



普通高中教科书

物理

选择性必修

第三册

 山东科学技术出版社

普通高中教科书

物理

选择性必修

第三册

主编 廖伯琴



◆ 山东科学技术出版社

• 济南 •

主 编：廖伯琴

核心编者：冯 庆 许华忠 刘健智 廖元锡

罗基鸣 冯 华 邓 磊 廖伯琴

统 稿：廖伯琴 冯 庆 邓 磊

定 稿：廖伯琴

编务联系：李富强 李洪俊

责任编辑：光 奎 杨文静 刘玉莹

封面设计：孙 佳

版权所有·请勿擅自用本书制作各类出版物·违者必究

如对教材内容有意愿、建议或发现印装质量问题，请与山东科学技术出版社联系

电话：0531-82098030 电子邮箱：sdkjy@sdcbs.com

第1章 分子动理论与气体实验定律

导 入 走进微观世界	2
第1节 分子动理论的基本观点	3
第2节 科学测量：用油膜法估测油酸分子的大小	9
第3节 气体分子速率分布的统计规律	12
第4节 科学探究：气体压强与体积的关系	16
第5节 气体实验定律	21



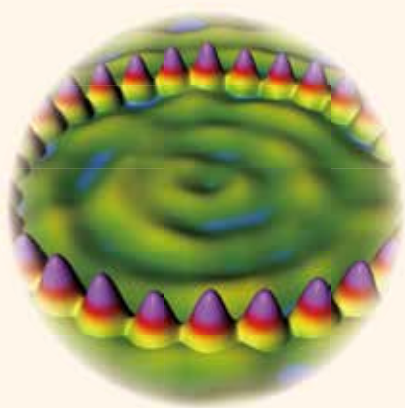
第2章 固体与液体

导 入 认识固体与液体	32
第1节 固体类型及微观结构	33
第2节 表面张力和毛细现象	37
第3节 材料及其应用	44

第3章 热力学定律

导 入 水车和水泵	50
第1节 热力学第一定律	51
第2节 能量的转化与守恒	55
第3节 热力学第二定律	59
第4节 熵——系统无序程度的量度	63



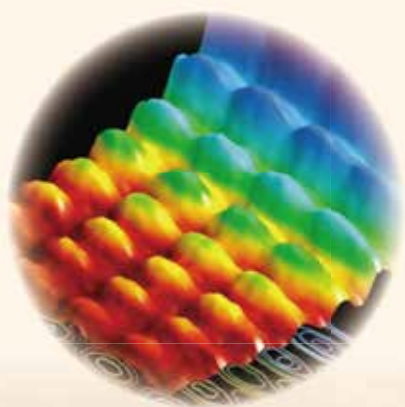


第4章 原子结构

导 入	从一幅图片说起	73
第1节	电子的发现与汤姆孙原子模型	74
第2节	原子的核式结构模型	78
第3节	光谱与氢原子光谱	82
第4节	玻尔原子模型	86

第5章 原子核与核能

导 入	打开原子核的大门	94
第1节	认识原子核	95
第2节	原子核衰变及半衰期	101
第3节	核力与核能	106
第4节	核裂变和核聚变	111
第5节	核能的利用与环境保护	117



第6章 波粒二象性

导 入	奇异的微观世界	124
第1节	光电效应及其解释	125
第2节	实物粒子的波粒二象性	134



第1章

分子动理论与 气体实验定律

导 入	走进微观世界
第 1 节	分子动理论的基本观点
第 2 节	科学测量：用油膜法估测油酸分子的大小
第 3 节	气体分子速率分布的统计规律
第 4 节	科学探究：气体压强与体积的关系
第 5 节	气体实验定律

►►本章学业要求

- 能了解分子动理论的基本观点，能解释布朗运动和扩散现象，知道分子运动速率分布图像的物理意义，能了解气体实验定律的内涵；能用分子动理论和气体实验定律解释生活中的相关现象。具有和分子动理论与气体实验定律相关的物质观念、运动与相互作用观念。——物理观念
- 能用理想气体模型分析研究实际气体的问题；能从微观和宏观视角综合分析物理问题，有统计分析、逻辑推理的意识；能用分子动理论和统计观点解释气体压强和气体实验定律；能从不同角度分析解决物理问题，有质疑、创新的意识。——科学思维
- 能完成“用油膜法估测油酸分子的大小”和“探究等温情况下一定质量气体压强与体积的关系”等实验。能针对真实情境提出与实验相关的物理问题，作出有依据的假设；能设计实验步骤，用相关仪器完成实验，获得实验数据；能分析数据，形成与实验目的相关的结论，并能进行解释；能撰写规范的实验报告，在报告中能呈现实验步骤、实验表格、数据分析过程及实验结论，能提出改进措施，能与他人分享探究结果。——科学探究
- 能体会物理研究中估测的重要性，知道人类认识自然是有不同层次的；能感受用常规方式认识微观世界的实验设计的美妙；能在力所能及的情况下，主动考虑物理技术应用可能带来的影响。

——科学态度与责任

导 人

走进微观世界

我们用肉眼可看到远在数百万光年以外的巨大星系，却不一定能看清“近在眼前”的细小物体。

17世纪，荷兰生物学家列文虎克（A. Leeuwenhoek，1632—1723）用自制显微镜对准一滴雨水的时候，惊奇地发现有无数的微小生物游弋其中。他把这个发现报告给英国皇家学会，引起了轰动。



邮票中的列文虎克和他的显微镜



用扫描隧道显微镜移动原子构成“原子”二字

随着科学技术的进步，人们的视野已深入物质的内部。科学家甚至可利用扫描隧道显微镜来操纵单个原子，将其排列成各种文字。按照这个尺寸，可在一根大头针的针尖上写下一部《红楼梦》的全部内容。

神秘的微观世界有着怎样的规律？它与宏观现象之间又有着怎样的联系？本章，我们将探讨这些问题。

第1节

分子动理论的基本观点

构成宏观物体的微粒是什么？微粒有怎样的性质才能使我们的世界如此变化多端、丰富多彩？……长久以来，人们都在思索诸如此类的问题，试图理解宏观现象的微观本质。本节我们将从分子动理论的视角讨论一些宏观现象的微观本质。

1. 物体由大量分子组成

物体是由大量分子（或原子）组成的，分子（或原子）由一些更小的微粒组成。物理学研究中，当探讨分子、原子或离子等微观粒子的热运动时，通常将它们统称为分子。除了一些有机物质的大分子外，一般分子直径的数量级为 10^{-10} m。例如，水分子的直径约为 4×10^{-10} m。

分子很小，组成物质的分子数目却非常大。1 mol 任何物质都含有相同的粒子数，这个数量称为阿伏伽德罗常数，用 N_A 表示。通常取

$$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

由阿伏伽德罗常数可看出，物质含有的分子数大得惊人。例如，1 mol 水的质量是 18 g，所含水分子数量约为 6.02×10^{23} 个，那么 1 g 水含有的水分子数量就约为 3.34×10^{22} 个。

阿伏伽德罗常数是一个重要的基本常量，通过它可将物体的体积、质量等宏观量与分子的大小、质量等微观量联系起来。



物理聊吧

根据水分子的分子量、阿伏伽德罗常数和水的密度，可估算水分子的质量和直径。请尝试计算并将结果与公认值进行比较。用这种方法能否估算氢气中氢分子的质量和直径？请与同学讨论交流。

2. 分子永不停息地做无规则运动

分子的运动有怎样的规律呢？下面我们通过实验进行探究。



迷你实验室

观察微粒在液体中的运动

(1) 在两个相同的玻璃杯中分别装入质量相等的冷水和热水，然后，在两杯水中同时滴入等量的蓝黑墨水。一段时间后，两个杯子中的蓝黑墨水呈现出如图 1-1 所示的扩散现象。请你做一做，并请解释这种现象。

(2) 把碳素墨水用纯净水稀释成悬浊液，并取一小滴放在载玻片上，盖上盖玻片，放在显微镜下观察悬浮在液体中的微粒的运动（图 1-2）。



图 1-1 墨水扩散

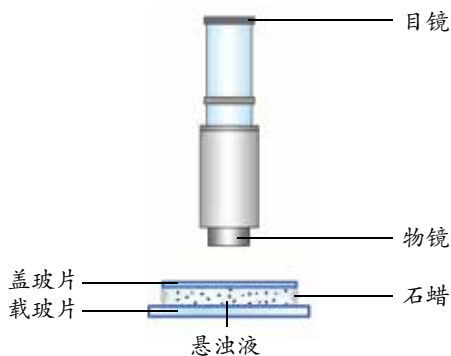


图 1-2 用显微镜观察微粒在液体中运动的示意图

在实验(1)中，玻璃杯中的蓝黑墨水不断在清水中散开，这就是扩散现象。气体、液体和固体都能发生扩散。实验表明，扩散快慢与温度有关，温度越高，扩散越快。

在实验(2)中，用显微镜观察时，可发现微粒的运动情况十分复杂。如果在显微镜下追踪一个微粒的运动，每隔 30 s 把观察到的微粒位置记录下来，然后用线段把这些位置依次连接起来，就可大致了解微粒运动的情况。图 1-3 是三个微粒的运动情况记录，可见微粒运动的位置连线没有规则，即这些微粒在不停地做无规则运动。

微粒的这种无规则运动，是英国植物学家布朗(R. Brown, 1773—1858)在 1827 年发现的。人们把微粒的这种永不停息的无规则运动称为**布朗运动**(Brown motion)。起初，人们认为布朗运动是生命特有的现象，或者是由外界因素(如静电力、振动或液体的对流等)引起的。进

