述准确吗？如果不准确，可以如何修正？

4. 如图3-1-10所示，一定质量的理想气体从状态A经等压过程到状态B。此过程中，气体压强 $p = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，吸收的热量 $Q = 7.0 \times 10^2 \text{ J}$ ，求此过程中气体内能的增量。



图3-1-8



图3-1-9

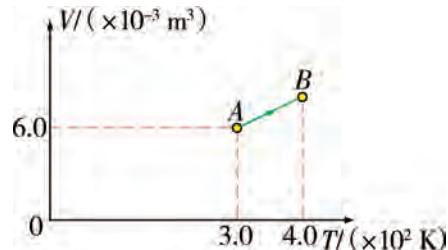


图3-1-10

第二节 | 能量守恒定律及其应用

热力学第一定律指出，做功和热传递是改变物体内能的两种方式，通过做功和热传递提供给一个物体多少能量，这个物体内能就改变多少，能量在转化和转移过程中守恒。

能量守恒定律

在常见的机械运动中，摩擦发热是难以避免的，因此机械能会有一部分转化为内能。

观察与思考

如图 3-2-1 所示是利用数据采集器，通过温度传感器与泡沫或者毛巾摩擦所测出的温度随时间的变化曲线。请选用不同的材料分别做实验，观察由数据采集器得到的温度随时间的变化曲线，看看使用哪一种材料能使温度变化较快。由此能得出什么结论？

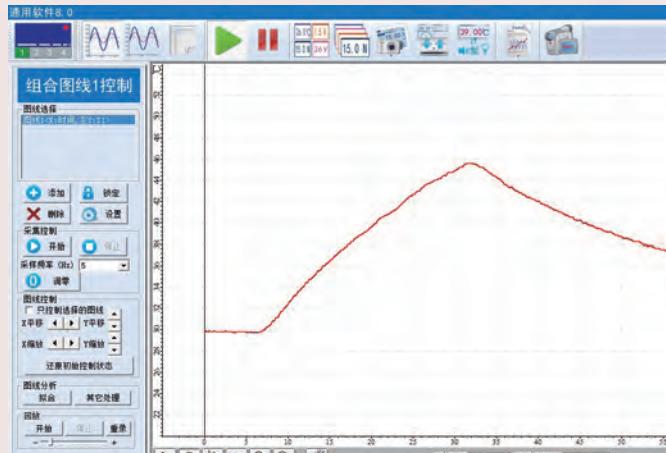


图 3-2-1 摩擦生热时，温度随时间的变化曲线

由上述实验可知，机械能可以通过摩擦生热转化为内能。其实不仅机械能，其他形式的能量也可以和内能互相转化。例如，通电导体温度升高，电能转化为内能；燃料燃烧过程中，化学能转化为内能；炽热的物体发光，内能转化为光能……大量事实证明，各种形式的能量都可以相互转化，并且在转化过程中守恒。

能量既不会凭空产生，也不会凭空消失，它只能从一种形式转化为其他形式，或者从一个物体转移到别的物体；在转化和转移过程中其总量不变。这就是能量守恒定律（law of conservation of energy）。

热力学第一定律实际上就是内能与其他形式的能量发生转化时的能量守恒定律。能量守恒定律不是由某一个人通过某一项研究得到的。在历史上，能量及其守恒的思想有着悠久的渊源，人类对于能量及其守恒的认识经历了由浅入深、由模糊到清晰的过程，很多科学家为此做了大量基础性的工作。目前，科学家公认的能量守恒定律的奠基人是德国医生迈耶（J. R. Mayer, 1814—1878）、英国物理学家焦耳和德国科学家亥姆霍兹（H. Helmholtz, 1821—1894）。

能量守恒定律于1860年前后得到了科学界的普遍承认，并成为全部自然科学和工程技术的基础。它是自然界的一条普遍规律，不仅适用于无机界，也适用于生命过程，一切违背能量守恒定律的观点，都被实践证明是错误的。因此，恩格斯（F. Engels, 1820—1895）把这一定律称为“伟大的运动基本定律”，并把这一定律和细胞学说、达尔文的生物进化论一起称为19世纪自然科学的三大发现。

第一类永动机不可能制成

能量守恒定律的发现具有重大的实践和理论指导意义。历史上，人们曾幻想制造这样一种机器，它不需要任何动力或燃料却能不断对外做功，这种机器被称为第一类永动机。



讨论与交流

如图3-2-2所示是一台“永动机”构想图，其设计思想如下：在水轮上方的水箱内装入一定量的水，水流下时冲动水轮转动，水轮通过皮带带动抽水机不断地把水从下方的水池中抽到上方水箱中，这样，水不停地循环，水轮机将永久地转动下去。

请查阅相关资料，并思考：这样的“永动机”能实现吗？为什么？历史上提出“永动机”设想的人，他们对能量守恒定律的发现有何贡献？

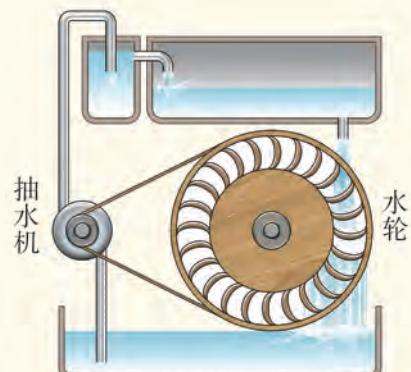


图3-2-2 “永动机”构想图

由热力学第一定律可知，如果物体不与外界进行热传递，则有

$$Q=0, \Delta U=W.$$

这表明，物体对外做功($W<0$)是必须以减少内能($\Delta U<0$)为代价的。反之，如果不消耗内能，则有

$$\Delta U=0, Q=-W.$$

这表明，物体必须从外界吸收热量 ($Q > 0$)，才能对外做功。所以，不消耗任何能量，却可以源源不断对外做功的第一类永动机是不可能制成的。能量守恒定律的确立，使人们走出了制造第一类永动机的幻想，人们更加专注于探究实现各种能量形式相互转化的具体条件，从而有效利用自然界的各种能源。

能量守恒定律的发现为物理学理论的发展提供了一个有力的支柱。在哲学上，这个定律的发现，为辩证唯物主义自然观提供了一个坚实的自然科学基础，它揭示了自然界各种不同的运动形式不是相互孤立、毫无联系的，它们在一定的条件下可以相互转化，并且在数量上保持守恒。因此，能量守恒定律有力地揭示了物质运动的不灭性和统一性。

例题：一天，小程浏览到了一则关于“节能电热水器”的广告，对于广告中提到的“用一小时热水仅耗一度电”的宣传产生了怀疑，如何验证这则广告的真实性？你能够利用所学知识进行判断吗？[水的比热容 c 约为 $4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]

分析：根据能量守恒定律，如果单位时间内电热水器提供的热量不足以提升水的温度至有热感，则可判断广告是虚假广告。

解：用一小时热水耗一度电，说明电热水器的功率为 1 kW ，即每秒提供 $W = 1 \text{ kJ}$ 的电功。而以一般热水器出水量为 0.1 L/s 、水温提升 10°C 计算，则每秒流出的水所需吸收的热量为

$$Q = cm\Delta t = 4.2 \times 0.1 \times 10 \text{ kJ} = 4.2 \text{ kJ}.$$

显然 $Q > W$ ，故该广告为虚假广告。



实践与拓展

找出家里涉及能量转化的装置，用它们的照片或示意图做成一张海报，在上面标出涉及的能量转化情况。

能量守恒定律的发现

能量守恒定律是自然界中最为普遍的规律之一。可以说，没有哪一个定律能像能量守恒定律这样，把物理、化学、生物、地质等学科，以及机械、电子、建筑等多种工程技术如此广泛地联系起来，使从事不同性质工作的科学工作者具有共同的语言。目前，科学界公认的能量守恒定律的奠基人是迈耶、焦耳和亥姆霍兹。

1842年，一名年轻的德国医生迈耶根据自己的研究提出了能量守恒的思想。他认为热是能量的一种形式，可以与机械能相互转化。可惜由于他的实验缺乏准确的数据，导致得出的结果误差很大，这使得他超前的能量守恒思想未能获得人们的认同。直到19世纪60年代，科学界才开始给他以公正的评价，使他晚年得以安慰。

完成精确测量热功当量并赢得举世公认的，是英国实验物理学家焦耳。焦耳在1840—1849年间通过磁电机、桨叶搅拌、水通过多孔塞、空气压缩和膨胀等多种实验，测得大量热功当量的数据，用实验结果确凿地证明了内能和机械能及电能间的相互转化，大量的事实和实验数据使科学界认识到能量守恒定律是自然界的一条基本规律。

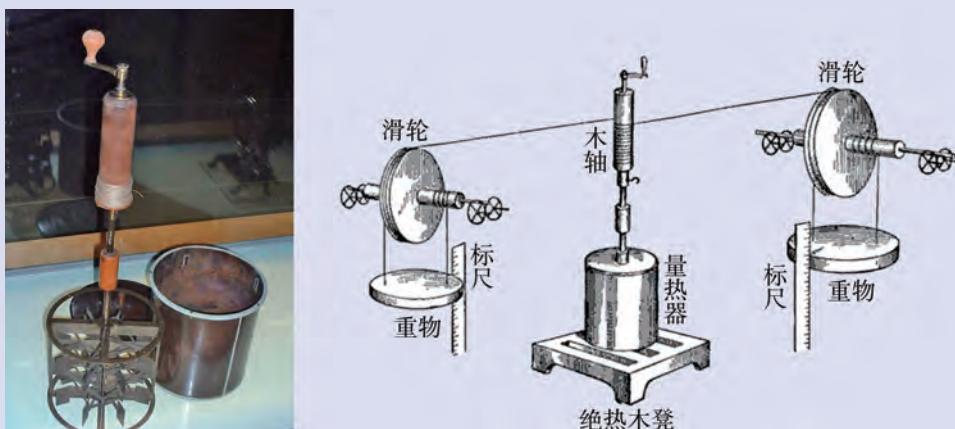


图3-2-3 焦耳测热功当量的实验装置

德国科学家亥姆霍兹是能量守恒的另一位独立发现者。他始终坚信“永动机”是不可能的，且反对“生机论”，主张一切生理现象都必须服从物理和化学的规律。1847年，他论述能量守恒的重要论文《力的守恒》在给《年鉴》（当时权威的科学杂志）投稿失败后毫不气馁，就以小册子形式单独刊印。在该文中，亥姆霍兹总结了许多人的工作，把能量的概念从机械运动推广到热、电、磁乃至生命过程，提出了普遍的能量守恒定律，为深入理解自然界的统一性提供了有力的理论武器。

在发现和建立能量守恒定律方面，除了以上三位公认的科学家外，与他们同时代的英国的格罗夫，法国的卡诺、赫恩，丹麦的柯尔丁等都曾经独立地做过研究并得出了相同的结论。可见，能量守恒定律这样一条自然界普遍规律的发现和确立，是许多学科中大量科学工作者共同完成的。其中除了物理学家的勤奋和严谨，其他学科特别是生命科学工作者的工作也起到了不可估量的作用。对此，苏联生物学家伏肯斯坦形象地比喻：物理学家赠给生物学以显微镜，而生物学家报答物理学以能量守恒定律。



练习

1. 下列关于能量转化现象的说法，正确的是（ ）.
 - A. 用太阳灶烧水是太阳能转化为电能
 - B. 电灯发光是电能转化为光能和内能
 - C. 核电站发电是电能转化为内能
 - D. 生石灰放入盛有凉水的烧杯里，水温升高是动能转化为内能
2. 试说明下列现象中能量是怎样转化的.
 - (1) 在水平公路上行驶的汽车，发动机熄火之后，汽车速度越来越慢，最后停下来.
 - (2) 火药爆炸产生燃气，子弹在燃气的推动下从枪膛发射出去，射穿一钢板后速度迅速减慢.
 - (3) 用柴油机带动发电机发电，供给电动水泵抽水，把水从低处抽到高处.
 - (4) 一个球掉到地上后又弹起来，球弹起来的高度一次比一次低，最后静止在地面上.
3. 有一种全自动手表，既不需要上发条，也不用任何电池，却能不停地走下去，这不是一种永动机？如果不是，你知道维持指针走动的能量是从哪里来的吗？你能设法验证吗？
4. 小华在游览了一落差近 100 m 的大型瀑布景区后，赞叹大自然威力的同时想到，瀑布的水从高处落下，如果水在落到水潭时具有的重力势能 80% 转化为它的内能，则水的温度能升高多少？
5. 有一物理研究小组为了估测太阳对地球的辐射功率，做了以下实验：他们取了一个圆筒，其横截面积为 3 dm^2 ，在筒内装了 0.6 kg 水，在太阳光下垂直照射 2 min 后，筒内水的温度升高了 1 ℃.
 - (1) 计算在阳光直射时，地球表面每平方厘米每分钟获得的能量.
 - (2) 如果已知射到大气顶层的太阳能只有 45% 到达地面，另外 55% 被大气吸收和反射而未到达地面，能由此估算出太阳辐射的功率吗？如果能，太阳对地球的辐射功率大约是多少？是否还需要其他数据？

第三节

热力学第二定律

日常经验告诉我们，自然界中的一些过程可以自发地进行，而另一些过程却不能自发地进行，必须借助外界的作用才能实现。例如，热量可以自发地从高温物体传递给低温物体，气体能够自发地向真空膨胀等，其相反方向的过程虽然不违反能量守恒定律，但是却不能自发地进行。可见，除了能量守恒定律之外，还存在着反映自然界中宏观过程方向性的规律。

热传导的方向性

两个温度不同的物体互相接触时，热量会自发地从高温物体传递给低温物体，最后两个物体温度相同达到热平衡。但人们从来没有发现过热量自发地从低温物体传递给高温物体，使两个物体的温差越来越大。

可见，热传导过程是有方向性的。热量从高温物体向低温物体的热传导过程是自发进行的。反过来，要使热量从低温物体传递给高温物体，则必须借助外界的作用。例如电冰箱在工作时（如图3-3-1所示），电冰箱压缩机会消耗电能，对冷却系统做功，不断地将热量从电冰箱内部的低温区传递到外部空气的高温区，来维持电冰箱内部的低温。而一旦切断电源，外界的热量就会自发地传递给电冰箱内部的低温区，使其温度升高。

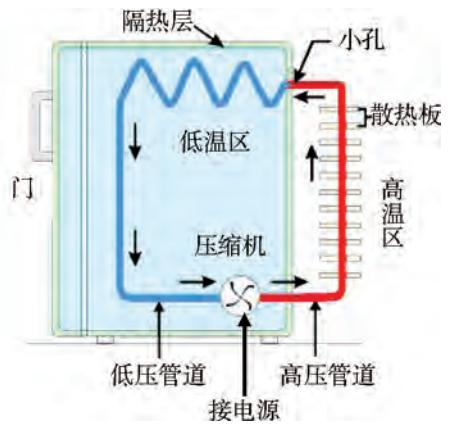


图3-3-1 电冰箱工作原理图

机械能和内能转化的方向性

一个在水平面上运动的物体，如果在水平方向上仅受摩擦力的作用，由于克服摩擦力做功，其最后总会停下来。在这个过程中，物体的机械能全部转化为内能，使该物体和水平面的温度升高。相反，人们从来没有发现过一个静止在水平面上的物体，能通过自行降低温度而运动起来，尽管这个过程并不违反能量守恒定律。

这表明，机械能和内能的转化过程也是有方向性的。机械能可以全部转化为内能，内能却无法全部用来做功以转化为机械能，而不产生其他影响。

例如，汽车、轮船、飞机等交通工具使用的发动机都是热机。热机的工作原理可以看作是燃烧燃料将化学能转化为工作物质的内能，工作物质通过体积膨胀对外做功把内能转化为机械能。热机要连续工作，需要不断循环。因此工作物质体积膨胀后，还需要被压缩恢复到原有体积，才能形成循环，这就需要外界做一定的功。所以，在一个循环过程中，热机的效率不可能达到100%。也就是说，要想将内能全部用来做功以转化为机械能而不产生其他影响是不可能的。

历史上曾经有人设想制造一种热机，让它从单一热源吸收热量并全部用来做功，把它得到的内能全部转化为机械能，热机效率达到100%。这种想象中的热机被称为第二类永动机。这类永动机并不违反能量守恒定律，但是，由于内能全部转化为机械能而不产生其他影响是不可能的，因此第二类永动机是不可能制造出来的。

讨论与交流

有人设想如图3-3-2所示的装置（假设活塞与缸壁无摩擦），并提出“理想气体可从单一热源吸热并进行等温膨胀，从而实现百分之百对外做功”。这引发了同学们的争论：有同学认为是可能实现的，有的同学则认为不可能。你赞同哪一种观点？为什么？

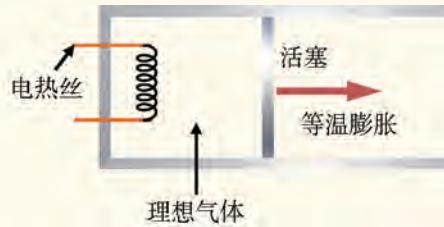


图3-3-2 等温膨胀构想图

从表面上看，因为理想气体在等温膨胀过程中，其温度不变，内能不变，如果不存在摩擦力，则吸收的热量可以全部对外做功，但需要指出的是，根据气体实验定律，如果气体进行等温膨胀，即气体温度不变，体积增大，则气体压强应减小。而从图3-3-2中可知，该气体压强是恒定的。显然该气体是不可能进行等温膨胀的。事实上，该过程是一个等压膨胀的过程，气体压强不变，体积增大，温度升高，内能增大，气体吸收的热量不可能百分之百对外做功。

扩散的方向性

两种不同的气体可以自发地混合，最后成为一种均匀的混合气体。相反，一种均匀的混合气体却不会自发地分开成为两种气体。当然，使用物理或化学方法可以把混合气体分开，但这必然会产生其他影响。

如图 3-3-3 所示是两个可以连通的容器，容器 A 中装有气体，容器 B 是真空。打开阀门 K，容器 A 中的气体会自发地向容器 B 中扩散，最后两个容器都充满压强相等的气体，这个过程被称为气体的自由膨胀。但气体不会自发地从容器 B 流回容器 A，最后使容器 B 恢复成真空。当然，用抽气机把容器 B 中的气体抽到容器 A 中，可以使容器 B 恢复成真空。但是，这要借助于抽气机的帮助，也就是产生了其他影响。

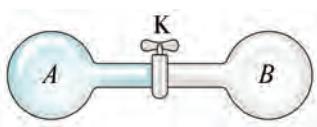


图 3-3-3 扩散是有方向的

热力学第二定律

自然界中一切与热现象有关的宏观过程都具有方向性。物理学家分析了大量的自然现象，从不同的角度考察了不同的宏观过程的方向性，确立了热力学第二定律（second law of thermodynamics），给出了热力学第二定律的多种表述。下面介绍常见的两种表述形式。

最早提出并沿用至今的热力学第二定律的表述是 1850 年由德国物理学家克劳修斯（R. Clausius, 1822—1888）提出的：热量不能自发地从低温物体传递到高温物体。或者说，不可能使热量由低温物体传递到高温物体，而不引起其他变化。这就是热力学第二定律的克劳修斯表述。显然，克劳修斯是按照热传导的方向性来表述热力学第二定律的。

1851 年，英国物理学家开尔文（Kelvin, 本名威廉·汤姆孙，W. Thomson, 1824—1907）提出了热力学第二定律的另一表述，即开尔文表述：不可能从单一热源吸收热量并把它全部用来做功，而不产生其他影响。这是按照机械能与内能转化过程的方向性来表述的。这两种表述是等价的，可以从一种表述导出另一种表述，所以它们都被称为热力学第二定律。

热力学第二定律揭示了自然界宏观过程的方向性，使得它成为独立于热力学第一定律的一个重要的自然规律。热力学第二定律在物理、化学、生物等学科中有重要的应用，它对于我们认识自然、利用自然有着重要的指导意义。



实践与拓展

目前，市场上有一种叫“空气能热水器”的产品受到了大家的热捧，空气能热水器通过获取大量空气中的热量来提高水温，其消耗的电能仅仅是压缩机用来搬运空气能源所用的能量，据说其“热效率可达 300% 以上”。请你针对这一产品做一项调查，了解其工作原理，并设计实验方案验证其“热效率可达 300% 以上”的说法是否属实。

热力学第二定律的微观解释

为什么与热现象有关的宏观过程都具有方向性呢？下面我们用分子动理论定性地分析热力学第二定律的微观实质，以消除大家对热力学第二定律的困惑。

先分析机械能和内能的转化过程。显然，做功是通过物体做宏观位移来完成的，因此做功总与分子群体的有序运动联系在一起，内能是物体内部所有分子热运动的动能和分子势能的总和，因此内能是和分子的无序运动联系在一起的。机械能转化为内能的过程，从微观上来说，是大量分子的有序运动朝无序运动转换的过程；其相反方向的过程是大量分子从无序运动朝有序运动转换的过程。

再看热传导过程。两个有温差的物体互相接触，通过接触面上两侧分子的互相碰撞，使得温度高的物体分子平均动能逐渐减少，温度低的物体分子平均动能逐渐增大，直至两者温度相同达到热平衡。开始时，高温物体分子的平均动能较大，低温物体分子的平均动能较小，体现出一种按动能大小有序分布的状态。最后两个物体达到热平衡，物体内部分子热运动的剧烈程度趋向一致，原先那种分子按动能大小有序分布的状态消失了，所有分子处于相同的无序运动状态。所以，热传导过程也是物体内部分子的热运动由有序状态向无序状态转化的过程。

综上可见，机械能和内能的转化与热传导这两个不同的过程是存在内在联系的。它们的共同点是自发进行的宏观过程的方向总是从有序性高的状态向无序性高的状态进行的。热力学第二定律的微观实质是与热现象有关的宏观过程，总是自发地朝着分子热运动状态无序性增加的方向进行。

为了描述物体的无序程度，物理学中引入了一个物理量——熵，即物体内部分子热运动无序程度越高，物体的熵就越大。如图3-3-3所示的气体自由膨胀过程就是一个气体熵增加的过程。气体自由膨胀的过程就是一个大量分子热运动无序性增加的过程，在此过程中气体的熵是增加的。事实上，一切与其他物体既没有物质交换也没有能量交换的系统（简称孤立系统），其熵永远是增加的，即熵增加原理。孤立系统的一切自发过程均向着其熵增加（即无序性增加）的方向发展，如果要使系统的熵减小（即有序性增加），外界就必须对该系统产生影响。熵增加原理是热力学第二定律更加概括的表述，它从本质上说明了宏观热现象能量传递和转化的方向性。

随着科技的发展和社会的进步，人们对熵的认识已经远远超出分子运动领域，熵的概念被广泛用于任何做无序运动的粒子系统，也用于研究大量出现的无序事件。熵的概念越来越重要，甚至不亚于“能量”。熵已经成为判断不同种类不可逆过程进行方向的共同标准。熵增加原理突出了世界的演化性、方向性和不可逆性，深化了人类对自然和社会的认识，使“演化”和“发展”越来越成为新自然观的主题。



练习

1. 试根据热力学第二定律分析下列两种说法是否正确，并说明理由。
 - (1) 机械能可以全部转化为内能，但内能不能全部转化为机械能。
 - (2) 热量能够从高温物体传递到低温物体，但不能从低温物体传递到高温物体。
2. 理想气体等温膨胀时，从单一热源吸取的热量全部转化为对外所做的功，这一过程是否违反热力学第二定律？为什么？
3. 在一个密闭隔热的房间里，有一电冰箱正在工作，如果打开电冰箱的门，过一段时间后房间的温度会如何变化？为什么？
4. 热力学第一定律确立了能量转化过程中能量是守恒的。当我们使用煤、石油、天然气的时候，能量的总量并没有变化。所以，从能量守恒定律的角度来看，能源危机是不可能发生的。可为什么我们还经常说要节约能源呢？
5. 如图 3-3-4 (a) 所示是根据热力学第二定律的克劳修斯表述画出的示意图：外界对制冷机做功，使热量从低温物体传递到高温物体。请你根据热力学第二定律的开尔文表述完成示意图 3-3-4 (b)。

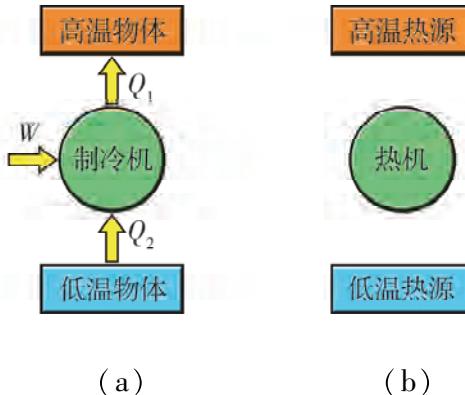


图 3-3-4

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



回顾与评价

- 历史上，人们曾设想过制造第一类永动机，为什么最终还是建立起了能量守恒的观念？
- 你认为热力学第二定律可以分析和解释生产生活中的哪些现象？
- 根据本章内容，举例说明科学探索过程中的挫折和失败对科技进步的推动作用。

习题三

1. 下列关于内能和热量的说法，正确的是（ ）.
 - A. 马铃薯所含的热量高
 - B. 内能越大的物体热量也越多
 - C. 热量总是从内能大的物体传递到内能小的物体
 - D. 热量总是从温度高的物体传递到温度低的物体
2. 下面例子中，通过做功改变物体的内能的是（ ）.
 - A. 太阳把地面晒热
 - B. 刹车时轮胎变热
 - C. 气缸内的气体被压缩，气体温度升高
 - D. 用砂轮磨刀具时，刀具温度升高
3. 金属制成的气缸中装有柴油与空气的混合物，下列操作有可能使气缸中的柴油达到燃点的是（ ）.
 - A. 迅速向里推活塞
 - B. 迅速向外拉活塞
 - C. 缓慢向里推活塞
 - D. 缓慢向外拉活塞
4. 下列说法正确的是（ ）.
 - A. 气体的内能是分子热运动的动能之和，只能通过热传递来改变
 - B. 功可以全部转化为热，但热量不能全部转化为功
 - C. 气体的温度不变时，不会发生热传递
 - D. 热量能够自发地从高温物体传递到低温物体，也能自发地从低温物体传递到高温物体
5. 下面设想符合能量守恒定律的是（ ）.
 - A. 利用永久磁铁间的作用力可以制造一台永远转动的机器
 - B. 做一条利用风能逆水航行的船
 - C. 通过太阳照射使飞机起飞
 - D. 不用任何燃料，河水就一定不能升温
6. 对于一定质量的物体（或系统），下列说法正确的是（ ）.
 - A. 吸热物体的温度一定会升高
 - B. 只要气体的体积、温度变化，则气体的内能一定改变
 - C. 外界对系统做功，系统内能可能不变

- D. 物体温度不变，则其内能一定也不变
7. 下列说法正确的是（ ）.
- 第二类永动机和第一类永动机一样，都违背了能量守恒定律
 - 第二类永动机违背了能量转化的方向性
 - 自然界中的能量是守恒的，所以不用节约能源
 - 自然界中的能量尽管是守恒的，但有的能量便于利用，有的不便于利用，所以要节约能源
8. 关于热力学定律，下列说法正确的是（ ）.
- 在一定条件下，物体的温度可以降到0 K
 - 物体从单一热源吸收的热量可全部用于做功
 - 吸收了热量的物体，其内能一定增加
 - 压缩气体总能使气体的温度升高
9. 某校中学生为参加电视台《异想天开》节目，提出了下列四个设想方案，从理论上讲可行的是（ ）.
- 制作一个装置从海水中吸收内能全部用来做功
 - 制作一种制冷设备，使温度降至绝对零度以下
 - 汽车尾气中各类有害气体排入大气后严重污染了空气，想办法使它们自发分离，既清洁了空气，又变废为宝
 - 将屋顶盖上太阳能板，可直接用太阳能来解决照明和热水问题
10. 如图3-1所示，水平固定不动、导热性能良好的气缸内用活塞封闭着一定质量的空气，外界温度恒定。一条细线的左端连接在活塞上，另一端跨过定滑轮后连接在一个小桶上，开始时活塞静止。现在不断向小桶中添加细沙，使活塞缓慢向右移动（活塞始终未被拉出气缸）。忽略气体分子间的相互作用，则在活塞移动过程中，下列说法正确的是（ ）.
- 气缸内气体分子的平均动能变小
 - 气缸内气体的压强变小
 - 气缸内气体向外放出热量
 - 气缸内气体从外界吸收热量
11. 在装有食品的包装袋中充入氮气，然后密封进行加压测试。测试时，对包装袋缓慢地施加压力。现将袋内的氮气视为理想气体，则加压测试过程中，包装袋内壁单位面积上所受气体分子撞击的作用力_____（选填“增大”“减小”或“不变”），包装袋内氮气的内能_____（选填“增大”“减小”或“不变”）。
12. 一定质量的理想气体在某一过程中，外界对气体做功 1.7×10^5 J，气体内能减少 1.3×10^5 J，则此过程中气体_____（选填“吸收”或“放出”）的热量是_____ J。此后，保持气体压强不变，升高温度，气体对外界做功 5.0×10^5 J，同时吸收了 6.0×10^5 J

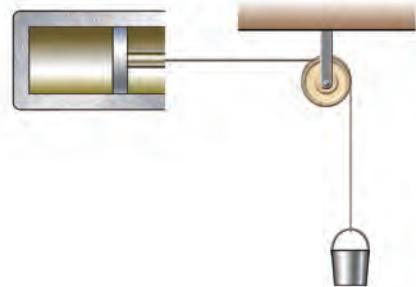


图3-1

的热量，则这个过程中，气体内能增加了_____ J.

13. 如图 3-2 所示，容器 A、B 中各有一个可以自由移动的轻活塞，活塞下面是水，上面是大气，大气压恒定。A、B 的底部由带有阀门 K 的管道相连，整个装置与外界绝热。开始时，A 水面高于 B 水面，打开阀门，使 A 中的水逐渐向 B 流，最后达到平衡，在这个过程中大气压对水_____（选填“做功”或“不做功”）。水的内能_____（选填“增大”“减小”或“不变”）。

14. 一定质量的理想气体经过一系列过程，如图 3-3 所示。请描述 $a \rightarrow b$ 、 $b \rightarrow c$ 、 $c \rightarrow a$ 过程中理想气体做功、热传递与内能变化的情况。

15. 太阳能的光热转化是目前技术最为成熟、应用最广泛的太阳能利用形式。从有关资料获悉，在晴天时，垂直于阳光的地球表面接收到的光辐射为 $1.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。如图 3-4 所示，有一台太阳能热水器，可将接收到的光辐射的 50% 用来升高水温，如果该热水器接受阳光垂直照射的有效面积始终是 2 m^2 ，晴天晒 1 h，其水箱中 50 kg 水的温度能升高多少摄氏度？[水的比热容 $c = 4200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]

16. 某地强风风速为 14 m/s ，设空气密度为 $\rho = 1.3 \text{ kg/m}^3$ ，若某风力发电机的风扇叶片长 10 m ，当风通过风扇横截面时，其动能的 20% 将转化为电能，则该风力发电机的功率是多大？

17. 如图 3-5 所示，一定质量的理想气体被不导热的活塞封闭在内壁光滑的绝热气缸内，气缸竖直放置，缸内安装一电热丝，活塞质量为 m ，横截面积为 S ，外界大气压强为 p_0 ，重力加速度为 g 。开始时活塞处于静止状态，将电热丝通电给气体缓慢加热，测得电热丝两端电压为 U ，通过的电流为 I 。经过时间 t ，活塞缓慢向上移动距离 L_0 。求：

- (1) 气体对外所做的功。
- (2) 气体内能的增量。

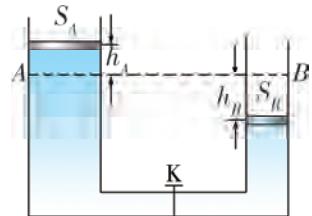


图 3-2

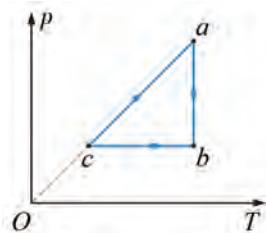


图 3-3



图 3-4

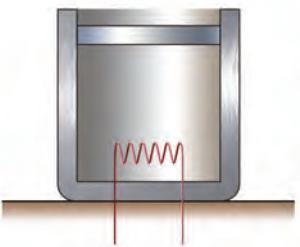


图 3-5

第四章

波粒二象性

大量事实证明，光是一种电磁波。但光撞击物体时会像实物粒子那样产生作用力，光是否具有粒子的特性呢？电子在高速运动时，用电子束代替光波来实现成像，可用于观察细微的物质结构，实物粒子是否具有波的特性？

在本章的学习中，我们将对光电效应、电子衍射等现象进行分析，介绍光子说、量子论、物质波等理论。通过对微观粒子的波粒二象性本质的讨论，了解人类直接经验的局限性，体会人类对微观世界螺旋上升的认识过程。



第一节

光电效应

光是一种电磁波，这一观念在 19 世纪中叶得到了广泛的承认。然而，在 19 世纪末，人们发现光电效应中光的某些特征却不能用光的电磁理论来解释。

光电效应

19 世纪 80 年代，人们发现某些金属材料在光的照射下会带电。例如，把锌片放在紫外线照射，用验电器检验锌片，可以发现锌片带正电。后来人们明白，这是由于锌片在紫外线的照射下发射电子的缘故。这种金属在光的照射下发射电子的现象被称为 **光电效应** (photoelectric effect)，发射出来的电子被称为 **光电子** (photoelectron)。这看似简单的现象，却引发了物理学思想上的一次飞跃，也就成了光电技术在各领域的广泛应用。

光电管是利用光电效应制成的一种常见的光电器件，它可以把光信号转变成电信号。光电管主要由密封在真空玻璃壳内的阴极和阳极组成，如图 4-1-1 (a) 所示。阴极表面通常涂有碱金属，如锂、铯等。碱金属对电子的束缚能力比较弱，所以比较容易在光的照射下发射电子。如图 4-1-1 (b) 所示，阴极发射的光电子受到正向电压 U 加速，被阳极收集，在回路中形成电流，称为 **光电流** (photocurrent)。这样，光电管就把光信号变成电信号。

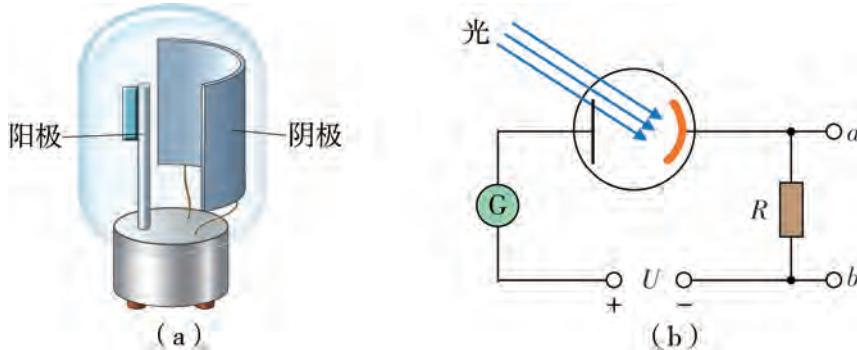


图 4-1-1 光电管的结构及其工作原理

光电效应的实验规律

光电流的产生是光照射的结果。那么，光电流的大小是否跟入射光的强度、频率及其光照时长等因素有关呢？下面我们将通过实验对这个问题进行探究。

观察与思考

如图 4-1-2 所示为光电效应演示器。利用该演示器可以探究入射光强度、频率和光照时长对光电流的影响。如图 4-1-3 所示，在光电管上加正向电压，入射光强度可以通过改变光罩上出射孔的数目或大小来改变，入射光的频率可以用不同的滤色片来改变，电源加在阳极 A 与阴极 K 之间的电压大小可以调整。注意观察不同入射光强度、频率和光照时长对应的光电流大小。



图 4-1-2 光电效应演示器

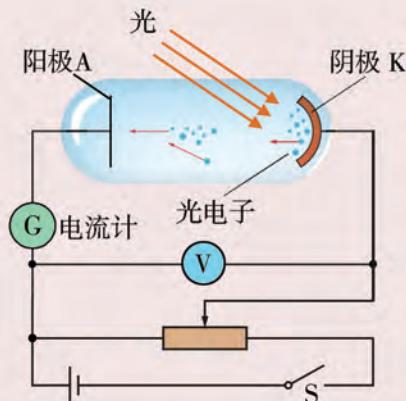


图 4-1-3 光电效应实验原理示意图

实验发现，在光照条件不变的情况下，光电流的大小随着正向电压的增大而增大，当正向电压增加到一定值时，光电流大小不再变化，达到饱和。饱和电流的大小与入射光的强度成正比。

实验中也出现了一个“奇怪”的现象，当入射光的频率比较低时，无论入射光强度多么大，照射时间多么长，光电管都没有光电流产生。而当入射光的频率大于某一频率时，无论入射光强弱，都能够几乎瞬时产生光电流。事实上，对于每一种金属，只有当入射光频率大于某一频率 v_0 时，才会产生光电流。我们将这个频率称为截止频率 (cutoff frequency)，其对应的波长称为截止波长。表 4-1-1 给出了部分金属的截止频率和截止波长。

表 4-1-1 一些金属的截止频率和截止波长

材料	铯 Cs	钠 Na	锌 Zn	银 Ag	铂 Pt
截止频率/ ($\times 10^{14}$ Hz)	4.55	5.56	8.07	11.53	15.29
截止波长/nm	660	540	372	260	190

讨论与交流

为什么说金属材料存在截止频率是一个“奇怪”的现象？

光电管阴极射出的光电子具有一定的动能。为了测量光电子的动能，可以在光电管的两个电极上加上反向电压，如图 4-1-4 所示，调节反向电压的大小可阻止光电子到达阳极。在强度和频率一定的光照射下，回路中的光电流将会随着反向电压的增加而减小，并且当反向电压达到某一数值时，光电流将会减小到零。我们把这时的电压称为遏止电压（cutoff voltage），用符号 U_c 表示。

光电子到达阳极要克服反向电场力所做的功

$$W = eU_c.$$

式中 e 为电子的电荷。

如果光电子到达阳极的速度刚好为零，根据能量守恒定律，则光电子出射时的最大初动能

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = eU_c.$$

式中 m 为电子的质量， v_{\max} 为光电子的最大初速率。

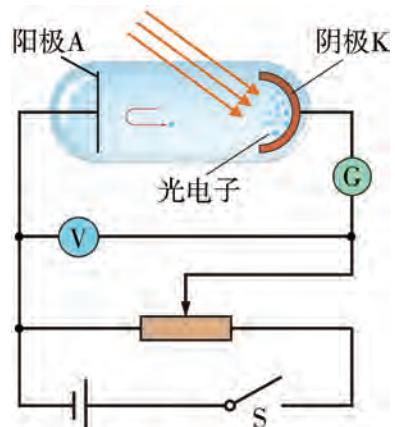


图 4-1-4 测量遏止电压实验示意图

讨论与交流

光电子的最大初动能可以通过测量金属的遏止电压来确定。那么，金属的遏止电压与入射光的强度和频率又有什么关系呢？

实验表明，对于一定频率的光，无论光的强度如何，同种金属的遏止电压都是一样的，当光的频率改变时，遏止电压也会改变。由此可见，遏止电压只与入射光的频率有关，而与入射光的强度无关。而遏止电压对应光电子的最大初动能，也就是说，其最大初动能只与入射光的频率有关。

经典电磁理论解释的困难

人们通过大量的实验发现，对于那些频率高的光，随着入射光强度的增加，光电流也会增大。经典电磁理论可以对此进行解释，在光的照射下，金属内部的电子受到电磁波的作用做受迫振动。光的强度越强，电磁波的振幅越大，对电子的作用越强，电子振动得越厉害，因而，电子就越容易从物体内部逃逸出来。也就是说，单位时间到达阳极的光电子数目也就随之增多，光电流就会增大。

根据上述理论，只要入射光的强度足够强，任何频率的入射光都应该能够产生光电子，光电子的初动能也应该由入射光的强度决定。但是实验结果却表明，每种金属都对应

有一个不同的截止频率，而且遏止电压只与入射光的频率有关，与入射光的强度无关。由此可见，经典电磁理论在解释光电效应实验时遇到了根本性的困难。



实践与拓展

请查阅相关资料，了解遥控器、光电门、光控开关等设备的光电控制原理，以及数码相机、手机等设备的光电成像原理。

光电效应的应用

利用光电效应可以制成各种光电转换器件，光电管就是应用光电效应的原理制成的光电元件。由光电管制成的光控继电器常用于自动控制，例如在放映电影时利用光电转换来实现声音的重放等。随着科学技术的发展，人们发现某种类型的半导体材料能把光能直接转变为电能，当太阳光照射在这样的材料上时，就会产生电流，入射的太阳光越强，产生的电流也越大，可以用来制成太阳能电池。目前，太阳能电池可以将15%~30%的入射光转化为电能，为计算器、手表、路灯、轨道卫星和无人探测器等提供能量。

人们利用光电效应原理制成了大量光电控制设备，最常见的是电动门。当光学传感器探测到人到来之后，门自动打开。这种传感器由两个电极夹着一块半导体制成，可以对光作出响应。当光强变化时，例如光束被截断或总体亮度减小，传感器产生的电流大小就发生改变，与相应的电路耦合就可以将门打开。其他应用包括黄昏时路灯自动打开，调控复印机中碳粉的浓度，控制相机的曝光时间等。事实上，光电效应涉足任何控制或响应光的电子器件中，光电效应器件甚至应用在呼吸检测仪中，在检测气体与酒精作用后，光学传感器就会显示出颜色的改变。

光电倍增管是把光信号变为电信号的常用器件。当光照射到阴极，使它发射光电子，光电子在电压作用下加速轰击第一阴极，使之又发射更多的次级光电子，这些次级光电子再被加速轰击第二阴极，如此继续下去，利用十多个倍增阴极，就可以使光电子数增加 $10^5\sim 10^8$ 倍，产生很大的电流。这样一束微弱的入射光，即被转变成放大了的光电流，可以通过电流计显示出来。微光夜视仪就是利用光电倍增管，把夜间目标反射的低亮度的光增强放大到几十万倍，从而使其适于肉眼夜间观察。



图4-1-5 微光夜视仪

 练习

1. 在光电效应实验中，如果实验仪器及线路完好，当光照射到光电管上时，灵敏电流计中没有电流通过，可能是什么原因？

2. 查阅表 4-1-1 中五种金属的截止频率和截止波长，当用波长为 375 nm 的光照射它们时，哪些可以发生光电效应？

3. 光电效应实验的装置如图 4-1-6 所示，现用发出紫外线的弧光灯照射锌板，验电器指针张开一个角度。

(1) 锌板带的是_____电荷，请解释锌板带电的原因。

(2) 将带负电的金属小球与锌板接触，验电器指针偏角会发生什么变化？

(3) 使验电器指针回到零，改用强度更大的弧光灯或强度更大的红外线灯照射锌板，观察到的实验现象是怎样的？

4. 如图 4-1-7 所示是光电效应实验的原理图。当频率为 ν_0 的可见光照射到阴极 K 上时，灵敏电流计中有电流通过，则：

(1) 若将滑动触头 P 逐渐由 A 端移向 B 端时，观察到的现象是怎样的？请分析其原因。

(2) 调换电源两极，将滑动触头 P 逐渐由 A 端移向 B 端，观察到的现象是怎样的？请分析其原因。

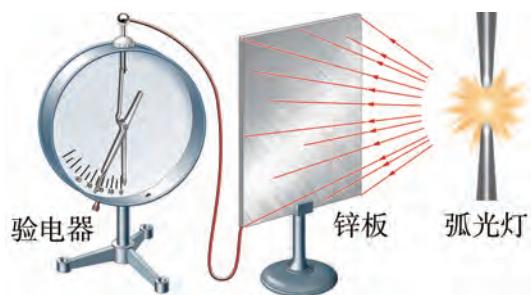


图 4-1-6

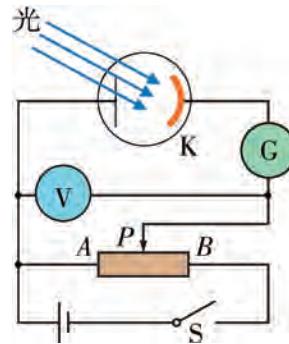


图 4-1-7

第二节

光电效应方程 及其意义

人们曾尝试用经典电磁理论去解释光电效应的实验结果，却遇到了很多困难，因此要另辟蹊径。众多的疑问呼唤着新的思想、新的观念和新的理论。

能量子假说

1900年，德国物理学家普朗克（M. Planck, 1858—1947）在对黑体（一种能全部吸收外来辐射而无任何反射的物体）辐射问题进行研究中，首次提出了一个与人类直接经验相违背的大胆假说，即能量子假说：物体热辐射所发出的电磁波的能量是不连续的，只能是 $h\nu$ 的整数倍， $h\nu$ 被称为一个能量子，其中 ν 是辐射频率， h 是一个常量，被称为普朗克常量（Planck constant）。实验测得