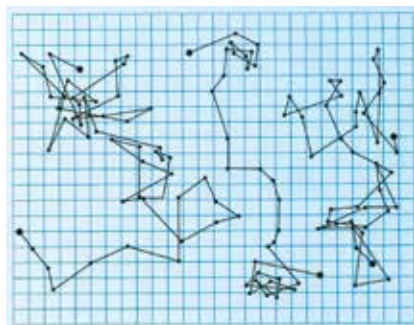


图 1-3 微粒运动位置记录图



一步的实验发现，在尽可能排除外界因素干扰的情况下，布朗运动仍然存在。

实际上，布朗运动是由微粒在液体中受到液体分子的撞击引起的。悬浮在液体中的微粒不断地受到液体分子的撞击，微粒在某一时刻所受各个方向上的撞击作用的不平衡（图1-4），使微粒的运动状态发生变化。微粒越小，其运动状态变化就越明显。布朗运动反映了液体分子在永不停息地做无规则运动。

分子无规则运动的剧烈程度与温度有关。温度越高，分子运动越剧烈。因此，通常又把分子的无规则运动称为**热运动**（thermal motion）。

现在，你能解释前面的墨水实验中，为什么温度越高，扩散越快了吧。

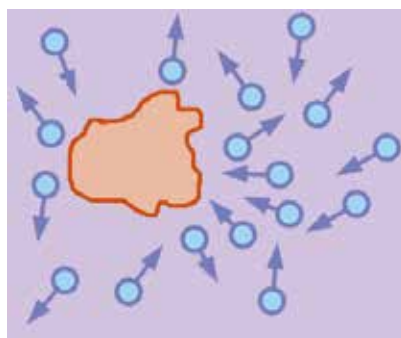


图1-4 微粒受液体分子撞击示意图



方法点拨

布朗运动间接反映了液体分子的无规则运动。通过可观察到的微粒的宏观运动来推断分子的微观运动，这是物理学研究中的一种重要方法。

3. 分子间存在着相互作用力

既然分子在永不停息地做无规则运动，为什么固体和液体的分子不散开，能保持一定的体积，且固体还能保持一定的形状呢？



迷你实验室

分子间的引力

（1）把两个铅块的横截面磨平，再用压力把它们压在一起。看看铅块下面挂上多少个钩码才能把它们拉开（图1-5）。

（2）将洗净的玻璃板用弹簧测力计吊起来，使玻璃板水平接触水面，然后缓慢竖直上拉。观察弹簧测力计的示数变化，看看在将玻璃板拉离水面的过程中，拉力的变化（图1-6）。

你能解释以上实验现象吗？



图1-5 铅块之间的分子引力实验



图1-6 玻璃板与水之间的分子引力实验

由实验可知，组成物体的分子之间存在着相互作用的引力。固体很难被拉伸，说明固体分子之间存在引力；同时，固体也很难被压缩，说明固体分子之间还存在斥力。

研究表明，分子之间同时存在着引力和斥力，其大小与分子间的距离有关。如图 1-7 所示，当分子间的距离为 r_0 时，引力和斥力相互平衡，分子间的作用力 $f_{\text{合}}$ 为零，通常把这个位置称为分子的平衡位置；当分子间的距离小于 r_0 时， $f_{\text{合}}$ 表现为斥力；当分子间的距离大于 r_0 时， $f_{\text{合}}$ 表现为引力。当分子间的距离超过 $10 r_0$ 时， $f_{\text{合}}$ 可忽略不计。

通常液体分子间的距离比固体分子间的距离略大；气体分子间的距离更大，所以气体分子间的作用力很小，一般可忽略不计。研究表明，原子内部有带正电的原子核和带负电的电子，分子间的复杂作用力就是由这些带电粒子的相互作用引起的。

固体、液体和气体分子间的作用力不同，它们的分子运动情况也不同。固体分子密集在一起，在分子间作用力的作用下，分子在平衡位置附近自由振动；液体分子的密集程度比固体小，每个分子都可在其他分子之间穿梭往来；气体分子间的距离很大，相互作用力很小，分子快速运动，而且毫无秩序，这种混乱无序导致分子间频繁碰撞（图 1-8）。

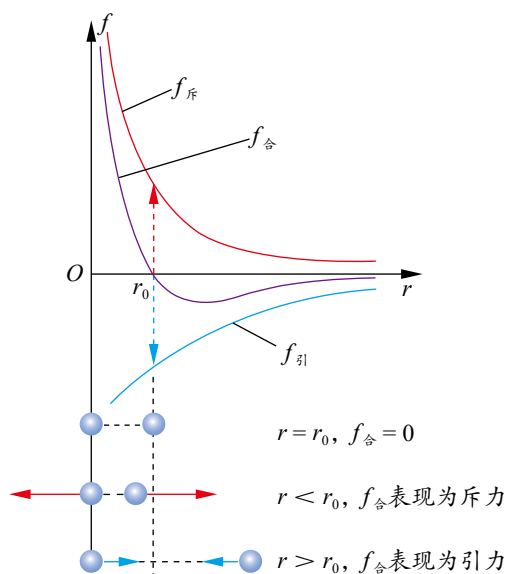


图 1-7 分子间作用力随分子间距离变化的示意图

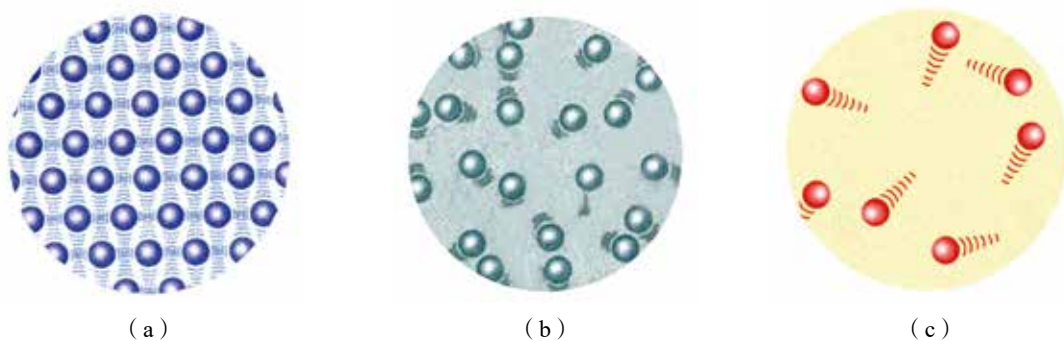


图 1-8 固体、液体、气体分子的运动示意图

物体是由大量分子组成的，分子永不停息地做无规则运动，分子间存在着相互作用力。这就是分子动理论的基本观点，是研究热现象的基础。

4. 物体的内能

由于分子间存在着相互作用力，可进一步证明，分子具有由它们的相对位置决定的势能，这种势能称为分子势能。分子势能的变化可根据分子间作用力做功来确定：分子间作



用力做正功，分子势能减小；分子间作用力做负功，分子势能增大。当分子间距离小于 r_0 时，分子间作用力表现为斥力，再减小分子间距离，必须克服分子间斥力做功，分子势能随分子间距离减小而增大。当分子间距离大于 r_0 时，分子间作用力表现为引力，再增大分子间距离，必须克服分子间引力做功，分子势能随分子间距离增大而增大。分子间距离足够大时，分子间作用力可忽略不计。若选定分子间距离 r 为无穷大时的分子势能为零，则分子势能 E_p 随分子间距离 r 变化的关系如图 1-9 红线所示（蓝色虚线为分子作用力随分子间距离变化的图像）。

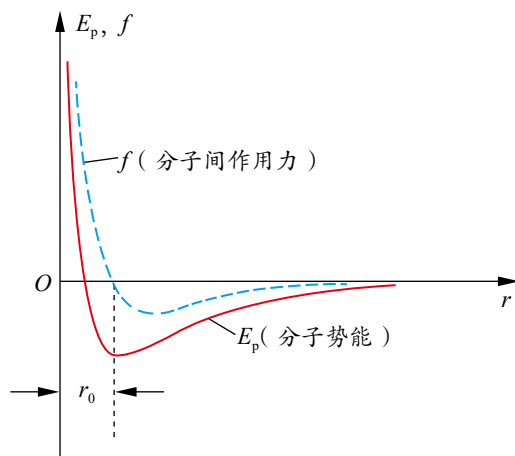


图 1-9 分子势能及分子间作用力随分子间距离变化的示意图

当分子间距离等于 r_0 时，分子间作用力为零，分子势能最小。物体的体积变化时，分子之间的距离会随之变化，分子势能也会发生改变。因此，分子势能与物体的体积等因素有关。

组成物体的分子都在不停地做无规则运动——热运动，做热运动的分子具有动能。物体中分子热运动的速率大小不一，各个分子的动能也有大有小。宏观的热现象是大量分子热运动的整体表现。我们研究热现象，重要的不是单个分子的动能，而是大量分子动能的平均值，这个平均值称为分子热运动的平均动能。研究表明，温度是物体内分子热运动的平均动能的标志。温度越高，分子热运动的平均动能越大。

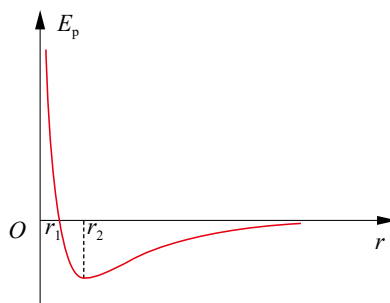
物体的所有分子热运动的动能和分子势能的总和，称为物体的**内能**（internal energy）。组成物体的分子永不停息地做无规则运动，分子间存在着相互作用力，所以任何物体都具有内能。因为物体含有的分子数目与物体的质量有关，分子热运动的平均动能与温度有关，分子势能与体积有关，所以物体的内能与物体的质量、温度和体积有关。