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

普朗克利用该能量子假说推导出的理论结果与实验相符，而这些实验结果恰恰是经典电磁理论无法解释的。普朗克因此获得了1918年的诺贝尔物理学奖。

在宏观世界里，一个物理量的取值通常是连续的。比如，物体的质量、动能、动量的大小等都可以取任意的有限值。也有一些量的取值是不连续的，如人数、台阶数等。在微观世界里，物理量的取值常常是不连续的，只能取一些分立的值，这种物理量分立取值的现象称为量子化（quantization）现象。

光子假说

1905年，在普朗克能量子假说的启发下，年仅26岁的爱因斯坦指出，当光和物质相互作用时，光的能量不是连续的，而是一份一份的光量子。这些光量子后来被称为光子（photon）。一个光子的能量为

$$\varepsilon = h\nu \tag{4.2.1}$$

式中 h 是普朗克常量， ν 是光的频率。这就是爱因斯坦的光子假说。光子假说认为，每个光子的能量只取决于光的频率，例如紫光的频率比红光高，所以紫光光子的能量比红光光子的能量大。同样频率的光，光的强弱反映了单位时间内射到单位面积的光子数的多少。

普朗克首先提出了黑体辐射的能量子假说，爱因斯坦则把普朗克的思想推广到辐射场

的能量量子化，其光子概念是量子思想的一次质的飞跃。



讨论与交流

经典电磁理论在解释光电效应实验时遇到了根本性的困难。那么，利用光子假说，应该怎样解释光电效应实验呢？

光电效应方程

按照光子假说，在光电效应中，金属中的电子吸收一个光子获得能量 $h\nu$ ，这些能量一部分用来克服金属的束缚，这种使电子脱离某种金属所做的功的最小值，我们称为金属的逸出功（work function），用符号 W_0 表示。电子逸出后，还具有一定的动能。根据能量守恒定律，入射光子的能量等于出射光电子的最大初动能 E_k 与逸出功 W_0 之和，即

$$h\nu = E_k + W_0 \quad (4.2.2)$$

式中 $E_k = \frac{1}{2}mv_{\max}^2$ 。这就是爱因斯坦建立的光电效应方程。爱因斯坦因此获得了 1921 年的诺贝尔物理学奖。后来，美国实验物理学家密立根（R. Millikan, 1868—1953）用实验证实了这个方程，并且测出了普朗克常量。密立根在测量基本电荷和光电效应的实验方面做出了杰出的贡献，因此获得了 1923 年的诺贝尔物理学奖。

按照光子假说，光与金属相互作用时，如果光子的能量大于金属的逸出功，入射光的强度越大，所含的光子数越多，照射金属时产生的光电子越多，因此饱和电流越大。所以，饱和电流的大小与入射光的强度成正比。

根据光电效应方程，光与金属相互作用时，如果光子的能量小于金属的逸出功，那么无论入射光的强度有多大，照射的时间有多长，金属内部的电子都不能被激发而逃逸出来。因此，光电效应发生的条件是光子的能量 $\varepsilon = h\nu$ 必须大于或等于逸出功 W_0 。即

$$\nu \geq \frac{W_0}{h}$$

这就是光电效应存在截止频率的原因。

那么，遏止电压为什么与入射光的频率有关而与入射光的强度无关呢？由上节的讨论可知，遏止电压对应着光电子的最大初动能。根据光电效应方程，对于某种金属，在逸出功 W_0 一定的情况下，出射光电子的最大初动能只与入射光频率有关，与入射光的强度无关，从而也就解释了遏止电压只与频率有关的原因。

例题：某科技小组买到几个光电管，想测量这种光电管材料的截止频率。他们在实验室找到了几块标有波长数值的滤光片（如图 4-2-1 所示），请据此设计可行的测量方案。

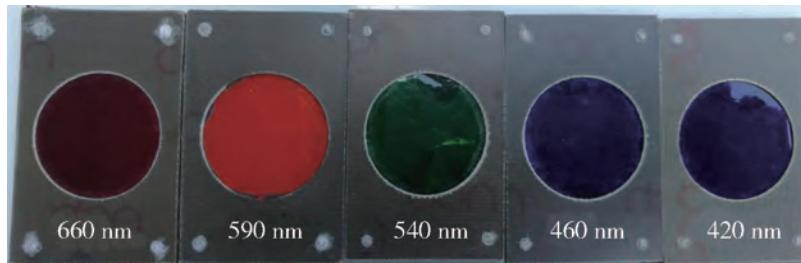


图 4-2-1 滤光片

分析：由截止频率的物理意义可知，频率为材料截止频率的光子能量等于该材料的逸出功。即

$$h\nu_0 = W_0.$$

根据光电效应方程，逸出功、光电子最大初动能和遏止电压的关系如图 4-2-2 所示。

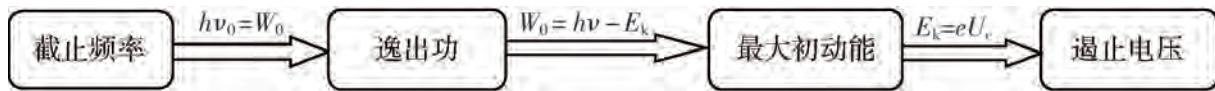


图 4-2-2

可见，要测量光电管的截止频率，只需要测量出该光电管在某一频率光照射下的遏止电压。

解：光电管材料截止频率的测量方案如下：

- (1) 选取某一标称波长（如 460 nm）的滤光片，使射入光电管的光为该波长的单色光。
- (2) 按图 4-2-3 所示连接好电路，选择反向电压，调节滑动变阻器，使电路中的电流刚好为零，此时电压表示数为遏止电压。
- (3) 根据动能定理 $E_k = eU_c$ ，得到光电子最大初动能。
- (4) 根据光电效应方程 $W_0 = h\nu - E_k$ ，其中 $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ，得到光电管材料逸出功。
- (5) 根据 $h\nu_0 = W_0$ ，可得材料截止频率 ν_0 。
- (6) 更换滤光片，重复上述实验步骤，最后将测量结果取平均值。

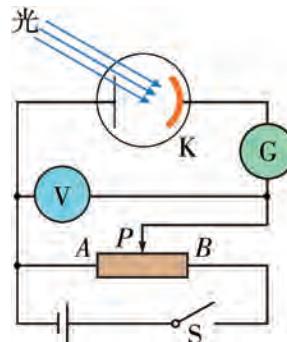


图 4-2-3

实践与拓展

1. 查阅相关资料，了解微观世界的量子现象。
2. 以小组活动的方式，设计一个验证光电效应方程，并能测出普朗克常量的实验，比较各组设计的异同。

康普顿效应

我们知道，一个光子的能量 $\varepsilon = h\nu$ ，爱因斯坦指出光子动量 $p = \frac{\varepsilon}{c}$ 。由此，可得光子的动量

$$p = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c}.$$

考虑到光波的波长 $\lambda = \frac{c}{\nu}$ 。所以，光子动量为

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

1918—1922 年，美国物理学家康普顿（A. H. Compton，1892—1962）在研究石墨对 X 射线的散射时，发现一部分散射出来的 X 射线波长变长，这个现象后来称为康普顿效应（Compton Effect）。按照经典电磁理论，光波波长在散射前后应该不变。正如在光电效应中一样，经典电磁理论再次与实验事实出现了矛盾。

1923 年，康普顿借助爱因斯坦的光子假说，用光子与物质中的自由电子的弹性碰撞解释了散射光波长变长的现象。他证实了 X 射线的光子不仅具有能量，也像其他粒子那样具有动量，光子与电子碰撞时遵守能量守恒定律和动量守恒定律。他据此推导出散射光波长的变化量，该结果与实验符合得很好。

在康普顿效应中，当入射的光子与物质中的电子碰撞时，一部分动量会转移给电子，因而光子动量变小。由光子动量公式可知，动量减小则波长变长，因此有些光子散射后波长会变长。

康普顿效应再次证明了爱因斯坦光子假说的正确性。它不仅证明了光子具有能量，同时还证明了光子具有动量。康普顿因此获得了 1927 年的诺贝尔物理学奖。

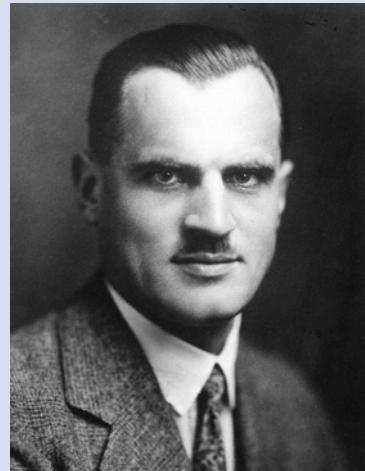


图 4-2-4 康普顿

练习

- 请说明当原子吸收了一个光子时，能量是如何守恒的。
- 照相底片上的感光物质在光照射下能分解，经冲洗后就可记录下图像，这种现象被称为光化效应，与光电效应类似，只有入射光光子能量达到某一数值才能发生。请据此

分析，摄影爱好者为什么通常在他们的暗室中安装红光灯，而不选用蓝光灯或紫光灯？

3. 太阳能光伏发电系统是利用太阳能电池半导体材料的光电效应，将太阳光辐射能直接转换为电能的一种新型发电系统，可以用于无电网覆盖的边远地区和人口分散地区，具有更好的发电效率和环保性能。如图 4-2-5 所示是测定光电流的电路简图，光电管加正向电压。

- (1) 标出电源和电流表的正负极。
- (2) 入射光应照射在_____（选填“A”或“B”）极上。
- (3) 若电流表的示数是 $10 \mu\text{A}$ ，则每秒从光电管阴极发射出的光电子数至少为_____个。

4. 不同金属的截止频率 (ν_0) 和逸出功 (W_0) 都不同，表 4-2-1 是 5 种金属的截止频率和逸出功。请根据表中的信息回答下列问题。

表 4-2-1

金属	钨	钙	钠	钾	铷
$\nu_0 / (\times 10^{14} \text{ Hz})$	10.95	7.73	5.56	5.44	5.15
W_0 / eV	4.54	3.2	2.29	2.25	2.13

(1) 用黄光（频率为 $5.10 \times 10^{14} \sim 5.25 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ）分别照在表 4-2-1 中的 5 种金属上，有电子逸出的是哪些？并求出该金属逸出电子的最大初动能。

(2) 如果把黄光改为红光（频率为 $4.05 \times 10^{14} \sim 4.80 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ），有电子逸出的是哪些？如果把黄光改为紫光（频率为 $6.80 \times 10^{14} \sim 7.90 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ），有电子逸出的又是哪些？

5. 请查阅相关资料，分析各种金属逸出功的变化规律与化学中金属得失电子能力变化规律有无关联。

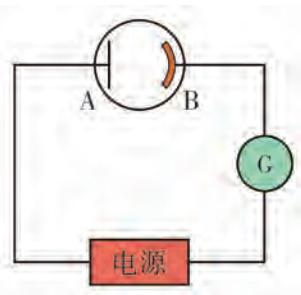


图 4-2-5

第三节

光的波粒二象性

阳光是地球必不可少的生命源泉，光是与人类生活最密切相关的物质，但光的本质是什么？自古以来人们一直在思辨和探寻着这个问题。

光的本性之争

在古代，由于科技发展水平所限，人类对光的认识只限于某些简单的现象和规律描述。我国战国时期的《墨经》记载了投影、小孔成像等光学现象，古希腊学者欧几里得的《反射光学》论述了光在传输过程中的原理和光的反射定律。

随着科学的发展，人们逐渐开始以科学的方法来研究光，并发现了反射、折射等一些基本的光学规律。到了17世纪，科学家们开始对光的本性进行研究，出现了截然不同的两种观点。英国物理学家牛顿认为光是一种微粒，而荷兰物理学家惠更斯（C. Huygens, 1629—1695）却认为光是一种波。惠更斯认为，如果光是一种微粒，那么光在交叉时就会因发生碰撞而改变方向，可人们并没有观察到这种现象，所以微粒说是错误的。牛顿则坚持光的微粒说。他认为，既然光是沿直线传播的，那就应该是微粒，因为波会弥散在空间中，不会聚成一条直线，最直观的实验证明就是物体能挡住光而形成阴影。由于牛顿在物理学界的崇高地位，在相当长的时间里，光的微粒说一直占据上风。

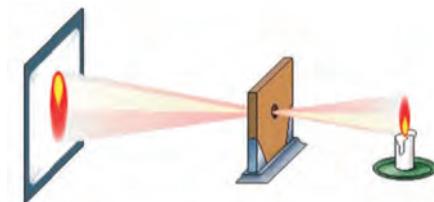


图4-3-1 小孔成像

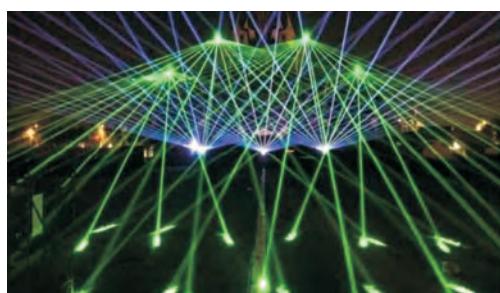


图4-3-2 光的直线传播现象

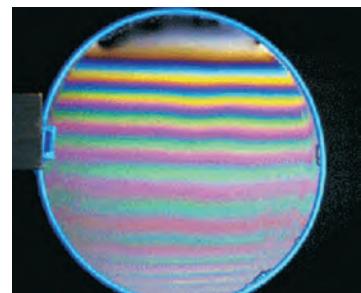


图4-3-3 光的薄膜干涉现象

1807年，英国科学家托马斯·杨（T. Young, 1773—1829）做了著名的光的双缝干涉实验，得到了明暗相间的干涉条纹，并由此测定了光的波长。由于干涉现象是波的重要特征之一，所以该实验为光的波动性提供了重要的实验依据。随着时间的推移，波动说取得了越来越多的证据。英国科学家麦克斯韦在建立电磁理论的研究过程中，于1862年预言了光是一种电磁波。1888年，德国物理学家赫兹通过实验发现了人们期待已久的电磁波。至此，似乎波动说终于彻底击败了微粒说，但是人们对于光的本性的探究并没有因此而止步。

讨论与交流

光电效应和康普顿效应让光的微粒说以一种新的形式呈现于世人面前。但爱因斯坦所说的“光子”与牛顿所坚持的“微粒”是一样的吗？通过“光的本性”之争，你能感悟到人类对自然界的认识有何特点和规律？请结合人类对光的本质认识过程，谈谈物理实验对于物理学发展的价值。

光的波粒二象性

光的干涉和衍射实验表明，光是一种电磁波，具有波动性。而光电效应和康普顿效应则表明，光在与物体相互作用时，光子表现出粒子性。那么，光到底是粒子还是波呢？下面我们通过光的双缝干涉实验来研究这个问题。

如图4-3-4所示，由光源S发出的光经双狭缝 S_1 和 S_2 后到达感光片D。我们知道，经过缝 S_1 和经过缝 S_2 的两部分光会产生干涉，结果将在感光片上形成明暗相间的干涉条纹。这是光的波动性表现。

但是，上述光的干涉并没有完全排除光是粒子的可能性。如果我们把从光源S发出的光看成是由大量光子组成的，那么可以认为，部分光子经过了缝 S_1 ，部分光子经过了缝 S_2 ，然后两部分光子相互干涉产生了干涉条纹。为了排除这种可能性，我们换一种方法再做上述实验。

我们将光源S的强度降低，直到入射光减弱到每次只有一个光子经过狭缝，前一个光子已经消失在感光片上，后一个光子才从光源出发。记录一段时间，这时感光片上呈现杂乱分布的几个亮点，如图4-3-5（a）所示。每个亮点都是一个光子在感光片上留下的记录，这显示出了光的粒子性。适当增加记录时间，我们会惊奇地发现，亮点在感光片上形成模糊的亮纹，如图4-3-5（b）所示。光子主要落在感光片的亮纹处，这就是干涉条纹。记录时间越长，干涉条纹越明显，图4-3-5（c）就是长时间记录形成的清晰的干涉图样。干涉条纹再次显示出光的波动性。

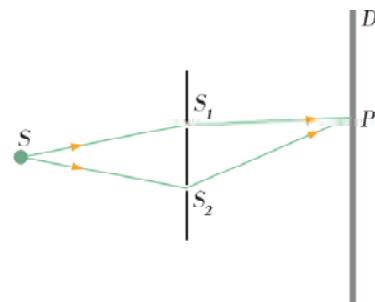
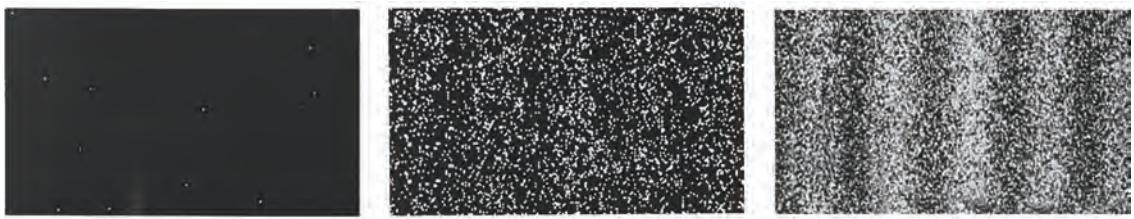


图4-3-4 光的双缝干涉



(a) 短时间曝光

(b) 稍长时间曝光

(c) 长时间曝光

图 4-3-5 弱光干涉图样

由于每次穿过狭缝的只有一个光子，它不可能跟其他光子产生干涉，但光的干涉还是发生了。可见，波动性也是光子的属性。光既有粒子性，又有波动性，人们把这种性质称为光的波粒二象性（wave-particle dualism）。

我们知道，光子能量和动量表示为 $\varepsilon = h\nu$ 和 $p = \frac{h}{\lambda}$ 。其中，能量 ε 和动量 p 是描述光子粒子性的重要物理量，频率 ν 和波长 λ 是描述光子波动性的典型物理量，它们通过布朗克常量 h 联系在一起。可以说普朗克常量 h 是联系光子粒子性和波动性的桥梁。

在上述实验中，每个光子按照一定的概率落在感光片的某一点上。概率大的地方落下的光子多，形成亮纹；概率小的地方落下的光子少，形成暗纹。所以，干涉条纹是光子落在感光片上各点的概率分布的反映。因此，物理学中把光波看成是一种概率波（probability wave）。

练习

- 观察生活中警示信号灯的颜色，为什么人们不选用其他的颜色作警示呢？
- 在学完“光的波粒二象性”内容后，小李同学说：“大量光子的行为表现为波动性，个别光子的行为往往表现出粒子性。当光表现出波动性时，就不具有粒子性了；而光表现出粒子性时，就不再具有波动性了。”他的观点正确吗？为什么？
- 小玲同学认为，光波和声波都具有波动性，只不过光波的频率高，波长较短。对此，你认同她的观点吗？为什么？
- 我国非常注重太阳能的开发和利用，太阳能热水器的产量和使用量均为世界第一。光热转换是将太阳能转换成其他物质内能的过程，太阳能热水器就是一种光热转换装置，它的主要转换器件是真空玻璃管，这些玻璃管将太阳能转换成水的内能。如图 4-3-6 所示，真空玻璃管上采用镀膜技术增加透射光，使尽可能多的太阳能转换成内能，这种镀膜技术的物理依据是什么？请查阅相关资料后与同学分享所得。



图 4-3-6 太阳能热水器

第四节

德布罗意波

光既有粒子性，又有波动性。那么，实物粒子是否也像光一样，既有粒子性，又有波动性呢？

德布罗意波假说

法国物理学家德布罗意（L. de Broglie, 1892—1987）在1924年提交的博士学位论文中首次提出了一个大胆的假设：实物粒子和光一样具有波粒二象性。这种与实物粒子相联系的波后来被称为德布罗意波（de Broglie wave），也叫物质波。德布罗意假设实物粒子的波长与其动量之间的关系为

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (4.4.1)$$

式中 λ 是德布罗意波的波长， p 是相应的实物粒子的动量。

德布罗意假说是在没有任何实验依据的情况下提出来的，但物理学是一门以实验为基础的学科，在未经实验检验之前，所有的理论都不可能成为科学的真理。那么，有没有办法来检验德布罗意的假说呢？

我们知道，当波遇到一个大小与该波波长相仿的障碍物时会发生衍射。比如，一束平行光通过一个线度与波长相近的小孔，会在远处的屏幕上产生光斑，在光斑边缘会产生一圈一圈明暗相间的光环。如果德布罗意波真的存在，实物粒子也应该发生衍射。

以电子为例，电子的质量为 9.1×10^{-31} kg，假设某电子速度大小为 4.0×10^6 m/s，根据式（4.4.1）可以算出该电子对应的德布罗意波长为

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 4.0 \times 10^6} \text{ m} = 1.8 \times 10^{-10} \text{ m.}$$

也就是说，要让电子产生衍射，就需要让一束电子穿过一个非常小的孔，孔的线度刚好与金属晶体中晶格大小相当。而晶体内部的原子（或离子）在空间呈周期性排列，在每一层晶面上就构成一定形状的网格，每一个网格就相当于一个这样的小孔。所以，电子束



图 4-4-1 德布罗意

照射到晶体上可能会发生衍射.

讨论与交流

宏观物体能显示出波动性吗？质量为 10 g 的子弹，速度为 500 m/s，它对应的德布罗意波波长是多少？有可能让这样一颗子弹打在靶上而出现干涉或衍射现象吗？

电子衍射

1925 年，美国工程师戴维森（C. J. Davisson，1881—1958）在一次实验中发现了电子的衍射现象，但当时他还不知道德布罗意假说。1926 年在得知德布罗意波的概念后，他不断地进行实验，认真地分析，最后在 1927 年宣布获得了电子束在晶体上的衍射图样，实验结果与德布罗意公式计算的结果完全一致。几乎同时，英国物理学家 G. P. 汤姆孙（G. P. Thomson，1892—1975）也独立发现了电子在晶体上的衍射现象。如图 4-4-2 所示是电子束在单晶 MnO_3 上的电子衍射图样，如图 4-4-3 所示是电子束在多晶 Au 上的电子衍射图样。

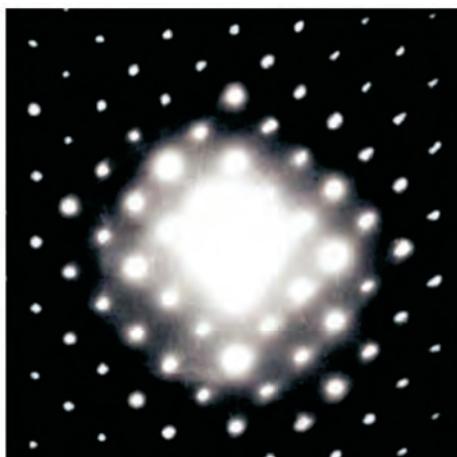


图 4-4-2 单晶 MnO_3 的电子衍射图样

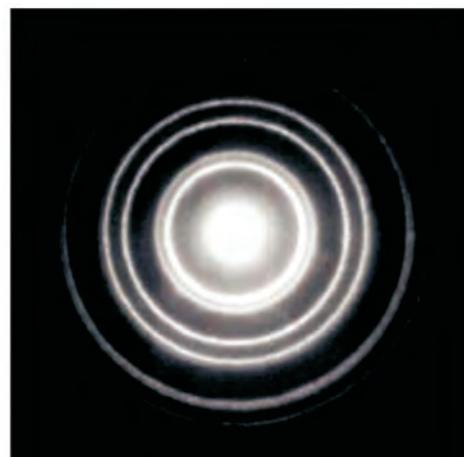


图 4-4-3 多晶 Au 的电子衍射图样

电子衍射实验证明了德布罗意波假说，德布罗意因此获得了 1929 年的诺贝尔物理学奖。而戴维森和 G. P. 汤姆孙则共同获得 1937 年的诺贝尔物理学奖。

电子不仅会发生衍射，而且会发生干涉。实验表明，微弱电子束的干涉图样和弱光干涉图样是非常相似的。由此可见，实物粒子的确具有波动性。

实验证明，不仅仅电子，其他微观粒子都具有波动性。同时，各种实物粒子也具有粒子性，这就是说实物粒子具有与光一样的波粒二象性。波粒二象性是包括光子在内的一切微观粒子的共同特征。



实践与拓展

光学显微镜和电子显微镜分别利用可见光和电子束将物体放大成像。相对于光学显微镜，电子显微镜的分辨率更高。请查阅相关资料，了解电子显微镜比光学显微镜分辨率高的原因。

电子显微镜

1931年，德国柏林工业大学的恩斯特·鲁斯卡和马克斯·克诺尔利用德布罗意波的原理发明了世界上第一台电子显微镜。电子显微镜简称电镜，是在光学显微镜的基础上，用电子束和电子透镜代替光束和光学透镜，使物质的细微结构在非常高的放大倍数下成像的仪器。

电子显微镜由镜筒、真空装置和电源柜三部分组成。镜筒主要有电子源、电子透镜、样品架、荧光屏和探测器等部件，这些部件通常是自上而下地装配成一个柱体。电子透镜用来聚焦电子，是电子显微镜镜筒中最重要的部件。一般使用的是磁透镜，有时也有使用静电透镜的。它用一个对称于镜筒轴线的空间电场或磁场使电子轨迹向轴线弯曲形成聚焦，其作用与光学显微镜中的光学透镜（凸透镜）是一样的，所以称为电子透镜。光学透镜的焦点是固定的，而电子透镜的焦点可以被调节，因此电子显微镜不需要像光学显微镜那样移动透镜系统。现代电子显微镜大多采用电磁透镜，由很稳定的直流励磁电流通过带极靴的线圈产生的强磁场使电子聚焦。电子源是由一个释放自由电子的阴极（也叫栅极）和一个环状加速电子的阳极构成的。阴极和阳极之间的电压差一般在数千伏到300万伏之间，它能发射并形成速度均匀的电子束，所以加速电压的稳定性要求不低于万分之一。探测器用来收集电子的信号或次级信号。真空装置用以保障显微镜内的真空状态，这样电子在其路径上不会被吸收或偏向。电源柜由高压发生器、励磁电流稳流器和各种调节控制单元组成。

目前，电子显微镜已经发展出透射式、扫描式、发射式和冷冻电子显微镜等多种类型。透射式电子显微镜常用于观察光学显微镜所不能分辨的细微物质结

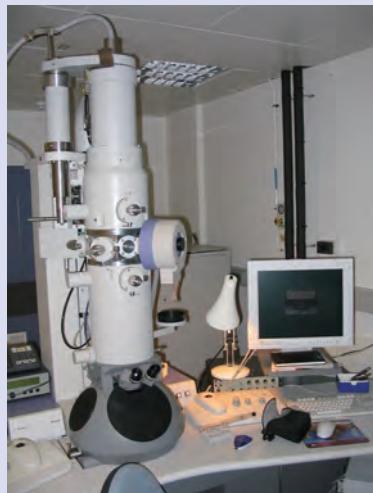


图4-4-4 电子显微镜

构；扫描式电子显微镜主要用于观察固体表面的形貌，也能与X射线衍射仪或电子能谱仪相结合，构成电子微探针，用于物质成分分析；发射式电子显微镜用于自发射电子表面的研究。

近些年发展起来的冷冻电子显微镜，更是利用超低温冷冻制样及传输技术，可直接观察液体、半液体及对电子束敏感的样品，如生物、高分子材料等，使得人们能够直接测定复杂生命系统中生物分子的结构，从而将生物化学领域带入一个新的时代。因此，2017年诺贝尔化学奖授予瑞士科学家雅克·杜波切特、美国科学家阿希姆·弗兰克以及英国科学家理查德·亨德森，以表彰他们为研发冷冻电子显微技术做出的贡献。

练习

1. 我们说电子具有波动性，并不是说电子沿着波浪形的曲线前进。电子的波动性表现在哪些方面呢？
2. 求经过10 kV电压加速的电子的德布罗意波的波长。
3. 用光学显微镜不可能观察到纳米级的微小结构。这是因为可见光的波长数量级是 10^{-7} m，远大于纳米，会发生明显的衍射现象，不能精确聚焦。因此，人们使用分辨率比光学显微镜更高的电子显微镜来观察纳米级的微小结构。
 - (1) 请说明电子显微镜能观察到纳米级微小结构的原因。
 - (2) 现用电子显微镜观测线度为d的某生物大分子的结构。为满足测量要求，将显微镜工作时电子的德布罗意波波长设定为 $\frac{d}{n}$ ，其中n>1。已知普朗克常量h、电子质量m和电子电荷量e，电子的初速度不计，则显微镜工作时电子的加速电压应为多大？

第五节

不确定性关系

在经典物理学中，对于质点，我们可以用其位置和动量来精确描述它的运动。不仅如此，如果已知该质点的加速度，我们还可以预言质点在以后的任意时刻的位置和动量，从而描绘出它的运动轨迹。那么，在微观领域中，我们能否同样精确描述微观粒子的位置和运动状态呢？

我们知道，在光的单缝衍射实验中，单色光从狭缝投影到光屏上，如果光是经典的粒子，那么它在屏上的落点应该在狭缝的范围之内。但由于光子发生了衍射，它最终到达的位置会超出狭缝投影的范围，而且狭缝调节得越窄，其投射的范围反而越宽。因光屏上各点的亮度反映了粒子到达该点的概率，如果把这个概率的分布用图像表示出来，就可得到如图 4-5-1 所示的光强曲线。

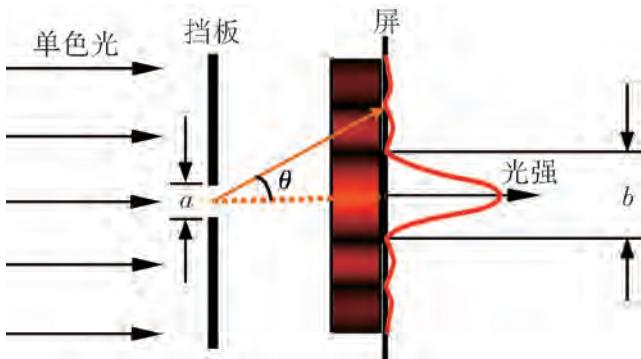


图 4-5-1 单缝衍射图样的光强分布， a 代表粒子位置的不确定范围， b 代表粒子动量的不确定范围

入射的粒子有确定的动量，但它们在挡板左侧的位置却是不确定的。我们可通过调窄狭缝的宽度 a 来限定它们的位置，使入射粒子位置的不确定量减小。由于微观粒子具有波动性，会发生衍射，许多粒子散布在宽度为 b 的中央亮条纹之内。按照经典物理学理论，这些粒子本应通过狭缝后要沿着水平方向运动，但有些粒子却跑到缝的投影位置之外。可以判断，这些粒子具有了与其原运动方向垂直的动量。而粒子到达屏上的位置是有一定的概率的，所以粒子在垂直方向上的动量也具有不确定性，中央亮条纹的宽度 b 可以衡量其不确定性的大小。

为了得到更准确的通过狭缝粒子的位置，我们调节狭缝变窄，但结果是狭缝越窄，屏上中央亮条纹的宽度 b 就越大。这说明，在得到更准确的粒子位置的同时，粒子的动量不确定性却增大了。微观粒子位置的确定性与其动量的确定性就像跷跷板一样，二者无法同时确定。

进一步的研究表明，因为微观粒子的位置与动量不可同时被确定，其位置的不确定量 Δx 与动量的不确定量 Δp 遵守不等式

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}.$$

式中 h 是普朗克常量. 这就是著名的**不确定性关系** (uncertainty relation).

从不确定性关系我们知道, 在微观领域中, 如果要更准确地确定粒子的位置, 那么粒子的动量一定会更不准确, 也就是说, 不可能同时准确地知道粒子的位置和动量, 因而也就不可能用“轨迹”来描述粒子的运动, 只能通过概率波作统计性的描述.



讨论与交流

宏观物体的位置与动量之间也存在不确定性关系吗? 如果将不确定性关系式 $\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$ 应用于宏观物体上, 是否还有意义? 为什么?

量子论改变了人们认识物质世界的观念和方式. 从 1924 年到 1928 年短短几年里, 海森伯 (W. Heisenberg, 1901—1976)、薛定谔 (E. Schrödinger, 1887—1961)、狄拉克 (P. A. M. Dirac, 1902—1984) 等人就完成了量子力学的建立, 使得量子力学成为一个理论严谨、方法齐备的崭新理论, 与相对论共同成为当今物理科学的两大基础理论. 量子力学的产生和发展, 标志着人类认识自然实现了从宏观世界向微观世界的重大飞跃, 是人类史上又一次物理学革命, 对于人类认识自然产生深远的影响.

量子力学诞生至今已超过百年, 它的发展奠定了现代科技的基础, 引发了一系列划时代的科学发现与技术发明, 对人类社会的进步做出了重要贡献. 现代物理学以及相关领域学科, 例如原子物理、天体物理、信息技术、材料科学、量子化学、量子生物学等, 无不立足于量子力学这块奠基石上. 它的应用更是遍及现代社会的各个角落, 从手机、计算机等日常电子产品, 到激光、量子通信、量子计算等前沿科技, 无不体现着量子力学的广阔应用前景.



实践与拓展

关于量子力学中的测量问题, 人们一直争论不休, 其中以 1935 年薛定谔提出的一个思想实验 (史称“薛定谔猫佯谬”) 最为著名. 请查阅相关资料, 了解有关“薛定谔猫佯谬”的内容, 并与大家交流分享.

量子力学的建立

量子力学和相对论是现代物理学的两大基石。如果说相对论给我们提供了新的时空观，那么量子力学就给我们提供了新的关于自然界的表述方法和思考方法。量子力学是描述物质世界微观粒子运动规律的基本理论，揭示了微观物质世界的基本规律，为原子物理学、固体物理学、核物理学和粒子物理学等学科奠定了理论基础。

19世纪末，正当经典物理取得重大成就的时候，一系列经典理论无法解释的现象一个接一个地被发现。1913年，丹麦青年物理学家玻尔在普朗克和爱因斯坦的量子假说的基础上，提出了原子的能级结构，建立了前期量子论，可以部分说明原子的若干性质。这些量子论，虽然成功地解释了一些实验现象，但是与经典物理的矛盾并未根本解决，经典物理加上量子化条件的改革方案，在理论体系上也存在严重缺陷。这使得当时的一些年轻物理学家认识到简单地引入量子概念不能把问题全部解决，必须建立一个自洽的新理论。

1923年，还在法国巴黎大学读博士的德布罗意大胆地提出物质波的概念。1925年底，德布罗意的物质波虽然还未被实验证实，但由于得到爱因斯坦的肯定，受到了瑞士苏黎世大学教授薛定谔的关注。薛定谔在接受德布罗意关于物质粒子（如电子）具有波粒二象性的假说之后的几个月内，就完成了关于氢原子的波动力学的论文。他仿照一般波动理论，引入波函数表示粒子的运动状态，并建立起波函数所满足的运动方程——薛定谔方程。在此之前的几个月，德国物理学家海森伯、玻恩等人开始创立量子力学的另一种表述形式——矩阵力学。他们通过建立完整的理论体系，全面系统地论述了矩阵力学的原理、方法和应用，并首次使用了量子力学这个名称。而在整个过程中，英国物理学家狄拉克在海森伯的矩阵论的启发下，发现了经典力学中泊松括号与海森伯提出的矩阵力学规则的相似之处。基于这项发现，他得出更明确的量子化规则（即正则量子化）。由此出发，狄拉克几乎和薛定谔同时完成了自己对氢原子的独特的解法。不久，薛定谔等人证明了波动力学和矩阵力学在数学上是等价的。1927年，德布罗意波被实验证实。1928年，狄拉克把相对论引进了量子力学，建立了相对论形式的波动方程，也就是著名的狄拉克方程，并预言了正电子的存在。两年后，正电子被发现。



图4-5-2 第五届索尔维会议合照

量子力学的实际应用取得了惊人的成功，理论预言和实验结果极好地相符。但是，在对量子力学进行物理解释中，人们却发生了尖锐的冲突。以玻尔、海森堡为代表的一批物理学家不断发展关于量子力学的诠释，逐渐形成了对 20 世纪物理学和哲学有重大影响力学派，人们称之为哥本哈根学派。他们对量子力学的诠释，遭到了爱因斯坦和薛定谔的反对。双方展开了一场长达半个世纪的论战，许多物理学家和哲学家卷入其中，这一论战至今还未结束。



练习

1. 关于不确定性关系 $\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$ 有以下几种理解，其中正确的是（ ）。
 - A. 微观粒子的动量不可能确定
 - B. 微观粒子的坐标不可能确定
 - C. 微观粒子的动量和坐标不可能同时确定
 - D. 不确定性关系不仅适用于电子和光子，也适用于其他微观粒子
2. 在光的单缝衍射实验中，狭缝变窄，光子动量的不确定量如何变化？请用实验现象解释这个结论。
3. 设一电子和一质量为 10 g 的子弹的速率均为 500 m/s，其动量的不确定范围为 0.01%，若位置和速率在同一实验中同时测量，试问它们位置的最小不确定量各为多少？（电子质量 $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg）

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



回顾与评价

1. 从发现光电效应的现象到解释，经历了哪些科学论证过程？
2. 谈谈你对光的本性的认识。
3. 德布罗意提出实物粒子具有波动性的假说，是对传统物质观的挑战吗？这一假说为什么最终会获得人们的认可？

习题四

1. 爱因斯坦由光电效应的实验规律猜测光具有粒子性，从而提出光子说。从科学研究的方法来说，这属于（ ）。

- A. 等效替代 B. 控制变量 C. 科学假说 D. 数学归纳

2. 根据爱因斯坦的“光子说”可知（ ）。

- A. “光子说”本质就是牛顿的“微粒说”
B. 光的波长越大，光子的能量越小
C. 一束单色光的能量可以连续变化
D. 只有光子数很多时，光才具有粒子性

3. 硅光电池是利用光电效应原理制成的器件，下列表述正确的是（ ）。

- A. 硅光电池是把光能转化为电能的一种装置
B. 硅光电池中吸收了光子能量的电子都能逸出
C. 逸出的光电子的最大初动能与入射光的频率无关
D. 任意频率的光照射到硅光电池上都能产生光电效应

4. 实物粒子和光都具有波粒二象性。下列选项中，突出体现波动性的是（ ），突出体现粒子性的是（ ）。

- A. 电子束通过双缝实验装置后可以形成干涉图样
B. 人们利用中子衍射来研究晶体的结构
C. 人们利用电子显微镜观测物质的微观结构
D. 光电效应实验中，光电子的最大初动能与入射光的频率有关，与入射光的强度无关

5. 如图 4-1 所示是工业生产中大部分光电控制设备（如夜亮昼熄的路灯）用到的光控继电器的示意图，它由电源、光电管、放大器、电磁继电器等组成。

- (1) 图 4-1 中的 a 端应是电源_____极。
(2) 光控继电器的原理是当光照射光电管时

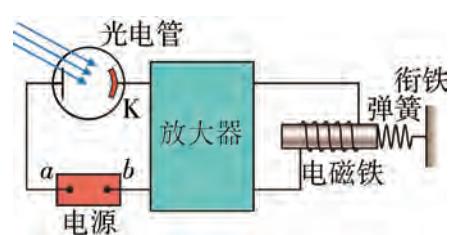


图 4-1

- (3) 当用绿光照射光电管阴极 K 时，可以发生光电效应，则下列说法正确的是（ ）。

- A. 增大绿光照射强度，光电子的最大初动能增大
 B. 增大绿光照射强度，电路中的光电流增大
 C. 改用波长比绿光波长长的光照射光电管阴极 K 时，电路中一定有光电流
 D. 改用频率比绿光频率高的光照射光电管阴极 K 时，电路中一定有光电流
6. 光子是一颗颗不可分割的粒子吗？请说明理由。
 7. 查阅有关资料，根据事件顺序列出光学研究史上的重大历史事件。
 8. 请针对“光的波粒二象性”这一主题，写一篇小短文。
 9. 在演示光电效应的实验中，把某种金属板连在验电器上，用弧光灯直接照射金属板，验电器的指针张开一个角度。现在弧光灯和金属板之间插入一块普通玻璃板，再用弧光灯照射，验电器指针不张开。已知弧光灯发出的光主要包含红外线、可见光、紫外线，由此可以得出什么结论？
 10. 在光电效应实验中，某同学用同一光电管在不同实验条件下得到了三条光电流与电压之间的关系曲线，如图 4-2 所示。请判断：
 (1) 三种光的波长关系。
 (2) 三次实验中光电子最大初动能的大小关系。
 11. 在某次光电效应实验中，得到的遏止电压 U_c 与入射光的频率 ν 的关系图线如图 4-3 所示。若该直线的斜率和截距分别为 k 和 b ，电子电荷量的绝对值为 e ，用以上物理量表示普朗克常量及所用材料的逸出功。
 12. 激光器是一个特殊的光源，它发出的光便是激光，红宝石激光器发射的激光是不连续的一道一道的闪光，每道闪光被称为一个光脉冲。现有一红宝石激光器，发射功率为 $P = 1.0 \times 10^6 \text{ W}$ ，所发射的每个光脉冲持续的时间 $\Delta t = 1.0 \times 10^{-11} \text{ s}$ ，波长 $\lambda = 693.4 \text{ nm}$ ($1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$)，则每列光脉冲的长度 L 是多少？其中含有的光子数是多少？
 13. 某光电管的阴极是用金属钾制成的，它的逸出功为 2.21 eV ，现用波长为 $2.5 \times 10^{-7} \text{ m}$ 的紫外线照射阴极，已知真空中光速为 $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，元电荷为 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，普朗克常量为 $6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ，则钾的极限频率和该光电管发射的光电子的最大动能为多少？
 14. 光子具有能量，也具有动量。光照射到物体表面时，会对物体产生压强，这就是“光压”。光压的产生机理如同气体压强：大量气体分子与器壁的频繁碰撞产生了持续均匀的压力，器壁在单位面积上受到的压力就是气体的压强。设太阳光每个光子的平均能量为 E ，太阳光垂直照射地球表面时，在单位面积上的辐射功率为 P_0 。已知光速为 c ，则光子的动量为 $\frac{E}{c}$ 。
 (1) 若太阳光垂直照射在地球表面，则时间 t 内照射到地球表面上半径为 r 的圆形区域内太阳光的总能量及光子个数分别是多少？
 (2) 若太阳光垂直照射到地球表面，在半径为 r 的某圆形区域内被完全反射（即所有

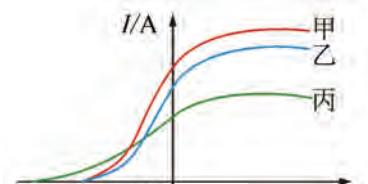


图 4-2

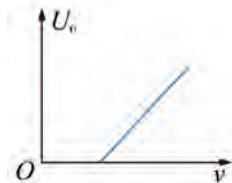


图 4-3

光子均被反射，且被反射前后的能量变化可忽略不计），则太阳光在该区域表面产生的光压是多少？

(3) 有科学家建议利用光压对太阳帆的作用来作为未来星际旅行的动力来源。一般情况下，太阳光照射到物体表面时，一部分会被反射，还有一部分被吸收。若物体表面的反射系数为 ρ ，则在物体表面产生的光压是全反射时产生光压的 $\frac{1+\rho}{2}$ 倍。设太阳帆的反射系数 $\rho = 0.8$ ，太阳帆为圆盘形，其半径 $r = 15 \text{ m}$ ，飞船的总质量 $m = 100 \text{ kg}$ ，太阳光垂直照射在太阳帆表面单位面积上的辐射功率 $P_0 = 1.4 \text{ kW}$ ，已知光速 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。利用上述数据并结合第(2)问中的结论，求太阳帆飞船仅在上述光压的作用下，能产生的加速度大小是多少？(不考虑光子被反射前后的能量变化，计算结果保留两位有效数字)

15. 以往我们认识的光电效应是单光子光电效应，即一个电子在极短时间内只能吸收到一个光子而从金属表面逸出。强激光的出现丰富了人们对于光电效应的认识。实验证实，用强激光照射金属，由于其光子密度极大，一个电子在极短时间内吸收多个光子成为可能，从而形成多光子光电效应。光电效应实验装置示意如图 4-4 所示。用频率为 ν 的普通光源照射阴极 K，没有发生光电效应。换用同样频率为 ν 的强激光照射阴极 K，则发生了光电效应。此时，若加上反向电压 U ，即将阴极 K 接电源正极，阳极 A 接电源负极，在 KA 之间就形成了使光电子减速的电场，逐渐增大 U ，光电流会逐渐减小。当光电流恰好减小到零时，写出两个所加反向电压 U 可能的表达式。(其中 W 为逸出功， h 为普朗克常量， e 为电子电量)