节 练 习

- 露珠是由空气中的水蒸气液化而成的。在液化过程中，水分子间的引力和斥力发生了怎样的变化？
- 为使布朗运动更明显，实验中的碳素墨水选用微粒更小的好些还是微粒更大的好些？为什么？
- 碳素墨水滴入水中，逐渐混合均匀。下列关于该现象的分析，正确的是
 - 混合均匀主要是由于微粒受重力作用
 - 混合均匀的过程中，水分子和微粒都做无规则运动
 - 使用微粒更小的墨水，混合均匀的过程进行得更迅速
 - 墨水的运动是由微粒和水分子发生化学反应引起的
- 下列关于热运动的说法，正确的是
 - 水流速度越大，水分子的热运动越剧烈
 - 水凝结成冰后，水分子的热运动停止
 - 水的温度越高，水分子的热运动越剧烈
 - 水的温度升高，每一个水分子的运动速率都会增大

5. 分子势能随分子间距离变化的图像如图所示。据图分析可得
- A. r_1 处为分子平衡位置
 - B. r_2 处为分子平衡位置
 - C. 分子间距离足够大时, 分子势能最小, 分子间无相互作用力
 - D. $r < r_1$ 时, r 越小, 分子势能越大, 分子间仅有斥力存在
6. 若以 M 表示水的摩尔质量, V_m 表示在标准状态下水蒸气的摩尔体积, ρ 表示在标准状态下水蒸气的密度, N_A 表示阿伏伽德罗常数, m 、 V 分别表示每个水分子的质量和体积。下列关系式正确的是



第5题

- A. $N_A = \frac{\rho V_m}{m}$ B. $\rho = \frac{M}{N_A V}$ C. $m = \frac{M}{N_A}$ D. $V = \frac{V_m}{N_A}$



请提问

第2节

科学测量： 用油膜法估测油酸分子的大小

组成物体的分子很小，直接测量它们的大小是很困难的。那么，通过什么方法能测量分子的大小呢？下面我们用油膜法粗略测量油酸分子的大小。

实验目的

- (1) 估测油酸分子大小的数量级。
- (2) 体验通过油膜法测量油酸分子大小的思想方法。

实验器材

油酸、酒精、清水、滴管（或注射器）、量筒、笔、爽身粉、玻璃片、浅水盘、坐标纸。

实验原理与设计

油酸是一种脂肪酸，把一滴油酸滴到平静的水面上，油酸会展开成一片油膜。油膜面积最大且稳定时，可近似认为是单层油酸分子油膜。若把油酸分子视为球体，则单分子油膜的厚度就近似等于分子的直径。只要测量出这一滴油酸的体积 V 和油膜的面积 S ，就可估算出油酸分子的直径 $d = \frac{V}{S}$ [图 1-10 (a)]。

实验步骤

- (1) 用滴管（或注射器）将配制好的油酸酒精溶液一滴一滴地滴入量筒中，记下量筒内溶液增加一定体积（如 1 mL）时的滴数，由此求出一滴油酸酒精溶液的平均体积 $\bar{V}$ 。
- (2) 向浅水盘内倒入清水，在水面上轻轻而均匀地撒一层爽身粉。用滴管在其上滴一滴油酸酒精溶液，待油层不再扩散、形状稳定时，就近似形成了单分子油膜 [图 1-10 (b)]。



安全警示

实验中，应避免将水和爽身粉撒到其他地方，更不可把爽身粉弄到人的眼睛里。

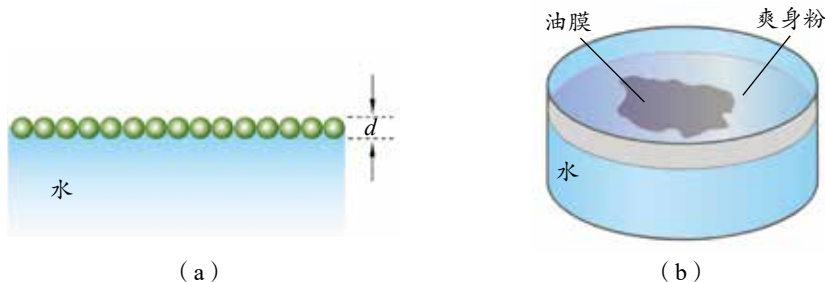


图 1-10 粗略测量油酸分子直径的示意图

(3) 将玻璃片盖在浅水盘上, 用笔将油膜的轮廓描绘在玻璃片上。

(4) 将描有油膜轮廓的玻璃片放在坐标纸上, 算出油膜的面积 S 。求面积时以坐标纸上边长为 1 cm 的正方形为单位, 数出轮廓内正方形的个数 (不足半个的舍去, 多于半个的算一个)。

(5) 根据油酸酒精溶液的浓度, 算出一滴溶液中纯油酸的体积 V 。根据油酸的体积 V 和油膜的面积 S 算出油酸分子的直径。

数据分析

请将测量的数据记入你设计的表格中, 并分析数据, 形成结论。

实验结论

请写出实验结论。

讨论

在实验中为什么要取非常小的一滴油酸酒精溶液做实验? 为什么实验时要使油膜尽可能地散开? 假如油酸分子不是紧密排列的, 对实验结果会产生怎样的影响?



方法点拨

估测法广泛应用于物理学研究。用油膜法估测油酸分子的大小, 利用宏观手段研究微观问题, 将微小的不易直接测量的物理量 (分子直径) 转化为易于测量的物理量 (体积和面积), 从而通过间接的方法估测油酸分子的大小。这是估测法在物理学中巧妙应用的案例。

能针对真实情境提出与实验相关的物理问题, 作出有依据的假设; 能在他人帮助下制订实验方案, 用相关器材完成实验, 获得实验数据; 能分析数据, 估测分子的大小, 并能进行解释; 能撰写规范的实验报告, 在报告中能呈现实验表格、数据分析过程及实验结论, 能提出改进措施, 能与他人分享研究成果。

注意提升实验设计能力与估算能力。

能体会物理研究中估测的重要性, 知道人类认识自然是有不同层次的; 能感受用常规方式认识微观世界的实验设计的美妙。

——科学探究, 科学态度与责任



节练习

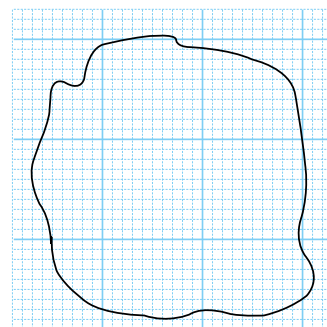
1. 请撰写“用油膜法估测油酸分子的大小”的实验报告。注意在报告中呈现设计的实验表格、数据分析过程和实验结论。请与同学交流实验中产生误差的原因, 提出改进措施。
2. 某同学在做“用油膜法估测油酸分子的大小”的实验时, 测得油酸分子的直径明显偏大。可能的原因是
 - A. 油酸还未完全散开
 - B. 所用油酸溶液中含有大量酒精
 - C. 计算油膜面积时, 将所有不足一格的正方形都当成一格计算
 - D. 在计算一滴溶液的体积时, 少算了液滴数
3. 在“用油膜法估测油酸分子的大小”的实验中, 已知配制的油酸酒精溶液纯油酸与溶液体积之比为 1:500。测出 1 mL 此溶液有 25 滴, 在三次实验中分别取其中一滴在水面上自由扩展后形成的油膜面积 S 见下表。试完成表格并算出测量结果, 看看测量结果与公认的油酸分子大小的数量级 10^{-10} m 是否一致。



次数	S/m^2	d/m	d 的平均值 /m
1	0.533		
2	0.493		
3	0.563		

4. 在做“用油膜法估测油酸分子的大小”的实验时，某同学的操作步骤如下：

- ①取一定量的无水酒精和油酸，制成一定浓度的油酸酒精溶液；
- ②在量筒中滴入一滴该溶液，测出它的体积；
- ③在蒸发皿内盛一定量的水，再滴入一滴油酸酒精溶液，待其散开并稳定；
- ④在蒸发皿上覆盖透明玻璃，用彩笔在玻璃上描出油膜的轮廓，用透明坐标纸测量油膜的面积。



第4题

(1) 请指出上述步骤中的错误之处并改正。

(2) 实验中，用彩笔在玻璃板上描出油膜的轮廓，其在坐标纸上的形状如图所示。已知坐标纸上小正方形的边长为 1 cm，该油膜的面积是多少平方米？（结果保留 1 位有效数字）



请提问

第3节

气体分子速率分布的统计规律

气体分子都在不停息地做无规则运动，每一时刻的运动情况完全是偶然的、不确定的。那么，大量分子的无规则运动是否有规律可循呢？本节我们将学习气体分子速率分布的统计规律。

1. 偶然中的必然

生活中有大量的事件在一定条件下有多种变化的可能，而究竟发生哪种变化事先又不能完全确定。例如，抛一枚硬币（图 1-11），无法确定将会出现正面还是反面向上。多次抛掷会有什么现象？这些现象是否蕴含着一定的规律？



图 1-11 抛掷硬币

下面我们通过实验来探究大量偶然事件中是否会表现出一定的规律。



迷你实验室

从伽尔顿板实验看统计规律

伽尔顿板是一种演示某种统计规律的装置。如图 1-12 所示，在一块竖直木板的上部均匀钉上许多铁钉，木板下部用竖直隔板隔成等宽的狭槽，装置前侧面以玻璃覆盖。

从入口处投入一个小钢珠，小钢珠在下落过程中先后与许多铁钉相碰，经曲折的路径，落入某一槽中。重复几次，我们会观察到小钢珠落入哪个槽完全是不确定的。

如果保持手的姿势不变，把大量小钢珠从入口处缓缓倒入，观察落入槽中的小钢珠的分布情况。我们发现，落入中央狭槽的小钢珠较多，落入两边狭槽的小钢珠较少。重复实验，得到的结果相似。

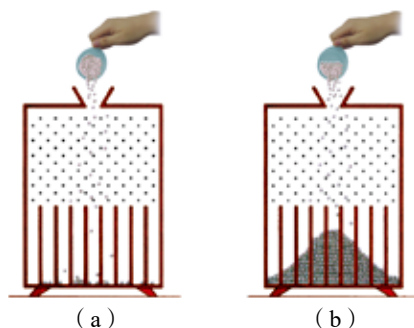


图 1-12 伽尔顿板实验示意图

实验结果表明，尽管单个小钢珠落入哪个狭槽是偶然的，少量小钢珠在狭槽内的分布情况也是不确定的，但大量小钢珠在狭槽内的分布情况表现出必然的规律。这种大量偶然事件表现出来的整体规律，称为统计规律。



物理聊吧

按照相同的方法抛掷硬币，如果抛掷的次数不断增加，硬币出现正、反面朝上次数的比例会有什么变化？历史上不少统计学家做过成千上万次抛掷硬币的实验，部分数据记录见表 1-1。请同学们也动手做一做，并展开讨论。

表1-1

抛掷硬币实验

实验者	抛掷次数 m	出现正面次数 n
棣莫佛	2 048	1 061
布丰	4 040	2 048
皮尔逊	12 000	6 019
皮尔逊	24 000	12 012

2. 气体分子速率分布规律

每个气体分子运动的速率是不确定的。组成物质的分子数目是巨大的，大量气体分子的速率遵循怎样的统计规律呢？

1859 年，麦克斯韦从理论上推导出了处在不同温度下的气体分子速率的分布规律。20 世纪 20 年代以后，陆续有许多实验验证了麦克斯韦速率分布规律。表 1-2 是不同温度下氧分子的速率分布情况。从表中可看出，在一定温度下，中等速率的分子所占的比例大。

表1-2

不同温度下氧分子的速率分布

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

理论和大量实验表明，气体分子的速率分布如图1-13所示。图中 $f(v)$ 为速率 v 附近单位速率区间内的分子数占总分子数的百分比。从图中可看出，在一定温度下，不管个别分子怎样运动，速率分布表现出“中间多、两头少”的规律。当温度升高时，“中间多、两头少”的分布规律不变，分布曲线的峰值向速率大的一方移动。大量分子热运动所表现出来的统计规律对我们研究热现象具有重要的作用。

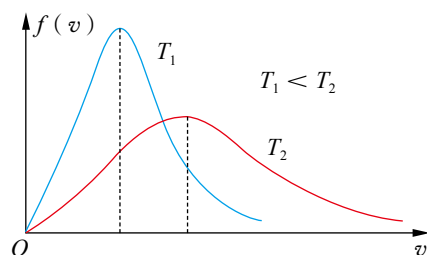


图 1-13 气体分子的速率分布图像



科学书屋

麦克斯韦与气体分子速率分布规律

麦克斯韦（图1-14），英国理论物理学家，经典动力学的创始人，统计物理学的奠基人之一。在热力学和气体分子动理论方面都作出了很大贡献。1859年，他发表了论文《气体分子动理论的说明》，第一次提出分子速率分布的概念，推导出速率分布函数，由此找到了由微观量求统计平均值的途径，为气体分子动理论的建立奠定了基础。



图 1-14 麦克斯韦

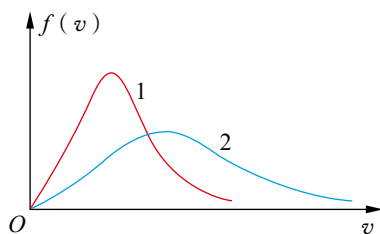


节练习

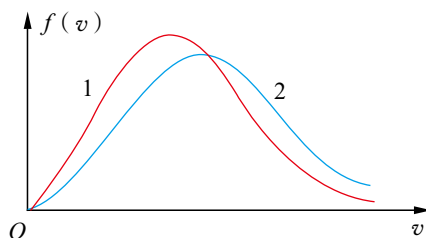
1. 举几个自然现象或社会现象的实例，说明大量偶然事件从整体上看遵循一定的统计规律。
2. 伽尔顿板可用来演示统计规律。让大量小球从上方漏斗形入口落下，最终小球都落在槽内。重复多次实验后发现
 - A. 某个小球落在哪个槽是确定的
 - B. 大量小球在槽内的分布是无规律的
 - C. 大量小球落入槽内后均匀分布在各槽中
 - D. 越接近漏斗形入口处的槽内，小球聚集得越多
3. 下列有关气体分子运动的说法正确的是
 - A. 某时刻某一气体分子向左运动，则下一时刻它一定向右运动
 - B. 在一个正方体容器里，任一时刻与容器各侧面碰撞的气体分子数目基本相同
 - C. 当温度升高时，速率大的气体分子数目增多，气体分子的平均动能增大
 - D. 气体分子速率呈现“中间多、两头少”的分布规律



4. 氧气分子在不同温度下的速率分布规律如图所示, 横坐标表示分子速率 v , 纵坐标表示单位速率区间内分子数占总分子数的百分比。曲线 1、2 对应的温度分别为 T_1 、 T_2 。由图可知
- A. 温度 T_1 低于温度 T_2
 - B. 曲线中的峰值对应的横坐标数值为氧气分子速率的最大值
 - C. 温度升高, 每一个氧气分子的速率都增大
 - D. 温度升高, 氧气分子的平均动能增大
5. 氧气分子在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下单位速率区间的分子数占总分子数的百分比随气体分子速率的变化分别如图中两条曲线所示。下列说法正确的是
- A. 两条曲线下的面积相等
 - B. 曲线 1 对应氧气分子平均动能较小的情形
 - C. 曲线 2 对应氧气分子在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的情形
 - D. 曲线给出了任意速率区间的氧气分子数目



第4题



第5题

请提问



第4节

科学探究： 气体压强与体积的关系

在生产生活中，有许多现象与气体的状态及其变化有关。例如，氦气球升空时（图 1-15），随着高度的增加，球内氦气的压强、温度和体积都在变化。气体的压强、温度和体积三个物理量有着怎样的关系？本节我们将在温度不变的条件下，研究气体压强与体积的关系。



图 1-15 升空的氦气球

1. 气体的状态参量

对一定质量的气体，其宏观状态通常可用体积 V 、温度 T 和压强 p 这三个物理量来描述，这些描述系统状态的物理量称为系统的状态参量。

（1）气体的体积

气体的体积是指气体分子能够到达的空间，气体具有很强的流动性，它总能充满整个容器，因此，气体的体积通常就等于容器的容积。

（2）气体的温度

温度是描述物体冷热程度的物理量，也是物体内分子平均动能的标志。气体温度的高低，取决于气体分子无规则运动的剧烈程度。气体分子无规则运动加剧，分子平均动能增大，气体温度升高；气体分子无规则运动减弱，分子平均动能减小，气体温度降低。

要定量表示温度，就必须有一套对温度的标定方法。人们常采用摄氏温标来标定温度：标准大气压下冰水混合物的温度标定为 0°C ，水的沸腾温度标定为 100°C ，把 $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 之间划分为 100 等份，每一等份表示 1°C ，并以此比例往 0°C 以下和 100°C 以上扩展。用摄氏温标表示的温度称为摄氏温度，用符号 t 表示，单位是摄氏度，符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。

物理学中，温度的国际单位是热力学温度的单位开尔文，符号为 K 。热力学温度与摄氏温度的关系是

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

（3）气体的压强

气体内部各个方向都存在压强，这种压强称为气体压强，简称气压。

气体压强是怎样产生的呢？我们先做一个类比实验模拟气体压强的产生。



迷你实验室

模拟气压的产生

如图 1-16 所示，在玻璃筒内装入一些塑料小球代表气体分子，在小球上面放一轻质活塞，用电动机带动振动器使小球运动。当电动机启动后，活塞受小球的撞击，悬浮在一定的高度。改变电动机的转速，观察活塞高度的变化。

保持电动机的转速不变，增加塑料小球的数目，再观察活塞高度的变化。

请解释为什么会出现这样的现象。

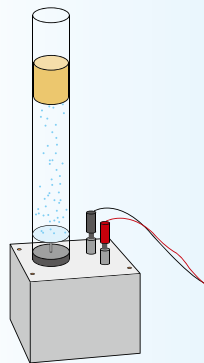


图 1-16 模拟气压产生的实验装置

塑料小球不断地撞击活塞，虽然每个塑料小球对活塞撞击的作用力是短暂的、不连续的，但频繁撞击就能在整体上表现为对活塞施加一个稳定的作用力而使活塞持续悬浮。

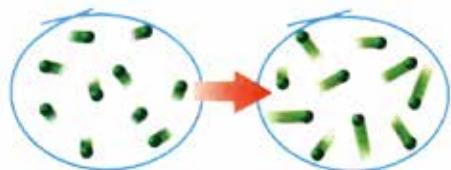
容器中的气体分子在做无规则运动时，容器壁受到分子的频繁撞击（图 1-17）。每个分子撞击容器壁产生的力是短暂的、不连续的，但大量分子的频繁撞击，就会使容器壁受到一个稳定的压力，从而产生压强。气体分子的运动是无规则的，气体分子向各个方向运动的概率相同，对容器壁各处的撞击效果也相同，因此气体对容器壁的压强处处相等。