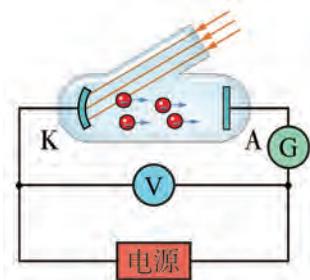


图 4-4

第五章 原子与原子核

随着人类对物质结构认识的不断深入，各项应用也在快速地发展，放射性元素镭被发现不到 20 年就被应用于医学研究；质子加速器被发明还不到一年就被用于医疗服务；至于核裂变，更是在基础物理理论尚未被完全建立之前，就已经开始应用于原子弹的研制。如今，核能应用已转向和平领域，开始造福人类。

人们无法打开原子直接看清它们的内部结构，那么科学家们又是如何推断出原子和原子核的结构呢？在本章学习中，我们将对 α 粒子散射实验、氢原子光谱和放射性现象进行分析，了解原子核式结构和能级结构，了解原子核的组成和性质，知道射线的危害和防护，以及核技术应用对人类生产、生活的影响。通过对人类探索物质结构过程的学习，树立正确的物质观念，培养科学的探索精神。



第一节

原子的结构

在相当长的一段时间内，人们都以为原子是组成物质的最小微粒，原子是“不可分割”的。直到1897年，英国物理学家J.J.汤姆孙通过对阴极射线进行研究，发现了电子，才敲开了原子世界的大门！

原子核式结构的提出

J.J.汤姆孙在气体电离和光电效应实验现象中发现，不同物质都可以逸出一种带负电的粒子，并且质量比任何一种分子或原子的质量都小得多，因此完全确认了电子的存在。由于发现电子这一杰出贡献，J.J.汤姆孙在1906年获得诺贝尔物理学奖。电子的发现打破了传统的“原子不可分”的观念，使人类对自然世界的认识又向前迈进了一步，也大大激发了人们研究原子内部结构的热情。由于原子呈电中性，既然电子带负电，那么原子内部一定还有带正电的部分。J.J.汤姆孙据此提出了一种原子结构模型。他设想原子是一个球体，正电荷均匀地分布其中，质量很小的电子镶嵌其中（如图5-1-1所示）。有人形象地称其为“枣糕模型”或“葡萄干布丁模型”。J.J.汤姆孙的模型能够解释一些实验事实，但是不久就被新的实验事实所否定。

1909—1911年，英国物理学家卢瑟福指导他的助手进行了 α 粒子散射实验。如图5-1-2所示是 α 粒子散射实验示意图。

整个实验在真空环境下进行。高速的 α 粒子束垂直射到很薄的金箔上，由于受到金原子中带电微粒的库仑力作用，一些 α 粒子通过金箔后必然会改变原来的运动方向，产生偏转。散射后的 α 粒子打在荧光屏上产生闪光，通过显微镜可以观察到这一现象。

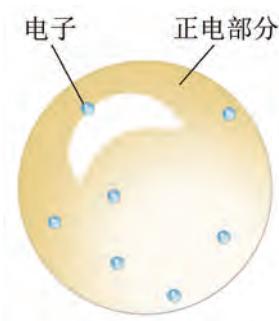


图5-1-1 J.J.汤姆孙的原子结构模型

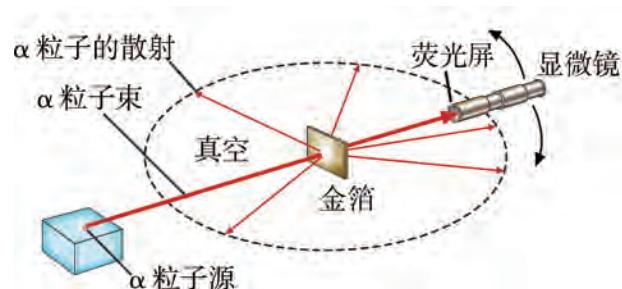


图5-1-2 α 粒子散射实验示意图

实验结果出人意料：绝大多数 α 粒子穿过金箔后仍沿原来的方向前进，但少数 α 粒子发生了较大的偏转，并且有极少数 α 粒子的偏转超过了 90° ，有的甚至达到 180° 。



讨论与交流

α 粒子在飞行过程中碰到电子，其运动情况会发生什么变化？

设 α 粒子以速度 v 与电子发生弹性正碰，为简化讨论，假定电子原来是静止的。由于 α 粒子的质量远大于电子的质量，原子中的电子不可能使 α 粒子发生大角度的偏转。

为什么 α 粒子会出现大角度偏转呢？卢瑟福认为， α 粒子一定是受到原子内部正电荷产生的极强的电场斥力作用，运动方向才会发生如此大的改变，只有原子中的正电荷全部都集中在原子中心的一个很小的区域上，才有可能产生这种现象。

1911 年，卢瑟福提出了原子的核式结构模型。如图 5-1-3 所示，原子的中心有一个带正电的很小的原子核，它几乎集中了原子的全部质量，而电子则在核外空间绕原子核旋转。原子半径的数量级大约是 10^{-10} m，而原子核半径的数量级为 $10^{-15} \sim 10^{-14}$ m，仅相当于原子半径的万分之一。形象地说，假设原子像足球场那么宽阔，原子核只相当于一个硬币大小，可见原子内部是多么“空旷”。

按照这个模型，在 α 粒子散射实验中，大多数 α 粒子都是“侵入”原子核和电子之间的空间里，它们受到的库仑力很小，运动方向的改变也就很小。当极少数 α 粒子非常接近金原子核时，它们之间强烈的斥力就迫使 α 粒子发生较大的偏转，甚至被弹回，如图 5-1-4 所示。

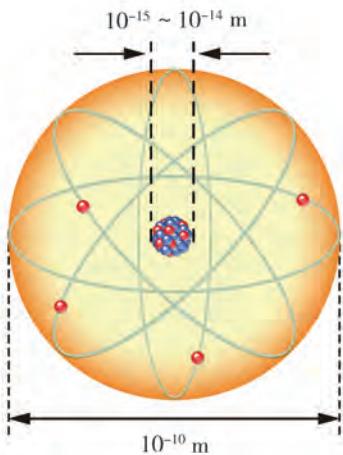


图 5-1-3 原子的核式结构模型

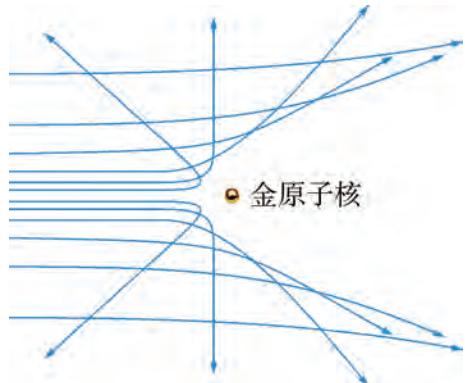


图 5-1-4 α 粒子散射示意图

氢原子光谱

原子核式结构模型成功解释了 α 粒子散射实验，但对原子光谱的解释却出现了问题。某种原子的气体通电后可以发光并产生固定不变的光谱，这种光谱被称为原子光谱 (atomic spectrum)。原子光谱是了解原子结构最重要的直接证据。


观察与思考

如图 5-1-5 所示是观测氢原子光谱的实验装置图。在充有稀薄氢气的放电管两极间加上 2~3 kV 的高压，使氢气放电，氢原子在电场的激发下发光，通过分光镜可观察到氢原子的光谱。氢原子的光谱具有怎样的特点？

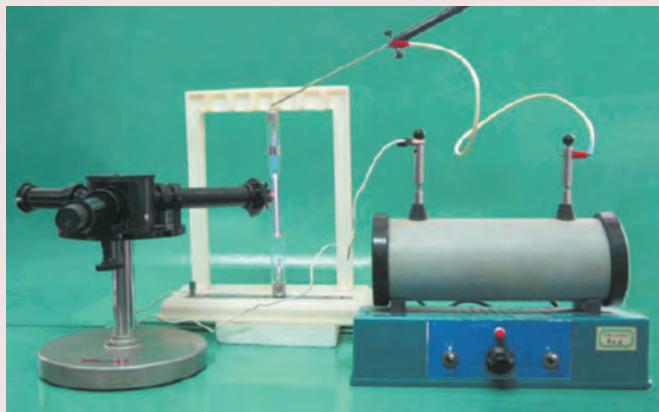


图 5-1-5 观测氢原子光谱的实验装置

按照经典物理学的观点，核外电子带有电荷，运动中要辐射电磁波。电子损失了能量，它的轨道半径会不断变小，最终落在原子核上。由于电子轨道的变化是连续的，辐射电磁波的频率也会连续变化。但事实上原子是稳定的，由实验得到的氢原子光谱是分立的，如图 5-1-6 所示。

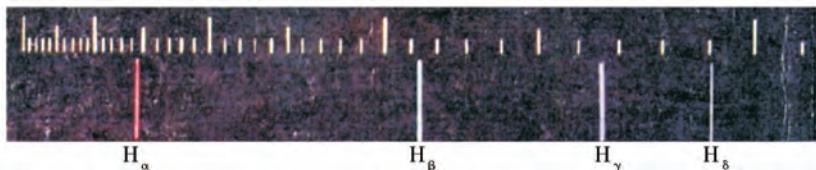


图 5-1-6 氢原子光谱

原子的能级结构

丹麦物理学家玻尔在普朗克、爱因斯坦量子概念的启发下提出：电子绕原子核运动的轨道半径是分立的，电子只能在某些特定的轨道上运动。当电子在不同的轨道上运动时，原子处于不同的状态，具有不同的能量。这些分立的能量值被称为原子的能级 (energy level)。原子从一个能级变化到另一个能级的过程叫作跃迁 (transition)。处于高能级的原子会自发地向低能级跃迁，并且在这个过程中辐射光子 [如图 5-1-8 (a) 所示]。假定原子在跃迁前后的能级分别为 E_m 和 E_n ，根据能量守恒定律，并结合爱因斯坦的光量子学说，可以得到辐射出光子的能量为

$$h\nu = E_m - E_n$$

(5.1.1)



图 5-1-7 玻尔

反之，原子吸收了特定频率的光子，或者通过其他途径（如受到高速电子的轰击）获得能量时，便可以从低能级向高能级跃迁〔如图 5-1-8 (b) 所示〕，同样也遵循上述的规律。



图 5-1-8 原子的跃迁

如图 5-1-9 所示是氢原子的能级示意图。每条横线代表一个能级，两条横线间的距离表示能级的间隔，即能量差。在正常状态下，氢原子处于最低的能级 E_1 ($n = 1$)，这个最低能级对应的状态称为基态 (ground state)。选取电子处于无穷远处时氢原子的能量为零，则氢原子各能级的能量为负值，其中，氢原子在基态时的能量为 -13.6 eV 。

当电子受到外界激发时，可从外界吸收能量，并从基态跃迁到较高的能级 E_2 , E_3 , … 上，这些能级对应的状态称为激发态 (excited state)。处于激发态的氢原子是不稳定的。它会向较低的能级跃迁，跃迁时释放出来的能量以光子形式向外辐射，这就是氢原子具有分立光谱的原因。辐射出的光子的能量等于两能级间的能量差。

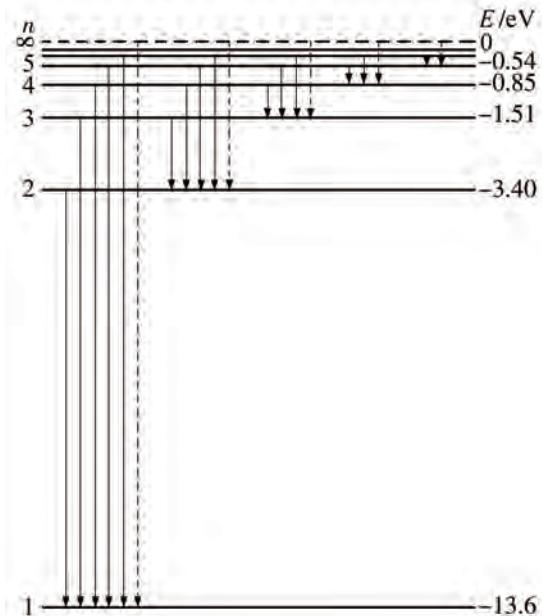


图 5-1-9 氢原子的能级示意图

例题：根据氢原子的能级示意图，一群氢原子处于 $n = 3$ 的激发态。

- (1) 在向较低能级跃迁的过程中向外发出的光子有几种？能量多大？
- (2) 哪些能使逸出功为 2.29 eV 的金属钠发生光电效应？逸出的光电子最大初动能为多大？

分析：大量氢原子处于 $n = 3$ 的激发态，回到基态有不同途径，可直接由 $n = 3$ 跃迁到 $n = 1$ ，也可逐级跃迁，跃迁释放的能量由两能级差决定。

解：(1) 由题意可知，处于 $n = 3$ 激发态的原子跃迁回基态，一共可发出 3 种光子。

其中 $n = 3$ 到 $n = 1$ 释放光子能量 $E_{31} = E_3 - E_1 = 12.09 \text{ eV}$ ；

$n = 3$ 到 $n = 2$ 释放光子能量 $E_{32} = E_3 - E_2 = 1.89 \text{ eV}$ ；

$n = 2$ 到 $n = 1$ 释放光子能量 $E_{21} = E_2 - E_1 = 10.20 \text{ eV}$ 。

(2) $n = 3$ 到 $n = 1$ 释放的光子和 $n = 2$ 到 $n = 1$ 释放的光子能使金属钠发生光电效应。

根据光电效应方程 $E_k = h\nu - W_0$ ，

$n = 3$ 到 $n = 1$ 释放的光子产生的光电子最大初动能 $E_{k1} = 9.80 \text{ eV}$ ；

$n = 2$ 到 $n = 1$ 释放的光子产生的光电子最大初动能 $E_{k2} = 7.91 \text{ eV}$ 。

玻尔的原子理论成功地解释了氢原子光谱的实验规律，是原子结构理论发展中的一个重大进展，但对于稍微复杂一点的原子，例如氦原子，就无法解释它的光谱现象。玻尔理论的局限性主要在于其保留了经典粒子的观念，把电子的运动仍然看做为经典理论下的轨道运动。我们知道，波粒二象性是包括电子在内的所有微观粒子的共同特征。对于电子的运动，我们只能用概率波对其进行统计性的描述。当原子处于不同的状态时，电子在原子核周围各处出现的概率不同。若用疏密不同的点表示电子在各处出现的概率，这样画出的概率分布图称为电子云（electron cloud）。如图 5-1-10 所示为氢原子处于基态时的电子云。

图 5-1-10 氢原子处于基态时的电子云



实践与拓展

在观察氢原子光谱的实验中，原子光谱与焰色反应有无关联？请查阅相关资料加以分析。

电子的发现

资料活页

1858 年，德国科学家普吕克（J. Plücker, 1801—1868）发现了阴极射线。他在一个被抽成真空的玻璃管两端加上高电压，这时阴极会发出一种射线，使正对阴极的玻璃管壁上出现绿色荧光。那么，阴极射线究竟是什么？是原子，还是更小的物质微粒？这个问题引起了科学家们的普遍关注。有人认为阴极射线类似于一种电磁波，也有人认为它由带负电的物质微粒组成，但任何一方也拿不出充分的证据。这场关于阴极射线本质的争论引起了 J. J. 汤姆孙的注意。他设计了如图 5-1-11 和图 5-1-12 所示的实验装置来测定阴极射线的比荷和电荷量。

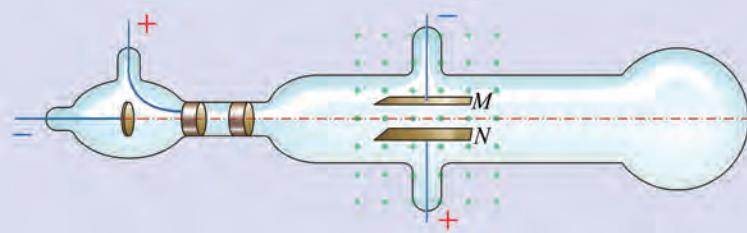


图 5-1-11 测定阴极射线的比荷

J. J. 汤姆孙计算出的比荷大约比当时已知的质量最小的氢离子的比荷大 2000 倍。这说明这种带电粒子或者电荷很大，或者质量很小。

J. J. 汤姆孙发现，对于不同的放电气体，或者用不同的金属材料制作电极，都测得相同的比荷，随后又发现在气体电离和光电效应等现象中，也可从不同物体中逸出这种带电粒子，这表明它是构成各种物体的共同成分。随后，J. J. 汤姆孙直接测量出该粒子的电荷量，发现该粒子的电荷量与氢离子的电荷量大小基本相同，说明它的质量比任何一种分子和原子的质量都小得多。至此，J. J. 汤姆孙完全确认了电子的存在。由于其发现电子的杰出贡献，J. J. 汤姆孙在 1906 年被授予诺贝尔物理学奖。后来，美国物理学家密立根又精确地测定了电子的电荷量 $e = 1.6022 \times 10^{-19}$ C。根据比荷，可以精确地计算出电子的质量 $m = 9.1094 \times 10^{-31}$ kg。

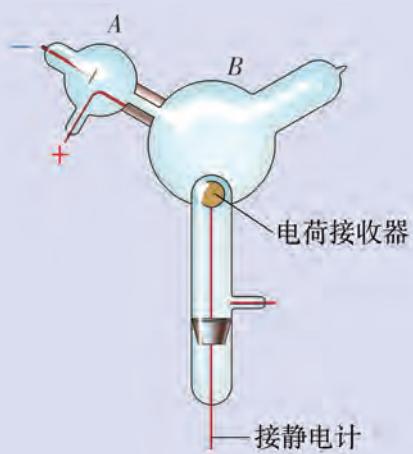


图 5-1-12 测定阴极射线的电荷量

练习

- 已知氢核的直径为 2.5×10^{-15} m，氢核与第一能级上电子间的距离约为 5×10^{-11} m。如果用一个直径为 4 cm 的乒乓球代表氢核，那么第一能级上的电子将离氢核多远？
- 卢瑟福通过 α 粒子散射实验，发现了原子中间有一个很小的核，并由此提出了原子的核式结构模型。如图 5-1-13 所示的平面示意图中，四条线表示 α 粒子运动的可能轨迹，请在图中补充完成中间两条 α 粒子的运动轨迹。
- 氢原子从 $n=1$ 的状态跃迁到 $n=4$ 的状态，它所吸收的光子的波长是多少？这是可见光吗？
- 如图 5-1-14 所示，能否将原子的能级跃迁与上下楼梯时势能的变化进行比较？请考虑什么情况下楼梯会趋向于连续的斜面。再与氢原子能级示意图比较，猜想氢原子能量在什么情况下量子效应最明显，什么情况下趋向于经典中的连续能量，这与量子数 n 的大小有关吗？如果按照氢原子能级的比例作出“楼梯图”，其应当是怎样的？
- 如果 α 粒子以速度 v 与电子发生弹性碰撞（假定电子原来是静止的），则碰撞后 α 粒子的速度变化了多少？并由此说明原子中的电子不能使 α 粒子发生明显偏转的原因。

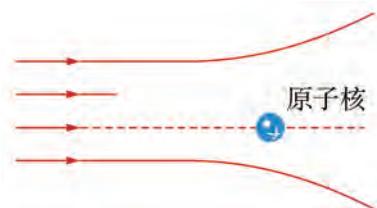


图 5-1-13

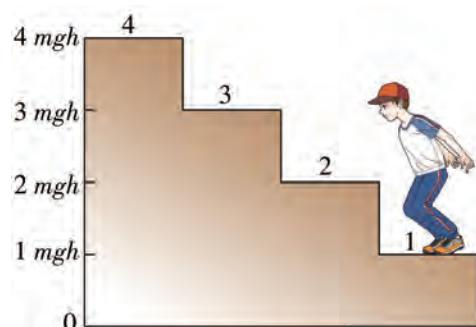


图 5-1-14

第二节 放射性元素的衰变

我们已经知道，原子核的直径一般不到原子直径的万分之一，那么这是否就是最小的物质组成单元呢？在这小小的原子核内部，会不会仍然有着复杂的结构？人们对这些问题的深入研究，是从天然放射现象的发现开始的。

放射性的发现

1896年，法国物理学家贝可勒尔（A. H. Becquerel, 1852—1908）发现铀和含铀的矿物都能发出一种看不见的射线，这种射线可以使包在黑纸里的照相底片感光。后来，玛丽·居里（M. S. Curie, 1867—1934，即居里夫人）将这种物质放射出射线的性质叫作放射性（radioactivity），具有放射性的元素叫作放射性元素（radioactive element）。

在贝可勒尔的影响下，玛丽·居里和她的丈夫皮埃尔·居里（P. Curie, 1859—1906）对铀和各种含铀的矿石进行了深入的研究，并且发现了两种放射性更强的新元素。玛丽·居里为了纪念她的祖国波兰，把其中一种元素命名为钋（元素符号是Po），另一种元素命名为镭（元素符号是Ra）。

放射性并不是少数几种元素才有的。研究发现，原子序数大于83的所有元素都有放射性。原子序数小于等于83的元素，有的也具有放射性。这些能自发地放出射线的元素叫作天然放射性元素（natural radioactive element）。

研究表明，如果一种元素具有放射性，那么不论它是以单质的形式存在，还是以某种化合物的形式存在，放射性都不受影响。也就是说，放射性与元素存在的状态无关。我们知道，元素的化学性质取决于原子核外的电子，因此可以断定，射线来源于原子核，也就是说，原子核是有内部结构的。