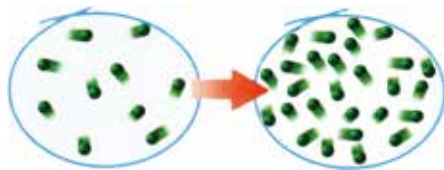
图 1-17 气体分子撞击容器壁的示意图

实验中我们观察到，电动机转速增大，会使塑料小球撞击活塞的速率增大，致使活塞因受到的向上的作用力变大而上升；在电动机转速不变、小球撞击活塞的速率不变的情况下，增加塑料小球的数目，会使活塞受到的撞击更加频繁，也会使活塞因受到的向上的作用力变大而上升。

与此类似，当气体温度升高时，高速率的气体分子数增多，整体上分子运动更加剧烈，分子对容器壁的撞击力加大且撞击更加频繁，使得气体的压强增大 [图 1-18 (a)]。若单位体积内的分子数增加，气体分子撞击容器壁也会更加频繁，使得气体的压强增大 [图 1-18 (b)]。由此可见，气体的压强与气体温度和单位体积的分子数有关，温度越高，单位体积内的分子数越多，气体的压强越大。



(a) 温度升高，压强增大



(b) 单位体积内的分子数增加，压强增大

图 1-18 气体压强与气体温度和单位体积内分子数的关系示意图

气体的压强可通过系统与外界相互作用的关系确定。例如，图 1-19 所示气缸内的气体压强为 p ，由质量为 m 、面积为 S 的光滑活塞受力平衡可知

$$p = p_0 + \frac{mg}{S}$$

式中， p_0 为外界大气压强。

图 1-20 所示静止的玻璃管内，长度为 h 、密度为 ρ 的液体封闭着一定质量的气体，其压强 p 可选取液柱底部横截面为 S 的薄液片求得。由薄液片受力平衡得到

$$p = p_0 + \rho gh$$

如果玻璃管内的液体为水银，且气压单位选用 cmHg，水银柱长度单位选用 cm，则玻璃管内的气压可表示为 $p = p_0 + h$ 。

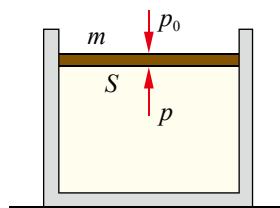


图 1-19 分析气缸内气体压强的示意图

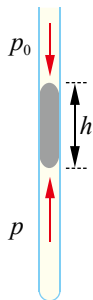


图 1-20 分析玻璃管内气体压强的示意图

2. 探究气体压强与体积的关系

气体的状态发生变化，通常是压强、温度和体积这三个物理量同时发生变化。

一定质量的气体，在温度不变的情况下，压强与体积有什么关系呢？下面就让我们通过实验来进行探究。

实验目的

(1) 探究一定质量的气体在温度不变的条件下压强与体积的关系。

(2) 学习气体压强的测量方法。

实验器材

探究气体压强与体积关系的实验装置（气压计、玻璃管、铁架台、活塞等）。

实验原理与设计

如图 1-21 所示，以玻璃管内封闭的气体为研究对象，可由气压计读出管内气体的压强，从玻璃管的刻度上直接读出管内气体的体积。在保持气体温度不变的情况下，改变气体的体积，测量多组数据即可研究气体压强与体积之间的关系。

实验步骤

根据实验原理安装实验器材。请写出相关实验步骤，完成实验操作。



安全警示

实验操作过程中小心操作，以免损坏仪器。

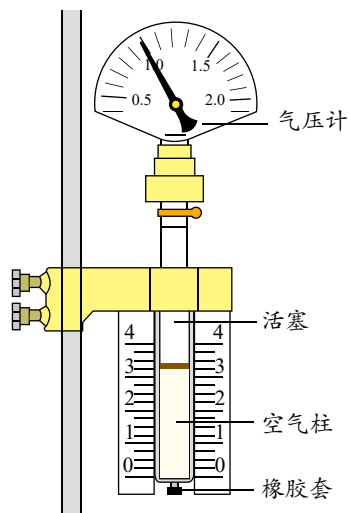


图 1-21 实验装置示意图



数据分析

请将测量的数据记入你设计的表格中，用作图法分析压强与体积的关系，并得出结论。

实验结论

请写出实验结论。

讨论

- (1) 实验过程中，如何实现气体的等温条件？
- (2) 引起实验误差的主要因素有哪些？如何减小实验误差？

能针对真实情境提出与实验相关的物理问题，作出有依据的假设；能设计实验步骤，用相关仪器完成实验，获得实验数据；能分析数据，形成与实验目的相关的结论，并能进行解释；能撰写规范的实验报告，在报告中能呈现实验步骤、实验表格、数据分析过程及实验结论，能提出改进措施，能与他人分享探究结果。

注意提升实验操作能力、数据处理能力和误差分析能力。

——科学探究



方法点拨

气体的压强 p 与体积 V 之间是否存在反比关系，可借助图像进行分析。反比例函数的图像是双曲线的一支，不易直接判定两个量之间的关系，而正比例函数的图像是直线，很容易判定。我们可先根据实验数据算出 $\frac{1}{V}$ 的值，然后以 $\frac{1}{V}$ 为横坐标， p 为纵坐标，在 $p - \frac{1}{V}$ 坐标平面上描绘出 p 随 $\frac{1}{V}$ 变化的关系曲线，从而进行判断。



DIS实验室

利用压强传感器探究气体压强与体积的关系

如图 1-22 所示，利用压强传感器、注射器、数据采集器、计算机进行实验。缓慢推动注射器活塞，使气体体积发生变化。通过压强传感器可直接读出气体的压强，输入对应的体积，计算机自动描点并生成压强与体积的关系曲线。

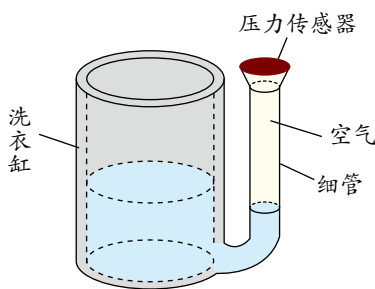


图 1-22 利用压强传感器探究气体压强与体积的关系

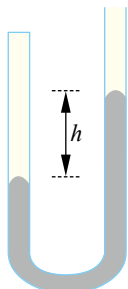


节练习

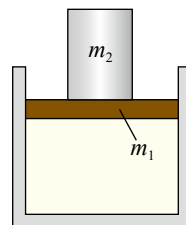
1. 请撰写“探究等温情况下一定质量气体压强与体积的关系”的实验报告。注意在报告中呈现设计的实验步骤、实验表格以及数据分析过程和实验结论。请与他人分享探究结果。
2. 堵住打气筒的出气口，缓慢推压活塞使气体体积减小，你会感到越来越费力。请解释出现这种现象的原因。
3. 一段长为 10 cm 的水银柱，把空气封闭在一端开口、粗细均匀的静止长直玻璃管内。如果外界大气压强为 75 cmHg，当玻璃管内空气压强为 70 cmHg 时，玻璃管一定处于
 - A. 开口向右水平放置状态
 - B. 开口向下倾斜放置状态
 - C. 开口向下竖直放置状态
 - D. 开口向上竖直放置状态
4. 在“探究等温情况下一定质量气体压强与体积的关系”的实验中，下列操作正确的是
 - A. 调节空气柱长度后立刻读数
 - B. 拉上窗帘防止阳光直射玻璃管
 - C. 推拉活塞时，为了防止手滑应该用手紧握玻璃管
 - D. 实验中若密封橡胶帽脱落，应立刻堵住后继续实验
5. 如图所示，某种自动洗衣机进水时，与洗衣缸相连的细管中会封闭一定质量的空气，通过压力传感器感知管中的空气压力，从而控制进水量。设温度不变，洗衣缸内水位升高，则细管中被封闭的空气
 - A. 体积不变，压强变小
 - B. 体积变小，压强变大
 - C. 体积不变，压强变大
 - D. 体积变小，压强变小
6. 如图所示，一段水银柱把空气封闭在一端开口、粗细均匀、竖直固定的 U 形玻璃管内。已知两水银面的高度差 $h = 10\text{ cm}$ ，外界的大气压强 $p_0 = 75\text{ cmHg}$ ，玻璃管内空气的压强是多少？
7. 如图所示，水平放置的气缸上有一质量为 m_1 、底面积为 S_1 的活塞，在活塞上方再放置一个质量为 m_2 、底面积为 S_2 的圆柱体金属块。忽略活塞与气缸间的摩擦，若外界大气压强为 p_0 ，请从以上信息中选择相关条件，求气缸内气体的压强 p 。



第 5 题



第 6 题



第 7 题

请提问



第5节

气体实验定律

前面通过实验探究了在保持温度不变的情况下，气体的压强与体积之间的关系。它们之间存在着怎样的定量关系呢？在分别保持体积不变或压强不变的情况下，另外两个物理量之间又存在怎样的关系呢？本节我们将学习有关内容。