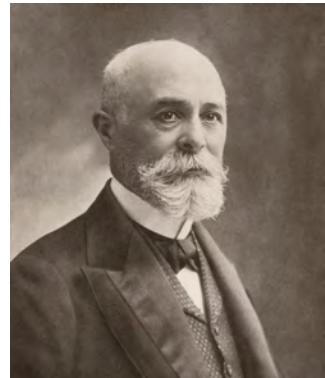


图 5-2-1 贝可勒尔



图 5-2-2 居里夫妇

原子核衰变

放射性元素放出的射线常见的有三种： α 射线、 β 射线和 γ 射线。 α 射线和 β 射线由卢瑟福在 1899 年研究铀放射性时发现并命名， γ 射线由法国科学家维拉德（P. U. Villard, 1860—1934）在 1900 年研究铀射线时发现。 α 射线是高速运动的 α 粒子流，电荷数是 2，质量数是 4，实际上就是氦原子核。 α 粒子的速度可达光速的十分之一，具有很高的动能，很容易使气体电离，但因为它在碰撞时很容易损失能量，所以贯穿物体的本领很小。 β 射线是高速运动的电子流，速度可达光速的 99%，但电离作用较弱，贯穿本领较强。 γ 射线不带电，它是频率很高的电磁波，波长很短，在 10^{-10} m 数量级以下，其电离作用最小，贯穿本领却最强，甚至能穿透几厘米厚的铅板。

上述三种射线都是原子核放射出来的。原子核放出 α 粒子或 β 粒子后，会变成新的原子核。我们把一种元素经放射过程变成另一种元素的现象，称为原子核的衰变（decay），把放出 α 粒子的衰变称为 α 衰变，放出 β 粒子的衰变称为 β 衰变。

讨论与交流

用什么方法可以判定和测量射线的带电性质、电荷量、质量等物理属性？

半衰期

放射性元素的衰变有一定的速率。例如，氡 222 经过 α 衰变成为钋 218，观察发现，对一定数量的氡，大约每过 3.8 天，就有一半发生了衰变。原子核数目因衰变减少到原来的一半所经过的时间，叫作半衰期（half life），记为 $T_{\frac{1}{2}}$ 。半衰期越大，表明放射性元素衰变得越慢。

如果用 m_0 表示放射性元素衰变前的质量，经过 t 时间后剩余的放射性元素的质量为 m ，从实验得出的衰变规律可以写为

$$m = m_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}} \quad (5.2.1)$$

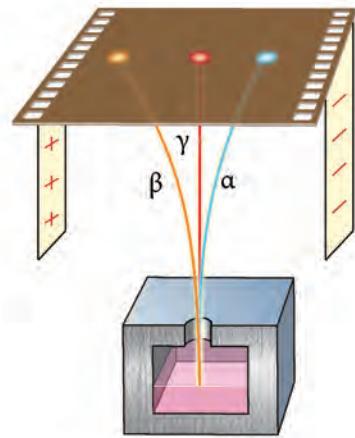


图 5-2-3 三种射线
在电场中的偏转示意图

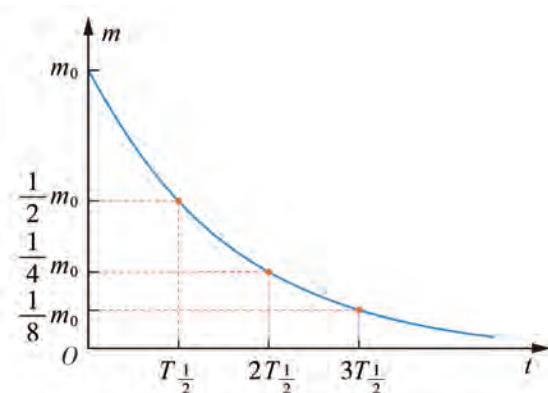


图 5-2-4 放射性元素衰变曲线



讨论与交流

铀 238 的半衰期长达 4.5×10^9 年，对某一个确定的铀 238 原子核，我们能够准确预言它会在什么时候发生衰变吗？为什么？

例题：一则新闻引起了某科技小组同学的兴趣：新疆文物考古研究所在 2017 年的 1 月、2 月先后对罗布泊境内的古楼兰区域进行了考古调查，在孔雀河下游北岸发现了一座古城，经过 ^{14}C 测定，古城的年代在东汉至魏晋时期。请问：考古学家通常是如何推算出古城遗址的年代呢？根据考古学家的测定，请反推 ^{14}C 测定的可能结果。

分析：生物存活期间，其体内 ^{14}C 与 ^{12}C 的比例不变；生命活动结束后，由于 ^{14}C 的 β 衰变， ^{14}C 的比例持续减少。因此，考古人员测量出土生物遗骸中每克碳中现有的 ^{14}C 含量，就可以根据 ^{14}C 的半衰期 ($T_{\frac{1}{2}} = 5730$ 年) 推知该生物的死亡年代，从而确定遗迹的年代。

解：假设某古生物遗骸 ^{14}C 含量为现代生物 ^{14}C 含量的 k 倍，则有

$$m = m_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}} = km_0,$$

即 $k = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{5730}}$ ，由此可推算古城遗址的年代。

运用此方法，可以反推生物遗骸 ^{14}C 含量与现代生物 ^{14}C 含量的比例。

取东汉某年（如 108 年）为例，其距今 1911 年，则

$$k = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \approx 0.794.$$

即生物遗骸 ^{14}C 含量为现代生物 ^{14}C 含量的 0.794 倍。

每一种放射性元素都有一定的半衰期，不同的放射性元素，半衰期不同，甚至差别非常大。例如，前面提到的氡 222 变为钋 218 的半衰期是 3.8 天，而镭 226 变为氡 222 的半衰期是 1620 年，铀 238 变为钍 234 的半衰期竟长达 4.5×10^9 年。

放射性元素的半衰期，描述的是大量该元素衰变的统计规律。对于一个特定或少量的原子来说，我们只知道其发生衰变的概率，而无法预测其何时发生衰变。例如，一个特定的氡核可能在 1 s 后就发生衰变，也可能 1 h 后发生衰变，甚至 100 万年后才发生衰变。但对于大量氡核，可以根据其半衰期，准确预言其在某时刻未发生衰变的比例。

放射性元素衰变的速率由核本身的因素决定，与原子所处的物理状态或化学状态无关。例如，一种放射性元素，不管它以单质的形式还是以化合物的形式存在，对它加压或者增高它的温度，都不能改变其半衰期。这是因为压力、温度或与其他元素的化合等，都不会影响到原子核的结构。



实践与拓展

利用辐射检测仪（如图 5-2-5）进行以下测量：

- (1) 检测课室内外的辐射量.
- (2) 测量几种不同产地大理石的辐射量.
- (3) 测量几种不同矿石的辐射量.
- (4) 测量同一被测物与检验仪不同距离的辐射量.



图 5-2-5 辐射检测仪

“放射性” 名称的由来

1895 年，德国物理学家伦琴（W. C. Röntgen, 1845—1923）发现了 X 射线，他因此被授予首届诺贝尔物理学奖。X 射线的发现不仅对医疗影像技术产生重大影响，还直接影响了 20 世纪许多重大科学发现。今天，为了纪念伦琴的成就，X 射线也被称为伦琴射线，第 111 号化学元素𬬭（Rg）也以伦琴命名。

法国物理学家贝可勒尔原是研究荧光的专家。1896 年初，当伦琴发现 X 射线的消息传到巴黎，他决定研究荧光物质会不会辐射出一种像 X 射线一样看不见却能穿透厚纸使底片感光的射线。因此，他把铀矿物和底片包在一起，做经阳光照射和不经阳光照射的实验。结果发现，两种情况下铀矿物都可使底片感光。最终他确认这是铀元素自身发出的一种射线，只要有铀这种元素存在，就不断有这种辐射产生。贝可勒尔的发现，是人类第一次在实验室中观察到原子核的放射现象。

1897 年，居里夫妇开始从事关于贝可勒尔所发现的射线方面的研究。他们发现不仅是铀，还有钍也具有发射射线的特性，而且这种特性与元素的化学和物理状态无关，是这些元素所固有的特性。所以，居里夫人觉得有必要给这个新发现一个科学的名称，以便能充分表达其特性。居里夫人就把这种能够发出射线的特性称为放射性，而把能发出射线的元素称为放射性元素。这个能充分反映事物特性的名称，很快为世界各国科学家所公认。

1903 年，居里夫妇和贝可勒尔由于对放射性的研究而共同获得诺贝尔物理学奖。1911 年，居里夫人因发现元素钋和镭再次获得诺贝尔化学奖，因而成为世界上第一位两次获诺贝尔奖的科学家。居里夫妇对放射性现象和放射性元素方面卓有成效的研究工作，不但促进和导致了许多其他重大科学发现，还开辟了核物理和核化学研究的新领域。



练习

1. 人们认识到原子核内部有复杂的结构是从什么现象开始的？为什么？
2. 一定质量的某元素样品经过 6 小时后还剩下 $\frac{1}{8}$ 没有衰变，求它的半衰期.
3. 用于治疗肿瘤的放射源必须满足以下两个条件：
 ① 放射线具有较强的穿透力，以辐射到体内的肿瘤处；
 ② 要在较长时间内具有相对稳定的辐射强度. 根据以上条件，表 5-2-1 中给出的四种放射性元素，适合用于治疗肿瘤的是（ ）.
 A. 钍 210 B. 镉 99
 C. 钴 60 D. 锶 90
4. 分小组进行活动，模拟原子核的衰变.
 (1) 准备 50 个硬币，用它们代表核衰变的原子核.
 (2) 在一个大杯里摇晃全部硬币，然后再全部倒出，反面向上表示已经衰变，挑出放一边，清点并记录正面向上的硬币数目.
 (3) 用上一次正面向上的硬币重复步骤 2，每倒一次相当于模拟一个半衰期.
 (4) 作图显示正面向上的硬币数与半衰期之间的关系.
 (5) 收集其他同学的实验结果，并利用所有数据再作一条曲线.
 (6) 比较两条曲线，看哪一条与放射性元素衰变曲线更接近.

表 5-2-1

同位素	辐射线	半衰期
钍 210	α	138 天
锝 99	γ	6 小时
钴 60	γ	5 年
锶 90	β	28 年

第三节 | 核力与核反应方程

1919年，卢瑟福用 α 粒子轰击氮核时，发现了一种新粒子，这种粒子带有一个单位的正电荷，其质量与氢原子的质量相近。随后人们又用类似的方法从氟、钠、铝等原子核中得到了同样的粒子，人们把这种粒子命名为质子（proton），并由此断定质子是原子核的组成部分。那么原子核中除了质子以外，还会不会有其他粒子呢？

原子核的组成

如果原子核只是由质子组成，它的电荷数应该与质量数相等，而实际上绝大部分原子核的电荷数只是质量数的一半或者还少一些。因此，卢瑟福预言原子核内应该还存在着质量跟质子差不多的不带电的中性粒子，他把这种粒子称为中子（neutron）。后来他的学生查德威克（J. Chadwick, 1891—1974）在用射线轰击铍时产生了一种能量较高、贯穿能力很强的中性粒子，并证实这就是卢瑟福所预言的中子。精确的测量表明，中子的质量非常接近于质子的质量，只比后者大千分之一。质子用符号 p 表示，其质量为 $m_p = 1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ；中子用符号 n 表示，其质量为 $m_n = 1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。

发现中子以后，科学家们很快达成了共识：原子核是由中子和质子组成的，中子与质子的质量几乎相等。组成原子核的中子和质子被统称为核子（nucleon）。原子核的质量几乎等于单个核子质量的整数倍，通常用这个整数代表原子核的相对质量，称为原子核的质量数，原子核的质量数就是核内的核子数。一个质量数为 A 、电荷数为 Z 的原子核包含 Z 个质子和 $(A - Z)$ 个中子。原子核常用符号 ${}_Z^A X$ 表示，其中 X 为元素符号。

核反应方程

利用天然放射性的高速粒子或人工加速的粒子去轰击原子核，以产生新的原子核，这



图 5-3-1 查德威克

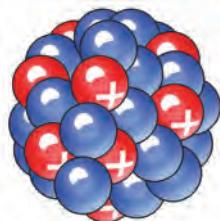


图 5-3-2 原子核示意图

个过程叫作核反应 (nuclear reaction). 在核反应过程中, 原子核的质量数和电荷数会发生变化, 同时伴随着能量的释放或吸收, 所放出或吸收的能量叫作反应能 (reaction energy), 这个过程可以用一个核反应方程来表述. 例如, 前面提到的卢瑟福用 α 粒子轰击氮核而发现了质子的核反应方程可以写为



用 α 粒子轰击铍核而发现了中子的核反应方程可以写为



大量的实验测量表明, 在核反应过程中, 方程两边总的质量数和电荷数是守恒的. 原子核在发生衰变时也具有相同的特点, 电荷数和质量数总是守恒的.

核力及四种基本相互作用

原子核内部中子不带电, 质子带正电, 按照库仑定律, 核内质子会相互排斥, 为什么它们还能稳定束缚在原子核里面呢?

组成原子核的核子之间有很强的相互作用力, 它使核子能够克服库仑斥力而紧密地结合在一起, 这种力被称为核力 (nuclear force). 实验表明, 核力是一种很强的力, 在 $0.5 \times 10^{-15} \sim 2 \times 10^{-15}$ m 的距离内主要表现为引力, 在大于 2×10^{-15} m 的距离时核力迅速减小为零, 所以核力是一种短程力. 在小于 0.5×10^{-15} m 的距离内, 核力又转变为强大的斥力而使核子不融合在一起. 核力属于强相互作用 (strong interaction), 是自然界四种基本相互作用之一.

存在于一切物体之间的万有引力 (universal gravitation) 是另一种基本相互作用, 地面上的物体所受的重力就是万有引力在地球表面附近的一种表现.

电荷之间同样存在相互作用. 同种电荷互相排斥, 异种电荷互相吸引, 两个磁体之间也存在类似的相互作用. 19 世纪后, 人们认识到电荷间、磁体间的相互作用, 其本质上是同一种相互作用的不同表现, 这种相互作用被称为电磁相互作用 (electromagnetic interaction), 它也是自然界的一种基本相互作用.

在放射现象中起作用的还有另一种基本相互作用——弱相互作用 (weak interaction). 最早观察到的弱相互作用现象是原子核的 β 衰变, 后来又观察到介子、重子和轻子通过弱作用的衰变和中微子散射等弱作用过程. 弱相互作用的力程比强相互作用更短, 为 10^{-18} m, 但强度只是强相互作用的 10^{-12} 倍.

包括爱因斯坦在内的许多物理学家认为四种基本相互作用可能是某种相互作用在不同条件下的不同表现, 就像电和磁是电磁相互作用的不同表现形式一样. 为此, 物理学家做了大量研究工作, 但至今没有得到实验的检验.

结合能

由于核子间存在着强大的核力, 要把原子核拆散成核子, 需要克服核力做功, 也就是

说需要提供一定的能量。反过来，根据能量守恒，核子结合成原子核时也会放出一定的能量。我们把这个能量叫作原子核的结合能（binding energy）。原子核的结合能很难直接测量，但是可以计算。核子结合成原子核时，反应前后存在质量亏损（mass defect），此亏损的质量与反应中释放的能量相对应，它们之间的关系遵循爱因斯坦的质能方程

$$\Delta E = \Delta m c^2 \quad (5.3.1)$$

式中 ΔE 为结合能， Δm 为质量亏损。原子核的结合能与核子数之比被称为该原子核的比结合能（specific binding energy），也叫平均结合能。它反映了一个原子核内核子相互结合的紧密程度，比结合能越大，原子核越稳定。图 5-3-3 给出了不同原子核的比结合能随质量数 A 的变化情况。

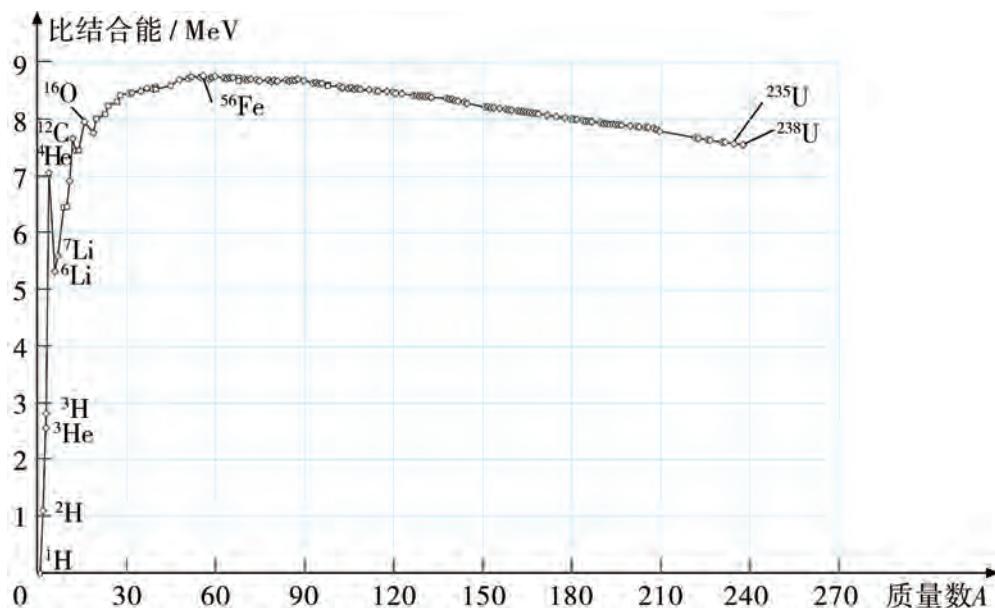


图 5-3-3 不同原子核的比结合能随质量数 A 的变化

例题：太阳不断向外辐射能量，按照爱因斯坦的质能方程，太阳的质量在不断减小，请据此估算太阳每秒质量的减少量。

分析：根据 $\Delta E = \Delta m c^2$ ，要估算质量亏损，需测量太阳每秒向外辐射的能量。测量参考方案：太阳均匀向整个空间辐射能量，地球表面只是接受很小的份额，测量地球上太阳垂直照射的每平方米截面上，每秒接收的太阳辐射能量，如计算水接收太阳辐射能量。考虑到大气层会吸收部分太阳辐射的能量，查阅资料可知，大气层会吸收 55% 的太阳能。由此可估算出太阳每秒质量的减少量。

解：以水为研究对象，设横截面积 $S = 3\text{dm}^2$ 的圆筒内装有质量 $m = 0.6\text{ kg}$ 的水，若被太阳光垂直照射 2 min，测得水的温度升高了 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 。由此可得，水吸收的热量

$$Q = cm\Delta t = 4.2 \times 10^3 \times 0.6 \times 1 \text{ J} = 2.52 \times 10^3 \text{ J.}$$

在阳光直射下，地球表面每平方米每秒获得的能量为

$$E = \frac{Q}{St} = \frac{2.52 \times 10^3}{3 \times 10^{-2} \times 2 \times 60} \text{ J} = 700 \text{ J.}$$

由于大气层会吸收 55% 的太阳能，则每平方米每秒射到大气层的太阳能为

$$E_0 = \frac{E}{45\%} = 1.56 \times 10^3 \text{ J.}$$

太阳辐射的能量均匀分布在以太阳为球心、日地距离为半径的球面上，查资料可知日地距离 $r = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ ，

则太阳每秒辐射的总能量

$$E_{\text{总}} = 4\pi r^2 E_0 = 4 \times 10^{26} \text{ J.}$$

根据 $\Delta E = \Delta mc^2$ ，

太阳每秒减少的质量

$$\Delta m = 4 \times 10^9 \text{ kg.}$$

这个数量级看上去非常巨大，但与太阳质量 10^{30} kg 的数量级相比，是微不足道的。



实践与拓展

查阅资料，了解华人科学家在粒子物理领域中所做出的杰出贡献。

中子的发现

资料活页

1932 年 1 月，法国科学家约里奥-居里夫妇（F. Joliot-Curie，1900—1958 和 I. Joliot-Curie，1897—1956）发现在来自钋源的 α 粒子的轰击下，铍会放射出很强的不带电的粒子，他们认为这种中性粒子是能量很高的光子。当他们的实验结果公布以后，卢瑟福的学生查德威克立即在剑桥的卡文迪许实验室重复了同样的实验，通过动量守恒与能量守恒分析出该中性粒子质量近似等于质子的质量，紧接着又测定了它的质量。此时，他意识到他的老师卢瑟福在 1920 年预言的中子终于被发现了。查德威克于 1932 年 2 月 17 日在《自然》杂志上发表了这一结果。中子的发现，不仅使卢瑟福的原子核式模型结构近于完美，而且还使人们得到了一种不带电的“子弹”以代替 α 粒子，为原子的人工蜕变实验开辟了广阔的道路，并且打开了核能实际应用的大门。查德威克因此荣获了 1935 年诺贝尔物理学奖。而最早发现这一实验现象的约里奥-居里夫妇，虽然为这一实验拍摄了上万张胶片，付出了很多的心血，但还是与中子失之交臂。其原因是他们没有关注到卢瑟福关于存在中子的预言。不过事后约里奥-居里夫妇说：“大多数物理学家，包括我自己在内，都没有注意到这个预言，但是它一直存在于查德威克工作的卡文迪许实验室的空气里。因此在那里发现中子是合情合理的，同时也是公道的。”这也反映出约里奥-居里夫妇宽广的胸怀和高尚的品质。



练习

1. 碳 14 衰变成为氮 14 的过程，会放出哪种射线？请写出相应的衰变方程。
2. 钷 209 是常用的 α 射线源，查一查元素周期表，它经过 α 衰变后会变成什么元素？并写出相应的衰变方程。
3. 已知 ${}_{\frac{1}{8}}^{\frac{16}{8}}\text{O}$ 的核子比结合能是 7.98 MeV, ${}_{\frac{2}{1}}^{\frac{4}{2}}\text{He}$ 的核子比结合能是 7.07 MeV. 如果要把 ${}_{\frac{1}{8}}^{\frac{16}{8}}\text{O}$ 分成 8 个质子和 8 个中子，需提供多少能量？要把它分成 4 个 ${}_{\frac{2}{1}}^{\frac{4}{2}}\text{He}$ ，需提供多少能量？
4. 在研究微观粒子时，为方便表示，人们将碳 12 原子质量的十二分之一记为原子质量单位 u，即 $1 \text{ u} = 1.660\ 565\ 5 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，试用 $\Delta E = \Delta mc^2$ 证明：质量亏损 1 u 相当于释放 931.5 MeV 的能量。
5. 关于“原子核组成”的研究经历了一些重要阶段，其中：
 - (1) 1919 年，卢瑟福用 α 粒子轰击氮核从而发现了质子，其核反应方程为 _____.
 - (2) 1932 年，查德威克用一种中性粒子流轰击氢原子和氮原子，打出了一些氢核（质子）和氮核，其测量出被打出的氢核和氮核的速度，并由此推算出这种粒子的质量而发现了中子。

查德威克认为，原子核的热运动速度远小于中性粒子的速度而可以忽略不计；被碰出的氢核、氮核之所以会具有不同的速率是由于碰撞的情况不同而造成的，其中速率最大的应该是弹性正碰的结果。实验中测得被碰氢核的最大速度为 $v_{\text{H}} = 3.30 \times 10^7 \text{ m/s}$ ，被碰氮核的最大速度为 $v_{\text{N}} = 4.50 \times 10^6 \text{ m/s}$ ，其中已知 $m_{\text{N}} = 14m_{\text{H}}$ 。

请根据查德威克的实验数据，推导出中性粒子（中子）的质量 m 与氢核的质量 m_{H} 的关系。（结果保留三位有效数字）

第四节

放射性同位素



不同元素的原子，其原子核的质子数不同，核外电子的数目和分布情况也不同，因此元素的化学性质不同。同种元素的原子，因为其质子数相同，核外电子数相同，所以有相同的化学性质，但是它们的中子数可以不同。这些具有相同质子数而中子数不同的原子，在元素周期表中处于同一位置，因而互称同位素（isotope）。通常说的氕（ ${}^1_1\text{H}$ ）、氘（ ${}^2_1\text{H}$ ）和氚（ ${}^3_1\text{H}$ ）就是氢的一组同位素。

放射性同位素的发现

1934年，约里奥-居里夫妇在用 α 粒子轰击铝箔时，除探测到预料中的中子外，还探测到了正电子。让约里奥-居里夫妇感到意外的是，拿走 α 粒子放射源以后，铝箔虽不再发射中子，但仍继续发射正电子，而且这种放射性随时间衰减的规律跟天然放射性一样，也有一定的半衰期。

原来，铝核被 α 粒子击中后发生了以下反应



反应生成物 ${}^{30}_{15}\text{P}$ 是磷的一种同位素，它有放射性，像天然放射性元素一样发生衰变，衰变时放出正电子和中微子。我们用符号 ${}^0_1\text{e}$ 表示正电子，用 ν 表示中微子，于是 ${}^{30}_{15}\text{P}$ 的衰变反应可写为

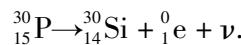


图 5-4-1 约里奥-居里夫妇

这种具有放射性的同位素，叫作放射性同位素（radioactive isotope）。用人工方法得到放射性同位素，这是一个很重要的发现。后来用质子、氘核、中子和 γ 光子轰击原子核，又得到了多种人工放射性同位素。天然放射性同位素只有六十几种，而今天人工制造的放射性同位素已达上千种。放射性同位素在地质、冶金、石油工业、农业、医学、考古等领域得到了广泛的应用。

放射性同位素的应用

放射性同位素的应用主要分为射线的应用、示踪原子的应用和半衰期的应用三类。

射线的应用

放射性辐射对物体会产生各种作用，可用来达到不同的目的。例如工业上利用 γ 射线的穿透性来检查金属内部的缺陷，即所谓的无损 γ 射线探伤，其示意图如图5-4-2所示。钢板中的空洞导致 γ 射线透射增强。

在化纤、纺织等工业生产中，由于摩擦、分离等原因，织物和纤维上常聚集有害的静电。将放射源放在容易产生静电的地方，放射性物质放出的 α 射线、 β 射线可以使空气分子电离变成导电气体，从而把聚集的静电引入地下。

在农业上，利用射线可以防治害虫和培育良种。在医疗上，利用射线可以治疗疾病和消毒灭菌。

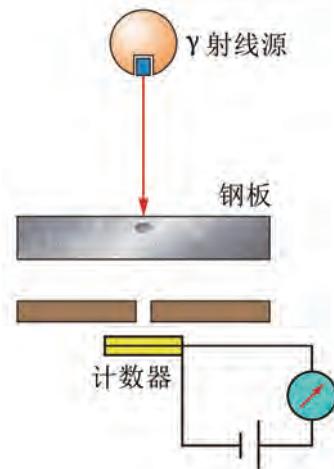


图5-4-2 γ 射线探伤示意图

示踪原子的应用

由于放射性元素能放出某种射线，因此可用探测仪器对它们进行踪迹显示。这种用途的放射性同位素叫作示踪原子。

农业上可利用磷32来研究作物对磷肥的吸收情况，从而改进施肥方法；工业上可利用放射性同位素来检测机件的磨损情况，以便及时更换机件；半导体制造工艺中可利用示踪原子探测杂质在半导体内的扩散情况，以便控制掺杂过程；医学上可利用示踪原子来提供生物机体内生理生化过程的动态信息，反映组织器官的整体或局部功能，作无损伤的疾病诊断等。

半衰期的应用

在地质和考古工作中，可利用放射性衰变的半衰期来推断地层或古代文物的年代。例如，已知铀系的最终产物是铅206，便可根据目前岩石中铀238和铅206的含量比，由铀的半衰期估算该地层的年龄；利用生物残骸中同位素碳14与碳12的含量比可推断出生物死亡的年代等。



讨论与交流

1. 某公司制造塑料培养皿，用来在实验室里培养细菌。因此，必须保证培养皿是无菌的。由于培养皿为塑料材质，不能加热杀菌。那么，可以用什么方法进行无菌处理呢？

2. 在建造石油钻井平台时，很关键的一个环节是海底混凝土不能有缺陷或空气泡，否则平台可能会在暴风雨中被摧毁。应该如何对这个关键环节进行检查？

射线的危害及防护

尽管射线有着广泛的用途，但它对人体组织却会造成伤害，随着放射性同位素及射线装置在工农业、医疗、科研等各个领域的广泛应用，射线造成危害的可能性也在增大。在使用放射性同位素时必须注意安全。

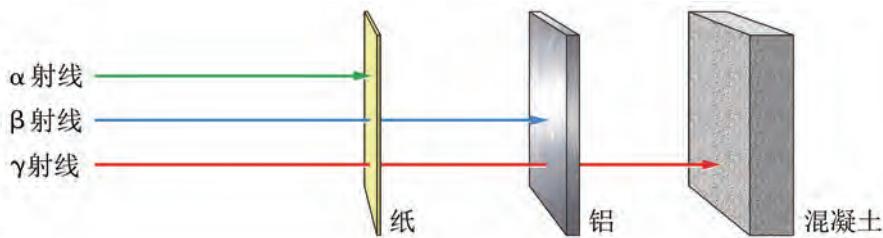


图 5-4-3 三种射线的穿透能力

α 射线电离作用最强，而穿透能力最弱，用一张厚纸就可以把它挡住； β 射线的电离作用较弱，穿透能力较强，很容易穿透纸张，一定厚度的铝板可以把它挡住； γ 射线电离作用最弱，有着极强的穿透力，甚至能穿透几厘米厚的铝板，需要用铅板或混凝土才能挡住（如图 5-4-3 所示）。除这三种射线外，常见的射线还有 X 射线和中子射线，这些射线对物体具有不同的穿透能力和电离能力，从而使物体或机体发生一些物理、化学或生化变化。如果人体长时间受到大剂量的射线照射，就会使细胞、组织、器官受到损伤，破坏人体 DNA 分子结构，有时甚至会引发癌变，或者造成下一代遗传上的缺陷；过度照射时，人常常会出现头痛、四肢无力、贫血等多种症状，重者甚至死亡。



讨论与交流

在医院放射科常会见到如图 5-4-4 所示的辐射标志，请查阅资料，了解技术人员进行辐射防护的措施，以及这些防护措施的原理。



图 5-4-4 辐射标志

放射性防护可分成内照射防护和外照射防护，内照射与外照射的显著差别是，即使不再进行放射性物质的操作，已经进入体内的放射性同位素仍然在体内产生有害影响。造成内照射的原因，通常是因为吸入被放射性物质污染的空气，饮用被放射性物质污染的水，吃了被放射性物质污染的食物，或者放射性物质从皮肤、伤口进入体内。内照射防护的基本原则是尽可能地隔断放射性物质进入人体的各种途径。通常采取的措施是把可能成为污染源的放射性物质放在密闭的手套箱或其他密闭容器中进行操作，使它与工作场所的空气隔绝；严禁工作人员用可能被污染的手接触食物、衣服或其他生活用具等。

外照射的特点是只有当机体处于辐射场中时，才会引起辐射损伤，当机体离开辐射场后，就不再受照射。外照射防护通常采用下列三种方式防护。

缩短受照射时间

受照射的累积剂量与受照射时间成正比。在一切接受电离辐射的操作中，应以尽量缩短受照射时间为原则。例如，在用X射线进行胸部透视时，病人所受照射剂量随检查时间而增加，医生应当在查清病灶的情况下，尽量缩短透视时间。对于工作时间较长的强放射性操作，可以采取限制个人操作时间、更换操作人员等措施，以减少每人所受的照射剂量。

增大与辐射源间的距离

增大操作人员与辐射源间的距离，可以降低其受照射的剂量。对于点状放射源，人体受照剂量率与距离的平方成反比。在实际操作中常使用远距离操作的工具，如长柄钳、机械手、远距离自动控制装置等，以降低剂量率。

屏蔽射线

屏蔽物有固定式，如防护墙、地板、天花板、防护门和观察窗等；移动式的有包装容器、各种结构的手套箱、防护屏和铅砖等。屏蔽材料要根据不同的辐射来选取， γ 射线和X射线的常用屏蔽材料有水、土壤、岩石、铁矿石、混凝土、铁、铅、铅玻璃、钨等。 β 射线能引起组织表层的辐射损伤，还能产生轫致辐射，所以对 β 射线的防护应采用两层屏蔽。第一层用低原子序数的材料屏蔽 β 射线，可减少轫致辐射，常用材料有烯基塑料、有机玻璃和铝等；第二层用高原子序数材料屏蔽辐射，常用生铁、钢板和铅板等。



实践与拓展

请根据所学射线的知识，解释时间防护、距离防护和屏蔽防护的原理和方法。查阅更多辐射防护措施，写一份学习报告。

放射性同位素的应用举例

1. 轧钢机钢板厚度自控原理

利用射线的贯穿本领跟物体的厚度及密度的关系，可以用放射性同位素来检查各种产品的厚度、密封容器中的液面高度，从而自动控制生产过程。如图5-4-5所示是轧钢机上钢板厚度自动控制装置原理图。

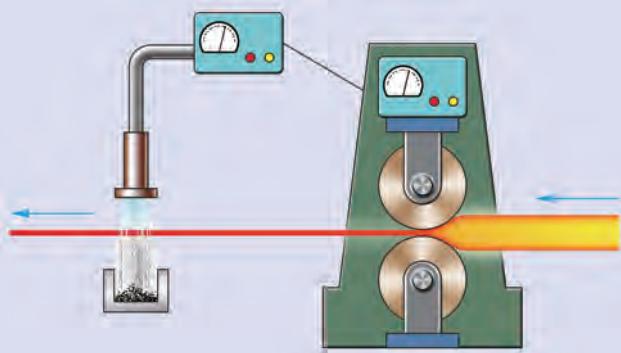


图5-4-5 钢板厚度自动控制装置原理图

让射线穿过钢板射到探测器上，钢板的厚度发生变化时，透过钢板的射线强度也随之变化，探测器把它转变为电信号输入到厚度指示装置和厚度控制装置，于是厚度指示装置就显示出厚度的变化，同时厚度控制装置自动地调整轧钢机上两轧辊的距离，使钢板的厚度恢复正常，从而保证钢板的厚度不超出允许误差的范围。

2. 利用射线的生物效应

农业上利用各种射线照射植物（棉花、白菜、萝卜等）的种子、植株或某些器官和组织，促使它们产生变异，再从中选择需要的可遗传优良变异，培育成新的优良品种。



图 5-4-6 辐射培育的“鲁棉一号”



图 5-4-7 辐射培育的小麦新品种

3. 利用射线杀菌消毒

在医疗上，射线可以抑制或杀死癌细胞，因此，人们常利用钴 60 的 γ 射线来治疗肺癌、食道癌等。射线还可以用于医疗器械的消毒灭菌，处理医院排出的污水，杀死各种病原体，保护环境卫生等。



图 5-4-8 钴 60 全身肿瘤放射治疗机



图 5-4-9 伽玛辐射仪

4. 示踪原子技术的应用

示踪原子的应用是多方面的。在内燃机工作时，活塞上的活塞环由于摩擦而磨损，如果使用带有放射性同位素铁 59 的活塞环，这时具有放射性的铁 59 被磨掉而混入润滑油中，测出润滑油中的放射性就可以了解活塞环的磨损情况，而不必拆开内燃机去检查。

在生物科学的研究方面，同位素示踪技术也起着十分重要的作用。我国科学家在国际上首先用人工方法合成了结晶牛胰岛素，这是我国科学战线上的一项重大成就。在这项工作中需要证明人工合成的牛胰岛素结晶和天然的牛胰岛素结晶是同一种物质。因此，在合成过程中掺入放射性碳¹⁴作示踪原子，然后把用碳¹⁴标记的人工合成的牛胰岛素与天然牛胰岛素混合到一起，经过多次重新结晶后，得到了放射性碳¹⁴分布均匀的牛胰岛素结晶，这就证明了人工合成的牛胰岛素与天然牛胰岛素完全融为一体，它们是同一种物质，从而为我国在国际上首先成功人工合成牛胰岛素提供了有力的证据。

练习

1. 氢的三种同位素的核中分别含有0、1、2个中子，请分别写出它们的符号。
2. 考虑以下两对核： ${}_{6}^{12}\text{C}$ 和 ${}_{6}^{13}\text{C}$, ${}_{5}^{11}\text{B}$ 和 ${}_{6}^{11}\text{C}$ 。它们在哪一方面是相似的？在哪一方面不同？
3. 很多人都听过“点石成金”的故事，现在科学家在实验室里，用中子轰击的方法可以得到金。只是用这种方式制造金的费用高昂，只能在实验室里进行。请据此完成方程式： ${}_{0}^{1}\text{n} + (\quad) \rightarrow {}_{79}^{197}\text{Au} + {}_{1}^{2}\text{H}$ 。
4. 用中子轰击氮¹⁴，会产生碳¹⁴，碳¹⁴具有β放射性，它放出一个β粒子后，会衰变成什么？请写出这两个核反应方程。
5. 约里奥-居里夫妇因发现人工放射性而获得了1935年的诺贝尔化学奖，他们发现的放射性元素 ${}_{15}^{30}\text{P}$ 衰变成 ${}_{14}^{30}\text{Si}$ 的同时会放出另一种粒子，这种粒子是_____。 ${}_{15}^{32}\text{P}$ 是 ${}_{15}^{30}\text{P}$ 的同位素，被广泛应用于生物示踪技术。1 mg ${}_{15}^{32}\text{P}$ 随时间衰变的关系如图5-4-10所示，估算4 mg ${}_{15}^{32}\text{P}$ 经多少天的衰变会剩下0.25 mg。

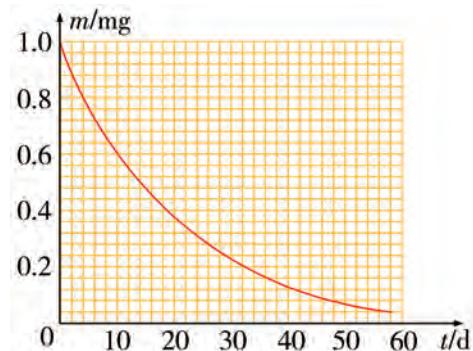


图 5-4-10

第五节

裂变和聚变



原子核中蕴藏着巨大的能量，那么，怎样才能让这些能量有效释放出来从而造福人类呢？

原子核中的质子数又称为原子序数（atomic number），这是因为它与元素周期表中元素的排列序号一致。很多排在周期表前面的轻核，其质子和中子数相等（ $N = Z$ ），例如，氦4的原子核有2个质子和2个中子，硅28各有14个质子和中子。但是大多数重核是中子多于质子，例如，金197有79个质子和118个中子，铀238有92个质子和146个中子。排在第83号元素铋之后的原子核不稳定，它们会自发裂变或衰变成更轻的原子核。排在第92号元素铀之后的原子核十分不稳定，很难在自然状态下存在。如第94号元素钚是人工制造出来的，主要用于核武器，目前在自然界中尚未找到。

核裂变与链式反应

由原子核的比结合能随质量数的变化曲线可知，原子核的比结合能在中等质量（ $A = 56$ ，Fe元素）附近有极大值。这意味着重核分裂成较轻的核时，会释放出能量，我们把这种核反应叫作核裂变（nuclear fission）。同样地，轻核聚合成较重的核时，也会释放出能量，我们把这种核反应叫作核聚变（nuclear fusion）。



讨论与交流

比结合能小的重核裂变为两个较轻的原子核，为什么质量会发生亏损而释放能量？

一个原子核裂变所产生的能量，与日常生活的耗能相比是微不足道的。但由于物质所含的核子数目是十分巨大的，其单位质量所放出的能量也就十分惊人。为了使裂变产生的能量可以被利用，必须让一个原子核的裂变引发其他原子核发生裂变，让核裂变过程自己持续下去，源源不断地将核能释放出来（如图5-5-1所示）。这样的核反应叫作链式反应（chain reaction）。

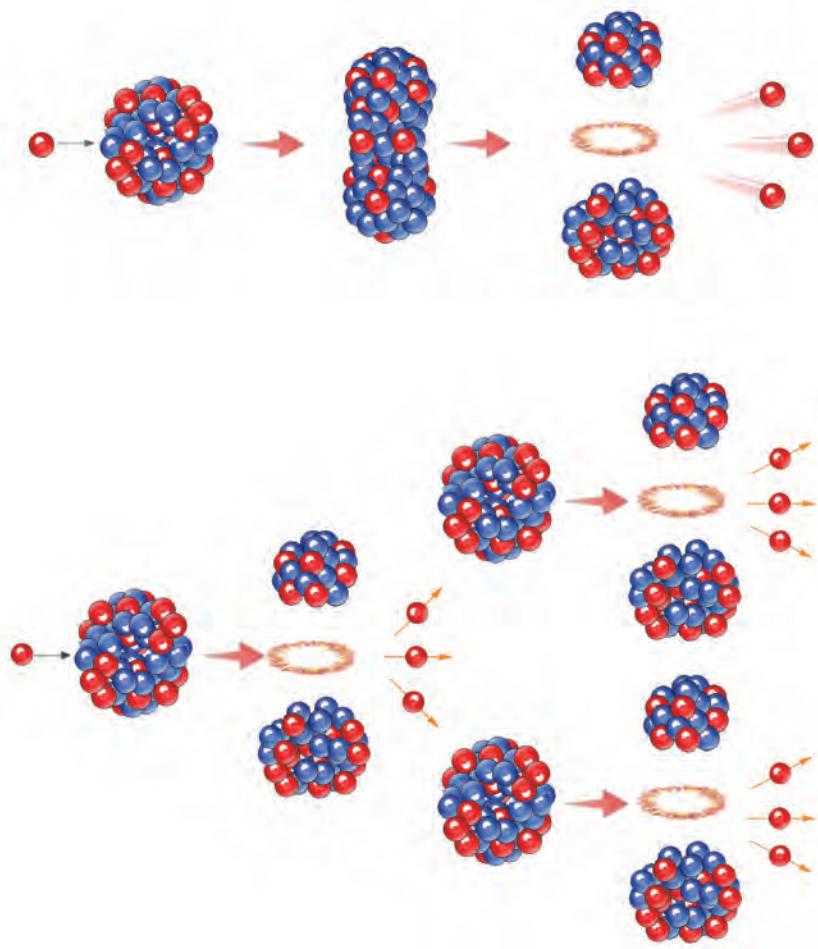


图 5-5-1 核裂变及链式反应示意图

重核裂变的一个典型例子是铀核裂变，其反应方程如下：



铀核裂变时，同时放出 2~3 个中子，有时甚至可以放出更多的中子。如果这些中子再引起其他铀 235 发生核裂变，就可使裂变反应不断地进行下去，形成链式反应。

在天然铀中，主要有两种同位素，其中 99.3% 是铀 238，0.7% 是铀 235。这两种铀跟中子的作用很不相同。铀 235 俘获各种能量的中子时都可能发生裂变。铀 238 只有俘获能量大于 1 MeV 的中子才可能发生裂变。能量低于 1 MeV 的中子跟铀 238 基本上只发生弹性碰撞，不引起核反应。因此，为了使裂变的链式反应容易发生，最好是利用高浓度铀 235。

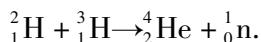
铀块的体积对于产生链式反应也是一个重要因素。因为原子核非常小，如果铀块的体积不够大，中子从铀块中通过时，可能还没有碰到铀核就跑到铀块外面去了。能够发生链式反应的铀块最小体积叫作它的临界体积。如果铀 235 的体积超过了它的临界体积，当有中子进入铀块，就可以引起铀核的链式反应，在极短时间内就会释放出大量的核能，发生猛烈的爆炸，原子弹就是根据这个原理制成的。



图 5-5-2 铀矿

核聚变及受控热核反应

两个轻核结合成质量较大的核，会发生核聚变，核聚变后比结合能增加，释放出大量的能量。例如，一个氘核与一个氚核结合成一个氦核（同时放出一个中子）的核反应方程为



该过程约释放出 17.6 MeV 的结合能。聚变时每个核子平均释放的结合能要比重核裂变时每个核子平均释放的结合能大 3~4 倍。

要使原子核发生聚变，必须使它们接近到 10^{-15} m，也就是接近到核力能够发生作用的范围。由于原子核都是带正电的，要使它们接近到这种程度，必须克服电荷之间强大的静电斥力。这就要把它们加热到很高的温度，使原子核具有很大的动能。理论上，物质达到几百万摄氏度以上的高温时，小部分原子核就具有足够的动能，能够克服相互间的库仑斥力，在互相碰撞中接近到可以发生聚变的程度。因此，核聚变又叫作热核反应（thermonuclear reaction）。

热核反应在宇宙中是很普遍的现象。在太阳和许多恒星内部，温度都高达 1000 万摄氏度以上，在那里热核反应激烈地进行着。太阳每秒辐射出来的能量约为 3.8×10^{26} J，这都是通过热核反应产生的。地球接受了其中的二十亿分之一，孕育出了丰富多彩的生命。

人工的热核反应可以通过原子弹爆炸时产生的高温来达到，氢弹就是这样制成的。如果热核反应所释放的巨大能量不是以爆炸的形式释放，而是在人工控制下逐渐地释放出来并加以利用（例如发电），这被称为受控热核反应。目前，受控热核反应是一项正在研究的尖端课题，其应用前景十分诱人，可彻底解决人类未来的能源问题，因此受到各国的高度重视。