1. 玻意耳定律

通过大量实验探究得知：一定质量的气体，在温度不变的情况下，压强随体积的减小而增大。气体的压强与体积是否存在反比关系呢？

图 1-23 是根据实验数据得出的 $p - \frac{1}{V}$ 图像，排除实验误差，该图像是一条过坐标原点的直线。

大量实验证明，**一定质量的气体，在温度保持不变的条件下，压强与体积成反比**。如果用 p 表示压强，用 V 表示体积，可写成

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

或者

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

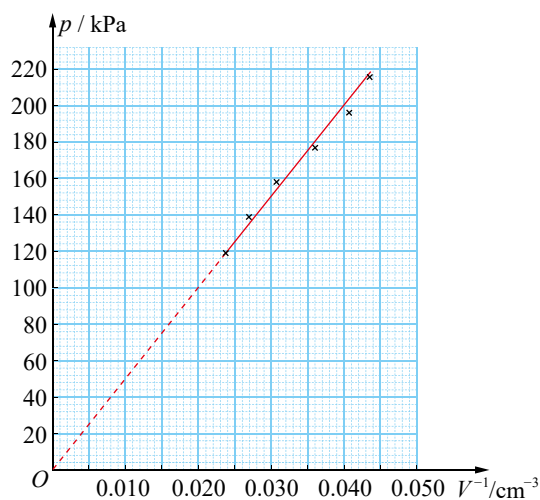


图 1-23 $p - \frac{1}{V}$ 图像

式中， p_1 、 V_1 和 p_2 、 V_2 分别表示气体在 1、2 两个不同状态下的压强和体积。

这个结论称为**玻意耳定律**（Boyle law），也称为**玻意耳—马略特定律**，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）先后独立通过实验发现的。

在平面直角坐标系中，横轴表示气体的体积 V ，纵轴表示气体的压强 p 。在温度不变的情况下， p 与 V 的函数图像是双曲线的一支（图 1-24）。这种表示等温过程的图线称为气体的等温线。一定质量的气体，在不同温度下，等温线的位置也不相同。

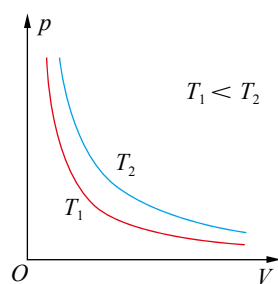


图 1-24 $p-V$ 图像

从微观角度看，一定质量的气体分子总数不变。温度保持不变时，分子平均动能保持不变。当气体体积减小时，单位体积内的分子数增多，气体的压强也就增大；当气体体积增大时，单位体积内的分子数减少，气体的压强也就减小。



科学书屋

玻意耳

1659年，英国物理学家、化学家玻意耳（图1-25）利用胡克研制的真空泵对空气的性质进行研究。1662年，他出版了《关于空气的弹力和重量学说的答辩》一书。书中不但阐述了温度恒定时气体的压强与体积成反比的规律，还描述了另一个实验，表明空气在加热时压强会增大。1676年，法国物理学家马略特也独立得出结论，在表述上比玻意耳的表述更完整，数据也更令人信服。因此，这一定律也被称为玻意耳—马略特定律。



图1-25 玻意耳

例题

如图1-26所示，将粗细均匀且一端开口的玻璃管放置在水平桌面上，管内用长为 h 的水银封闭着一段长度为 l_0 的空气柱。已知大气压强为 p_0 ，当把玻璃管开口朝上缓慢地竖立起来时，管内空气柱的长度变为多少？

分析

本题研究对象是玻璃管内的气体。将玻璃管缓慢竖立，可认为管内气体的温度始终等于外界气温，为等温变化过程。玻璃管水平放置时气体状态为初态，竖立后的气体状态为末态。

解

用 p_1 、 V_1 和 p_2 、 V_2 分别表示玻璃管水平、竖直时管内气体的压强和体积。当压强以cmHg为单位时，管内气体的压强 $p_1 = p_0$ ， $p_2 = p_0 + h$ 。

设玻璃管的横截面积为 S ，竖直时管内空气柱的长度为 l ，根据玻意耳定律有

$$p_1 S l_0 = p_2 S l$$

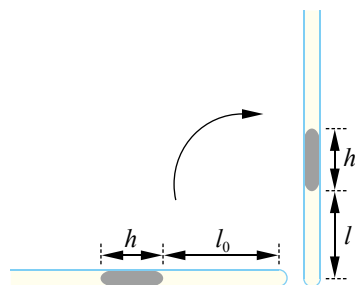


图1-26 研究管内空气柱长度变化的示意图

策略提炼

解决这类问题的一般方法是：先确定研究对象，再确定研究对象的始末状态并分析其状态参量，判断其状态变化遵循的气体实验定律，进而列出方程求解。



代入气体的压强 p_1 和 p_2 解得

$$l = \frac{p_0}{p_0 + h} l_0$$

讨论

在等温过程中，随着玻璃管缓慢竖起来，玻璃管下端的空气柱受到水银柱的压强逐渐增大，空气柱逐渐被压缩，长度变短。计算结果符合上述分析。

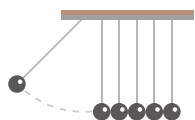


迁移

给某包装袋充入氮气后密封，在室温下，袋中气体压强为 1 个标准大气压，体积为 1 L。将其缓慢压缩到压强为 1.5 个标准大气压时，气体的体积变为 0.6 L。请通过计算判断该包装袋是否漏气。

2. 查理定律

夏天，充满气的气球在阳光下容易爆裂。这说明在体积近似不变的情况下，气体的压强会随温度的改变而变化。那么，一定质量的气体，在保持体积不变的情况下，压强与温度到底有什么关系呢？



实验与探究

气体压强与温度的关系

在图 1-21 中，仍以玻璃管内封闭的气体为研究对象。打开密封橡胶帽，移动活塞取一定质量的气体后，盖上密封橡胶帽并将活塞固定，以确保气体状态变化时体积保持不变。

将玻璃管内封闭气体部分完全浸入烧杯内的水中，经过一段时间后，管内气体与水的温度相同，从温度计上读取此时的水温 T ，从气压计上读取此时管内气体的压强 p 。多次改变烧杯的水温，读取不同水温下对应的气体压强，测得多组实验数据。

根据得到的数据，在体积不变的条件下，气体的压强与温度存在怎样的关系？

由上面的实验可得出，压强与温度近似为一次函数关系。

大量实验证明，**一定质量的气体，在体积保持不变的条件下，压强与热力学温度成正比**。如果用 p 表示压强，用 T 表示热力学温度，可写成

$$p \propto T$$

或者

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

式中， p_1 、 T_1 和 p_2 、 T_2 分别表示气体在 1、2 两个不同状态下的压强和热力学温度。

这个规律称为**查理定律**（Charles law），是法国科学家查理（J.Charles, 1746—1823）通过实验发现的。

压强与温度的关系也可用图像来描述。在平面直角坐标系中，横轴表示气体的热力学温度 T ，纵轴表示气体的压强 p 。对一定质量的气体，在体积不变的情况下， p 与 T 的函数图像是一条过坐标原点的直线（图 1-27）。

从微观角度看，一定质量的气体，在体积保持不变时，单位体积内的分子数保持不变。当温度升高时，分子平均动能增大，气体的压强也就增大；当温度降低时，分子平均动能减小，气体的压强也就减小。

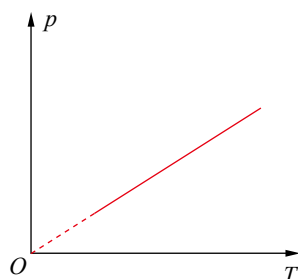


图 1-27 $p-T$ 图像



物理聊吧

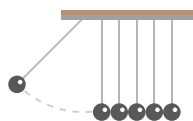
炎热的夏天，给汽车轮胎充气时（图 1-28），一般都不能充得太足；给自行车轮胎充气时，也不能充得太足。这是为什么呢？请与同学讨论交流。



图 1-28 给轮胎充气

3. 盖—吕萨克定律

一定质量的气体，在压强不变的情况下，体积与温度有什么关系呢？



实验与探究

气体体积与温度的关系

如图 1-29 所示,用水银柱将一定质量的空气封闭在上端开口的细玻璃管中,并将细玻璃管与温度计一起固定在刻度尺上,放入盛有水的烧杯,没入水中适当的深度,使封闭气体的温度和烧杯内水的温度相同,因此温度计的示数即可表示气体的温度。气体的体积(用气柱的长度表示)可由刻度尺直接读出。

(1) 加热烧杯,待温度计示数稳定后,记下气体的温度和体积。

(2) 按步骤(1)重复实验,记下几组对应的温度和体积值。

根据得到的数据,在压强不变的条件下,气体的温度与体积存在怎样的关系?是否与你的猜想相同?

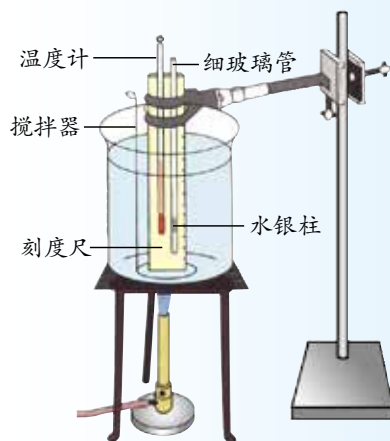


图 1-29 探究气体体积与温度的关系实验装置示意图

大量实验证明, **一定质量的气体,在压强保持不变的条件下,体积与热力学温度成正比**。如果用 V 表示体积,用 T 表示热力学温度,可写成

$$V \propto T$$

或者

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

式中, V_1 、 T_1 和 V_2 、 T_2 分别表示气体在 1、2 两个不同状态下的体积和热力学温度。

这个规律称为 **盖—吕萨克定律** (Gay-Lussac law), 是法国科学家盖—吕萨克 (J. Gay-Lussac, 1778—1850) 通过实验发现的。

气体的体积与温度的关系也可用图像来描述。在平面直角坐标系中,横轴表示气体的温度,纵轴表示气体的体积。对一定质量的气体,在压强不变的情况下, V 与 T 的函数图像是一条过坐标原点的倾斜直线 (图 1-30)。

从微观角度看,对于一定质量的气体,当温度升高时,分子平均动能增大,为了保持压强不变,单位体积的分子数相应减少,气体的体积必然相应增大。反之,当气体的温度降低时,气体的体积必然减小。

上述三个气体实验定律都是在压强不太大、温度不太低的情况下总结出来的。压强很大或温度很低时,气体已近液化,甚至变成固体,气体的实验定律就不再适用了。物理学中把严格遵循以上三个实验定律的气体称为 **理想气体** (ideal gas)。

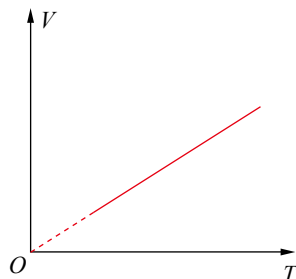


图 1-30 V - T 图像

从微观角度看,理想气体的分子大小与分子间的距离相比可忽略不计;除了碰撞外,分子间的相互作用可忽略不计。因此,理想气体的分子势能可忽略不计,其内能只是所有分子热运动动能的总和。所以,一定质量理想气体的内能只与气体的温度有关,而与气体的体积无关。

能用理想气体模型分析研究实际气体的问题;能从微观和宏观视角综合分析物理问题,有统计分析、逻辑推理的意识;能用分子动理论和统计观点解释气体压强和气体实验定律;能从不同角度分析解决物理问题,有质疑创新的意识。

——科学思维

例题

如图 1-31 所示,固定的竖直气缸内有一个活塞,活塞的质量为 m , 活塞横截面积为 S , 气缸内封闭着一定质量的气体。现对缸内气体缓慢加热,并在活塞上缓慢加沙子,使活塞位置保持不变。忽略活塞与气缸壁之间的摩擦,已知气缸内气体的初始热力学温度为 T_0 , 大气压强为 p_0 , 重力加速度大小为 g 。试求当所加沙子的质量为 M 时,气缸内气体的温度。

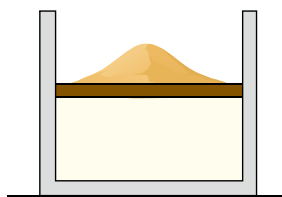


图 1-31 研究气缸内气体温度的示意图

分析

以气缸内的气体为研究对象。活塞位置保持不变,说明气缸内的气体为等容变化,遵循查理定律。气缸加热前气体的状态为初态,加热到热力学温度为 T 时的状态为末态。通过活塞受力平衡可分别求出气体初、末状态的气体压强。

解

用 T_1 、 p_1 和 T_2 、 p_2 分别表示气缸内的气体在初、末状态下的温度和压强。依题意有

$$\text{初态: } T_1 = T_0, p_1 = p_0 + \frac{mg}{S}$$

$$\text{末态: } T_2 = T, p_2 = p_0 + \frac{(m+M)g}{S}$$

根据查理定律

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

解得

$$T = \frac{p_0 S + (M+m)g}{p_0 S + mg} T_0$$

讨论

本题是在活塞上缓慢加沙子,以确保气缸的活塞位置不变。如果活塞上方是靠一根固定的轻杆顶着,当温度升高到 T 时轻杆对活塞的推力为多少?

策略提炼

运用气体定律分析问题,除了要选择有关的气体为研究对象,在确定气体的压强时,有时还需要选择与气体接触的物体作为研究对象。通过对这个研究对象进行受力分析,然后结合其运动状态建立压强与相关物理量的关系。



迁移

在上述例题中，已知最初缸内气体的高度为 h_0 。如果保持活塞上方所加的沙子不变，继续对气缸缓慢加热，活塞缓慢向上移动距离 h ，此时气缸内气体温度是多少？

能了解分子动理论的基本观点，能解释布朗运动和扩散现象，知道分子运动速率分布图像的物理意义，能了解气体实验定律的内涵；能用分子动理论和气体实验定律解释生活中的相关现象。具有和分子动理论与气体实验定律相关的物质观念、运动与相互作用观念。

——物理观念

素养提升



拓展一步

理想气体状态方程

以上我们研究气体状态的变化时，都只涉及两个物理量的变化。但在实际问题中，气体的压强、体积和温度这三个物理量往往是同时变化的。当这三个物理量同时变化时，又遵循什么规律呢？利用由实验得出的玻意耳定律和查理定律可推出这三个物理量的变化关系。

根据玻意耳定律，一定质量的理想气体，在温度不变时，压强与体积成反比，即

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

由查理定律可知，一定质量的理想气体，在体积不变时，压强与热力学温度成正比，即

$$p \propto T$$

综合以上结论可得

$$p = C \frac{T}{V}$$

即

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

上式反映了一定质量的理想气体状态发生变化时，压强、体积和温度变化所遵循的规律，称为理想气体状态方程。式中 C 是常量，与气体的种类和质量有关。



节练习

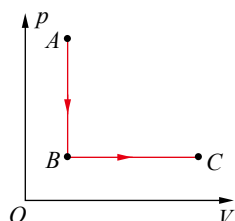
1. 冬季，将装有半瓶热水的暖水瓶放置一个夜晚，第二天拔瓶口的软木塞时会觉得很紧，不易拔出。这是为什么？

2. 中医常用“拔火罐”来治疗某些疾病。如图所示，将点燃的酒精棉放入一个小罐内，当酒精棉燃烧完时，迅速将火罐开口端紧压在皮肤上，此时火罐会被紧紧地“吸”在皮肤上。请解释这一现象。



第2题

3. 一定质量理想气体的压强 p 与体积 V 的关系如图所示。该气体由状态 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 ，下列关系式正确的是



第3题

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. $T_A = T_B$, $T_B < T_C$

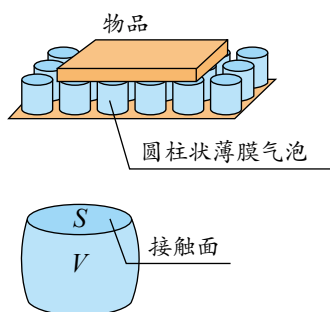
4. 一体积为 V_0 的气泡从池塘底慢慢浮起。若水深为 2 m，气泡从池底上升到水面时，它的体积将会如何变化？若水温保持不变，请查找相关数据，估算气泡的体积变为原来的多少倍。

5. 一种减震垫如图所示，上面布满了圆柱状薄膜气泡，每个气泡内充满体积为 V_0 、压强为 p_0 的气体。当平板状物品平放在气泡上时，气泡被压缩。若气泡内气体温度保持不变，当体积被压缩到 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。

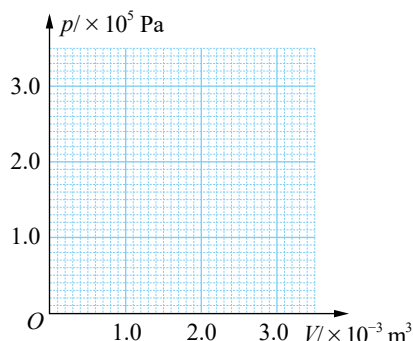
6. 内壁光滑的导热气缸竖直浸放在盛有冰水混合物的水槽中，用不计质量的活塞封闭压强为 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、体积为 $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 的理想气体。现在活塞上方缓慢倒上沙子，使封闭气体的体积变为原来的一半，然后将气缸移出水槽，缓慢加热，使气体温度变为 127°C 。（大气压强为 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ ）

(1) 求气缸内气体的最终体积。

(2) 在图中画出整个过程中气缸内气体的状态变化。



第5题



第6题

7. 汽车行驶时轮胎的胎压太高容易造成爆胎事故，太低又会造成耗油量上升。已知某型号轮胎能在 $-40 \sim 90^\circ\text{C}$ 正常工作，为使轮胎在此温度范围内工作时的最高胎压不超过 3.5 个标准大气压，最低胎压不低于 1.6 个标准大气压，那么，假设轮胎的体积不变，在 $t = 20^\circ\text{C}$ 时给该轮胎充气，充气后的胎压在什么范围内比较合适？

8. 试证明：一定质量的气体，当压强保持不变时，气体的密度和热力学温度成反比，即 $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1}$ 。

请提问



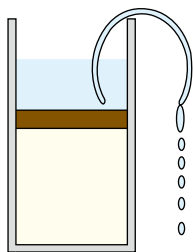
章末练习

科学认知

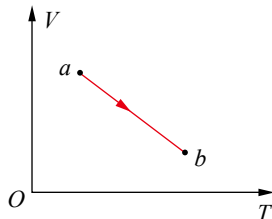
- 一定质量的气体，当温度保持不变时，压强随体积的减小而增大；当体积保持不变时，压强随温度的升高而增大。从微观角度看，使压强增大的这两个过程有何区别？
- 某次布朗运动实验得到的观测记录如图所示。图中记录的是
 - 分子无规则运动的情况
 - 某个微粒做布朗运动的轨迹
 - 某个微粒做布朗运动的速度—时间图线
 - 按等间隔时间依次记录的某个运动微粒位置的连线
- 如图所示，由导热材料制成的气缸和活塞将一定质量的理想气体封闭在气缸内，活塞与气缸壁之间无摩擦，活塞上方存有少量液体。将一细管插入液体，因虹吸现象，活塞上方的液体逐渐流出。在此过程中，大气压强与外界的温度保持不变。关于封闭在气缸内的理想气体，下列说法正确的是
 - 分子间的引力和斥力都增大
 - 在单位时间内，气体分子对活塞撞击的次数增多
 - 在单位时间内，气体分子对活塞的冲量保持不变
 - 气体分子的平均动能不变
- 如图所示，一定质量的理想气体从状态 a 沿直线变化到状态 b 。在此过程中，其压强
 - 逐渐增大
 - 逐渐减小
 - 始终不变
 - 先增大后减小