核能利用

目前，人类主要是开发利用核裂变，还无法有效控制利用核聚变。

原子弹爆炸时链式反应的速度是不加控制的，为了人工控制链式反应的速度，使核能平缓地释放出来，人们制成了核反应堆。如图 5-5-3 所示是热中子反应堆示意图。

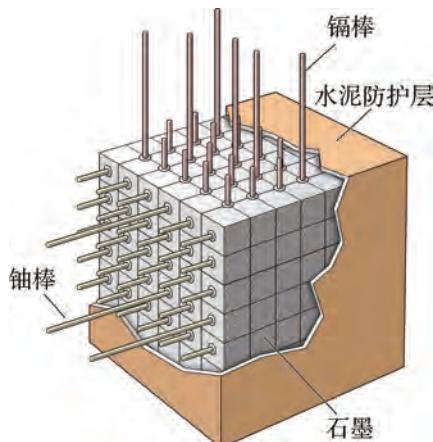


图 5-5-3 热中子反应堆示意图



图 5-5-4 核反应堆

热中子反应堆用的铀棒是天然铀或浓缩铀（其中铀 235 的含量约为 3%）。由于裂变产生的是速度很大的快中子，很容易被铀 238 捕获而不发生裂变，所以必须设法使中子在碰上铀 238 前降低速度。为此在铀棒的周围放上原子量比较小又不吸收或很少吸收中子的物体，如石墨、重水，快中子跟这些物体的原子核碰撞后，能量减小，变成慢中子，或称热中子。这种用来使中子减速的物体叫作慢化剂。慢中子碰到铀 238 时会弹射回来，却容易被铀 235 捕获而引起裂变。为了调节中子数目以控制反应速度，还需要在铀棒之间插进一些镉棒。镉吸收中子的能力很强，当反应过于激烈时，将镉棒插入深一些，让它多吸收一些中子，链式反应的速度就会慢一些；当反应过于缓慢，达不到所需功率时，将镉棒插入浅一些，让它少吸收一些中子，链式反应速度就会增大。这种镉棒被称为控制棒。用电子仪器自动地调节控制棒，就能使反应堆保持一定的功率输出而安全地运行。

核反应堆工作时，核燃料裂变释放出的核能转变为热能，使反应堆的温度升高。水、液态钠等流体在反应堆内外循环流动，不断地带走热能，输出的热能可用于发电。为了防止铀核裂变物放出的各种射线对人体产生危害，在核反应堆的外面需要修建很厚的水泥防护层，用来屏蔽射线，不让它们透射出来。对放射性的废料，也要装入特制的容器中，埋入深地层来处理。



图 5-5-5 采用第三代核电技术的台山核电站

利用核反应堆工作时释放出的热能，可以使水汽化以推动汽轮发电机发电，这就是核电站。核电站消耗的“燃料”很少，一座百万千瓦的核电站，每年只消耗 30 吨左右浓缩铀，而同样功率的火力发电站，每年却要消耗 250 万吨煤。目前，核能发电的经济效益跟火电站大体相同。为了适应我国现代化建设对能源日益增长的需要，我国已于沿海地区建成投产多座核电站。

另外，把核反应堆小型化，可以用于核动力潜艇、核动力破冰船和核动力航空母舰

等。核反应堆不仅可以提供强大的核能，而且它产生的大量中子还可以用来进行各种原子核物理实验，制造各种放射性同位素。



图 5-5-6 核动力潜艇

例题：2017 年 5 月 25 日，“华龙一号”全球首堆示范工程——福清核电 5 号机组顺利完成穹顶吊装，工程正式由土建阶段进入安装阶段。在核电站中，核反应堆释放的核能转化为电能，核反应堆的工作原理是利用中子轰击重核轴发生裂变反应，释放出大量核能。已知一个 $^{235}_{92}\text{U}$ 核裂变时能释放 200 MeV 的能量，燃烧 1 kg 煤所放出的能量为 $2.94 \times 10^7 \text{ J}$ 。请从数量级上感受铀完全裂变释放的能量与燃烧煤释放的能量的差异。

分析：可以分别选取 1 kg 的 $^{235}_{92}\text{U}$ 和煤，比较 1 kg $^{235}_{92}\text{U}$ 完全裂变和 1 kg 煤完全燃烧所释放的能量。

解：1 kg $^{235}_{92}\text{U}$ 含有的原子数目

$$N = \frac{M}{m_{\text{mol}}} N_A = \frac{1}{0.235} \times 6.02 \times 10^{23} = 2.6 \times 10^{24}.$$

而 200 MeV 相当于 $3.2 \times 10^{-11} \text{ J}$ ，

则 1 kg 铀完全裂变释放能量

$$E_1 = 8.3 \times 10^{13} \text{ J}，$$

所释放的能量相当于完全燃烧的煤的质量

$$m_{\text{煤}} = \frac{E_1}{q} = 2.8 \times 10^6 \text{ kg} = 2800 \text{ t}.$$



实践与拓展

核电已成为我国高科技和高端制造业走向世界的一张“国家名片”。查阅资料，了解我国核电的发展情况，试画图展现我国核电站的发展历程。

粒子物理学简介

粒子物理学是研究比原子核更深层次的微观世界中物质的结构和性质，以及在很高能量下这些物质相互转化及其产生原因和规律的物理学分支，又称高能物理学。现在发现的基本粒子已达几百种。按照基本粒子之间的相互作用，可以把它们分为强子、轻子和传播子三类。

核子间的相互作用是由强相互作用引起的。凡是参与强相互作用的粒子都叫作强子。目前发现的基本粒子，绝大部分是强子，质子是最早发现的强子。强子又分重子（如中子、质子、超子等）和介子两类。

轻子是不参与强相互作用的粒子，目前只发现了6种。电子是最早发现的轻子，之后又陆续发现了电子中微子、 μ 子和 μ 子中微子、 τ 子和 τ 子中微子。其中 τ 子的质量比核子的质量还大，因此也叫作重轻子。现代实验还没有发现轻子的内部结构。

传播子是传递各种相互作用的粒子，如光子、中间玻色子、胶子。光子传递电磁相互作用，中间玻色子传递弱相互作用，胶子传递强相互作用。

粒子物理学的发展大致经历了以下三个阶段。

第一阶段（1897—1936）：1897年，人们发现第一个基本粒子——电子。随后，质子、中子、光子、中微子和正电子等都被认为是基本粒子或亚原子粒子。在此阶段，随着原子核物理的发展，发现在相当于原子核大小的范围内，还存在比电磁作用更强的强相互作用，以及介于电磁作用和引力作用之间的弱相互作用。

第二阶段（1937—1963）：在此阶段先后陆续发现了众多的粒子。1937年发现 μ 子，1947年发现 π^- 、 π^+ 和奇异粒子，1950年发现 π^0 介子。20世纪50年代，随着直线加速器、同步加速器和粒子探测器等科学大型仪器的发展，开始了用加速器研究并大量发现基本粒子的新时期。这一阶段理论上最重要的进展之一是相互作用中对称性的研究。其中，1956年李政道、杨振宁提出的弱作用下宇称不守恒，1957年被吴健雄等人的实验所证实。为此，李政道和杨振宁获得了1957年的诺贝尔物理学奖。



图5-5-7 李政道（左）和杨振宁（右）



图5-5-8 吴健雄

第三阶段（1964年至今）：此阶段以提出强子结构的夸克模型为标志。强子由夸克构成，夸克共有上夸克、下夸克、奇异夸克、粲夸克、底夸克和顶夸克6种。其中，丁肇中于1974年发现了一种新粒子——J/ψ粒子，从而证明了粲夸克的存在，丁肇中因此获得1976年的诺贝尔物理学奖。夸克模型经过几十年的发展，已经被多数物理学家所接受。到目前为止，人们已经从实验中发现了所有6种夸克及其反夸克存在的证据。这一阶段理论上最重要的进展是建立电弱统一理论和研究强相互作用的量子色动力学。

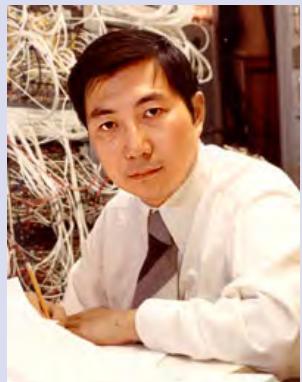


图5-5-9 丁肇中

在粒子物理学的深层次探索活动中，粒子加速器、探测手段、数据记录和处理方法以及计算机技术的不断发展，不仅促进了粒子物理的不断发展，也促进了整个科学技术的发展。粒子物理所取得的丰硕成果已经在宇宙演化的研究中起着重要作用。

练习

1. 核反应堆中是靠熔化的钠来传递核燃烧产生的热量的，而抽动液态钠的“泵”传动部分又不允许和钠接触，因此常使用一种称为“电磁泵”的装置。这种泵的结构如图5-5-10所示，N、S为磁铁的两极，C为在磁场中的耐热导管，熔融的钠从其中流过。

(1) 要使钠液向图中所标方向加速流动，加在导管中钠液的电流方向应如何？

(2) 查阅资料，了解核反应堆的热交换系统。

2. 水（包括海水）是未来的“煤炭”，能从根本上解决人类的能源问题。请查阅资料，了解可控热核反应，写一篇科技小论文。

3. 已知铀核的质量为235.0439 u，中子质量为1.0087 u，锶(Sr)核的质量为89.9077 u，氙(Xe)核的质量为135.9072 u， $1\text{ u} = 1.66 \times 10^{-27}\text{ kg}$ ，浓缩铀中铀235的含量为2%，则一座100万千瓦的核电站，每年需要消耗多少吨浓缩铀？

4. 为了防止铀核裂变产物放出的各种射线对人体的危害和对环境的污染，需采取哪些措施？

5. 目前普遍认为，质子和中子都是由u夸克和d夸克组成。其中u夸克的带电量为 $\frac{2}{3}e$ ，d夸克的带电量为 $-\frac{1}{3}e$ ，e为元电荷。请据此推断质子和中子的组成情况。

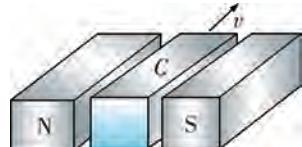
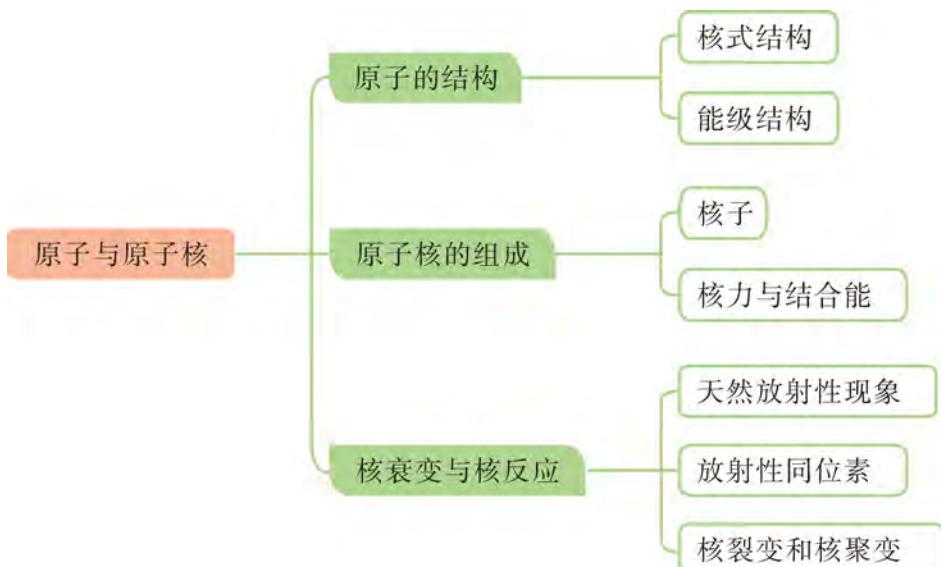


图5-5-10

本章小结

知识结构

参考下面的知识结构，请进一步梳理本章的知识。



回顾与评价

1. 你认为原子结构的模型反映的是原子内部的实际结构吗？为什么？
2. 通过原子核内容的学习，你对物质世界有了什么样的认识？
3. 通过人类对物质结构的探索历程，谈谈质疑与实证检验对科技发展的作用。

习题五

1. 氢原子的能级示意图如图 5 - 1 所示，氢原子由 $n = 1$ 的状态激发到 $n = 4$ 的状态，在它回到 $n = 1$ 的状态的过程中，以下说法正确的有（ ）.

- A. 可能激发的能量不同的光子只有 3 种
- B. 可能发出 6 种不同频率的光子
- C. 可能发出的光子的最大能量为 12.75 eV
- D. 可能发出的光子的最小能量为 0.85 eV

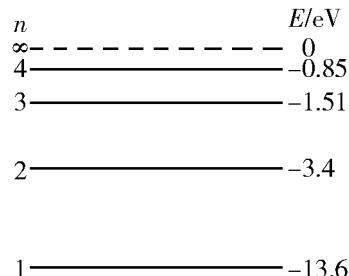
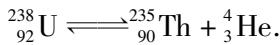


图 5 - 1

2. 长核 ($^{226}_{86}\text{Ra}$) 经过一系列 α 衰变和 β 衰变，变成铅核 ($^{206}_{82}\text{Pb}$)，则其中经过 α 衰变的次数是 _____，长核 ($^{226}_{86}\text{Ra}$) 衰变成铅核 ($^{206}_{82}\text{Pb}$) 的过程中损失了 _____ 个中子.

3. 查阅相关资料或是使用阴极射线管探索阴极射线还具有哪些特征，这些特征反映了电子的哪些本质.

4. 某同学查阅资料知道，铀 238 衰变后变成钍 235，他书写的 $^{238}_{92}\text{U}$ 的衰变反应方程为



- (1) 指出其中可能存在的几处错误，并说明原因.
- (2) 请写出正确的核反应方程.

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

6. 放射性物质衰变速率，即每秒衰变的原子核数，叫作放射性强度. 在过去很长一段时间，夜光手表利用氚 (^3_1H) 来产生荧光. 如果荧光的强度与放射性强度成正比，那么当手表使用 5 年后，与最初的亮度相比，将有什么变化？(已知氚的半衰期大约为 12 年)

7. 天文学家测得银河系中氦的含量约为 25%. 有关研究表明，宇宙中氦生成的途径有两条：一是在宇宙诞生后 2 分钟左右生成的；二是在宇宙演化到恒星诞生后，由恒星内部的氢核聚变反应生成的.

(1) 若把氢核聚变反应简化为 4 个氢核 (^1_1H) 聚变成氦核 (^4_2He)，同时放出 2 个正电子 (^0_1e) 和 2 个中微子 (ν)，请写出该氢核聚变反应的方程，并计算该氢核聚变反应释放的能量.

(2) 研究表明，银河系的年龄约为 $t = 3.8 \times 10^{17}$ s，每秒银河系产生的能量约为

1×10^{37} J (即 $P = 1 \times 10^{37}$ J/s). 现假定该能量全部来自上述氢核聚变反应, 试估算银河系中氦的含量. (结果保留一位有效数字)

(3) 根据估算结果, 对银河系中氦的主要生成途径作出判断.

(可能用到的数据: 银河系质量约为 $M = 3 \times 10^{41}$ kg, 原子质量单位 $1u = 1.66 \times 10^{-27}$ kg, $1u$ 相当于 1.5×10^{-10} J 的能量, 电子质量 $m = 0.0005$ u, 氦核质量 $m_\alpha = 4.0026$ u, 氢核质量 $m_p = 1.0078$ u, 中微子 ν 的质量为零.)

8. 人类认识原子结构和开发利用原子能经历了十分曲折的过程. 请按要求回答下列问题.

(1) 卢瑟福、玻尔、查德威克等科学家在原子结构或原子核的研究方面作出了卓越的贡献. 请选择其中的两位, 指出他们的主要成就.

(2) 在贝可勒尔发现天然放射现象后, 人们对放射线的性质进行了深入研究, 图 5-2 为三种射线在同一磁场中的运动轨迹, 请分别写出它的名称和相关用途.

(3) 在热中子反应堆中需要给快中子减速, 轻水、重水和石墨等常用作慢化剂. 中子在重水中可与 2H 核碰撞减速, 在石墨中可与 ^{12}C 核碰撞减速, 上述碰撞可简化为弹性碰撞模型. 某反应堆中快中子与静止的靶核发生对心正碰, 通过计算说明, 仅从一次碰撞考虑, 用重水和石墨作慢化剂, 哪种减速效果更好?

9. 科学家们研究出了一种能使铀 238 变成高效燃料, 从而使核燃料越烧越多的“魔炉”——快中子增殖反应堆. 该型反应堆中使用的核燃料是钚 239, 它裂变并释放出快中子, 被装在反应区周围的铀 238 吸收后变成铀 239, 铀 239 极不稳定, 经过两次 β 衰变后变成钚 239. 请据此回答下列问题.

(1) 请解释快中子增殖反应堆燃料增殖的秘密.

(2) 根据材料中提供的信息, 写出相关的核反应方程, 并指明核反应类型.

10. 原子从一个能级跃迁到另一个较低的能级时, 有的并不发射光子. 例如, 在某种条件下, 铬原子中 $n=2$ 能级上的电子跃迁到 $n=1$ 能级上时并不发射光子, 而是将相应的能量转交给 $n=4$ 能级上的电子, 使之脱离原子, 这个现象叫作俄歇效应, 以这种方式脱离原子的电子叫作俄歇电子. 已知铬原子能级公式可简化为 $E_n = \frac{A}{n^2}$, 式中 $n = 1, 2, 3, \dots$

A 是已知常数, 则上述俄歇电子的动能是多少?

11. 在匀强磁场中, 一个静止的氡核 ($^{222}_{86}\text{Rn}$) 发生 α 衰变, 放出的 α 粒子的速度与磁感应强度垂直, 氡核衰变后的剩余部分 (即钋核) 和 α 粒子都将分别以一定的半径在磁场中做圆周运动. 试求 α 粒子和钋核做圆周运动的半径之比, 并说明这两个粒子运动轨迹的相互关系.

12. 在 β 衰变中常伴有一种称为“中微子 (ν)”的粒子放出. 中微子的性质十分特别, 因此在实验中很难探测. 1953 年, 科学家们建造了一个由大水槽和探测器组成的实验系统, 利用中微子与水中 1H 的核反应, 间接地证实了中微子的存在.

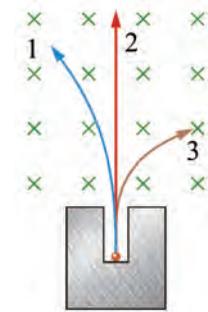


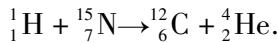
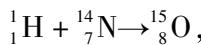
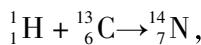
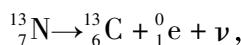
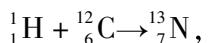
图 5-2

(1) 中微子与水中的 ${}_1^1\text{H}$ 发生核反应，产生中子 $({}_0^1\text{n})$ 和正电子 $({}_1^0\text{e})$ ，即核反应方程式为 $\nu + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_0^1\text{n} + {}_1^0\text{e}$ ，则中微子的质量数和电荷数分别是多少？

(2) 上述核反应产生的正电子与水中的电子相遇，与电子形成几乎静止的整体后，可以转变为两个光子(γ)，即 ${}_1^0\text{e} + {}_{-1}^0\text{e} \rightarrow 2\gamma$ 。已知正电子和电子的质量都为 9.1×10^{-31} kg，反应中产生的每个光子的能量约为_____ J。正电子与电子相遇不可能只转变为一个光子，原因是_____。

(3) 试通过分析比较具有相同动能的中子和电子的物质波波长的大小。

13. 下面一系列核反应是在恒星内部发生的，



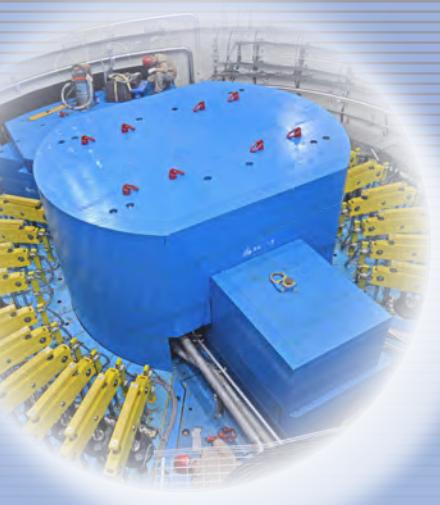
其中，H 为质子， ${}_2^4\text{He}$ 为 α 粒子， ${}_1^0\text{e}$ 为正电子， ν 为中微子。已知质子的质量 $m_p = 1.672\ 648 \times 10^{-27}$ kg， α 粒子的质量 $m_\alpha = 6.644\ 929 \times 10^{-27}$ kg，正电子的质量 $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg，中微子的质量可忽略不计，真空中的光速 $c = 3 \times 10^8$ m/s。试计算该系列核反应完成后释放的能量。

14. 太阳主要是由 e 、 ${}_1^1\text{H}$ 和 ${}_2^4\text{He}$ 等粒子组成的。维持太阳辐射的是其内部的核聚变反应，核反应方程是 $2e + 4{}_1^1\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He}$ ，该核反应产生的核能最后转化为辐射能。根据目前关于恒星演化的理论，若由于聚变反应而使太阳中的 ${}_1^1\text{H}$ 核数目从现有数减少 10%，太阳将离开主序星阶段而转入红巨星的演化阶段。为了简化模型，假定目前太阳全部由 e 和 ${}_1^1\text{H}$ 核组成，并据此回答下列问题。

(1) 已知地球半径 $R = 6.4 \times 10^6$ m，地球质量 $m = 6.0 \times 10^{24}$ kg，日地中心的距离 $r = 1.5 \times 10^{11}$ m，地球表面处的重力加速度 $g = 10$ m/s²，1 年约为 3.2×10^7 s，试估算目前太阳的质量 M 。

(2) 已知质子质量 $m_p = 1.6726 \times 10^{-27}$ kg， ${}_2^4\text{He}$ 质量 $m_\alpha = 6.6458 \times 10^{-27}$ kg，电子质量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg，光速 $c = 3 \times 10^8$ m/s。求题中所述的核聚变反应所释放的核能。

(3) 已知地球上与太阳垂直的每平方米截面上，每秒通过的太阳辐射能 $w = 1.35 \times 10^3$ W/m²。试估算太阳继续保持在主序星阶段的寿命。(结果保留一位有效数字)



绿色印刷产品

批准文号：粤发改价格〔2017〕434号 举报电话：12315



9 787554 829837 >

定价：10.32元