第2题



第3题



第4题

- 如图所示，哈勃瓶是一个底部开有圆孔、瓶颈很短的平底大烧瓶。在瓶内塞有一气球，气球的吹气口反扣在瓶口上，瓶底的圆孔上配有一个橡皮塞。在一次实验中，瓶内由气球和橡皮塞封闭一定质量的气体，对气球缓慢吹气，当瓶内气体体积减小 ΔV 时，压强增大 20%。若保持温度不变，使瓶内气体体积减小 $2\Delta V$ ，求体积减小前后瓶内气体压强的比值。
- 一太阳能空气集热器，底面及侧面为隔热材料，顶面为透明玻璃板，集热器容积为 V_0 。开始时内部封闭气体的压强为 p_0 。经过太阳暴晒，气体温度由 $T_0 = 300 \text{ K}$ 升至 $T_1 = 350 \text{ K}$ 。

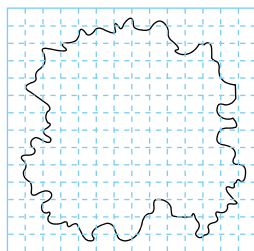


第5题

- 求此时气体的压强。
- 保持 $T_1 = 350 \text{ K}$ 不变，缓慢抽出部分气体，使气体压强再变回到 p_0 。求集热器内剩余气体的质量与原来总质量的比值。
- 已知地球半径为 R ，大气层的厚度为 h ， h 远小于 R 。空气平均摩尔质量为 M ，阿伏伽德罗常数为 N_A ，地面大气压强为 p_0 ，重力加速度大小为 g 。估算地球大气层空气分子总数。

科学探究

8. 在做“用油膜法估测油酸分子的大小”的实验时，将 0.3 mL 的油酸溶于酒精中制成 500 mL 的油酸酒精溶液。用注射器取适量溶液滴入量筒，测得每滴入 75 滴，量筒内的溶液增加 1 mL。用注射器把 1 滴这样的溶液滴入撒有爽身粉的浅水盘水面上，把玻璃板盖在浅水盘上并描出油酸膜边缘轮廓，如图所示。已知玻璃板上小正方形的边长为 1 cm，则油酸膜的面积约为多少平方米？由以上数据，估算出油酸分子的直径。（结果保留 2 位有效数字）



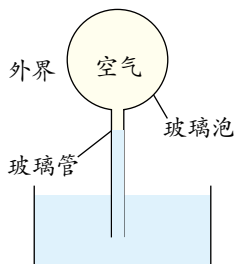
第 8 题

9. 某同学在做“探究等温情况下一定质量气体压强与体积的关系”的实验时，将测得的数据列于下表。他发现，第 5 组数据中的 pV 值有较大偏差。如果读数和计算无误，请问造成此偏差的原因可能是什么？

实验序号	1	2	3	4	5
$p/\times 10^5 \text{ Pa}$	1.21	1.06	0.93	0.80	0.66
V/mL	33.2	37.8	43.8	50.4	69.2
$pV/(\times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{mL})$	40.2	40.1	40.7	40.3	45.7

科学辨析

10. 伽利略设计的一种测温装置如图所示，玻璃管的上端与导热良好的玻璃泡连通，下端插入水中，玻璃泡中封闭有一定质量的空气。若玻璃管内水柱上升，则外界大气的温度和压强可能如何变化？请陈述你的理由。



第 10 题

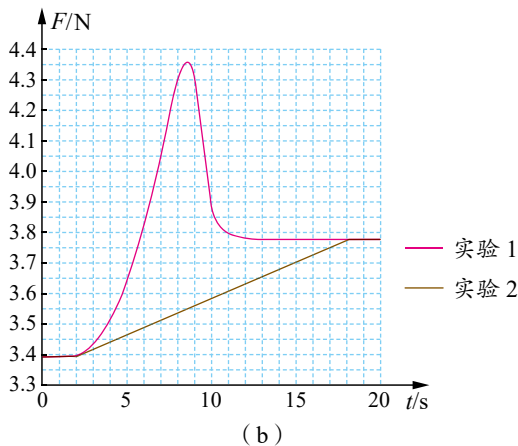
温故知新

11. 建造重庆长江大桥复线桥需将长约百米、重千余吨的钢梁从江水中吊起 [图 (a)]。施工时采用了将钢梁与水面成一定倾角出水的起吊方案。为了探究该方案的合理性，某研究性学习小组做了两个模拟实验：探究将钢板从水下水平拉出（实验 1）和以一定倾角拉出（实验 2）的过程中总拉力的变化情况。

- (1) 必要的实验器材：钢板、细绳、水盆、水、支架、刻度尺、计时器和_____等。
- (2) 根据实验曲线 [图 (b)]，实验 2 中的最大总拉力比实验 1 中的最大总拉力降低了_____N。
- (3) 根据分子动理论，实验 1 中的最大总拉力明显增大的原因是_____。
- (4) 可能导致测量拉力的实验误差的原因有读数不准、钢板有油污、_____、_____等。



(a)



第 11 题



第2章

固体与液体

导 入 认识固体与液体

第1节 固体类型及微观结构

第2节 表面张力和毛细现象

第3节 材料及其应用

►►本章学业要求

- 能了解固体的微观结构，知道晶体和非晶体的特点，了解液晶的主要性质，知道表面张力产生的原因和毛细现象，了解材料科学的有关应用；能从微观角度解释生活中与固体、液体有关的现象。具有与固体、液体相关的物质观念。——物理观念
- 能用固体与液体的微观模型分析问题；能从固体和液体的微观结构推断其性质；能使用证据说明晶体和非晶体的特点；能采用不同方式分析解决物理问题，有质疑创新的意识。——科学思维
- 能通过观察发现生活中可探究的问题；能自主设计相关实验方案，进行观察，收集信息，形成结论；能用已有物理知识进行解释；能自主完成实验研究论文，能与他人交流结果。——科学探究
- 能从材料科学的发展中体会不同学科相互促进、共同发展的重要性；能主动了解材料科学的发展前沿；能体会材料科学的发展对人类生活和社会发展的影响，正确认识科技对社会进步的推动作用。

——科学态度与责任

导 入

认识固体与液体

教室里的粉笔、美术课上洁白的模型、固定骨折部位的材料等，它们的主要成分都有石膏。

石膏是一种固体矿物。地层中的石膏，并非我们熟悉的白色粉末，而是光泽闪亮、棱角分明的晶体。



自然界中的石膏晶体



水黾在水面上行走

液体常常表现出一些特殊的性质：水黾可在水面上行走，如履平地；从水中提出毛笔，笔锋会收拢；雨滴、奶滴、油滴和液态金属滴看起来都似球形……

水携带着营养，可从植物的根部到达顶端的枝叶；酒精灯里的酒精可自动到达灯芯……

固体、液体表现出的这些形形色色的现象背后蕴藏着什么规律？人类应怎样合理利用这些固体、液体材料？本章，我们将从了解固体、液体的结构开始探索这些问题。

第1节

固体类型及微观结构

人类对天然固体的加工和应用可追溯到远古的穴居时代，当时的原始人类就己能将石块磨制成简单器具（图 2-1），用于狩猎和农耕等活动。

随着社会发展和科技进步，固体在生产生活中的应用越来越广泛。我们用的笔、纸、家具，穿戴的衣帽，居住的房屋，行走的道路、桥梁等，都是用固体材料制作、建造而成的。

固体可分为哪些类型？其微观结构如何？本节我们将学习有关内容。



图 2-1 我国浙江吴兴出土的新石器时代的耘田器

1. 晶体和非晶体

固体通常可分为晶体和非晶体两大类。晶体具有固定的熔点和沸点，其分子的空间排列有规律。我们日常食用的糖、盐等都是晶体；金、银、铜、铁、锡、铝等固态金属，以及一些金属矿石（图 2-2），也都是晶体。非晶体没有固定的熔点和沸点，其分子的空间排列没有规律。玻璃、蜂蜡、松香、沥青、橡胶等属于非晶体。

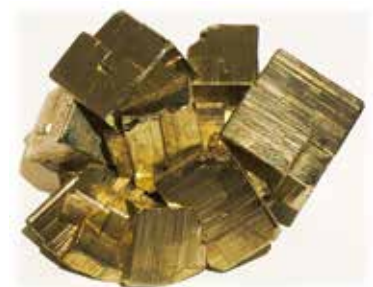


图 2-2 黄铁矿晶体

通过大量的观察和研究，人们发现，晶体可分为单晶体和多晶体两类。单晶体具有规则的几何形状，外形都是由若干个平面围成的多面体。例如，食盐晶体是立方体，纷飞的雪花（图 2-3）虽然形状各异，但都呈六角形。多晶体没有规则的几何形状，通过显微镜观察其表面会发现，它们都是由大量细微的单晶体杂乱无章地排列在一起构成的（图 2-4）。



图 2-3 雪花晶体



图 2-4 某金属表面的显微图像

单晶体和非晶体不仅在外形上有区别，在物理性质上也不相同。下面我们通过实验来探究。



迷你实验室

研究云母片和玻璃板的导热性

在云母片的上表面涂上一层很薄的石蜡，然后用烧热的钢针针尖接触云母片的下表面，不断将热量传递给云母片，结果接触点周围的石蜡熔化了，熔化了的石蜡呈椭圆形（图 2-5）。这表明单晶体云母片在不同方向上的导热性是不同的。

用玻璃板代替云母片重做上面的实验，熔化了的石蜡呈圆形（图 2-6），这表明非晶体玻璃在不同方向上的导热性相同。

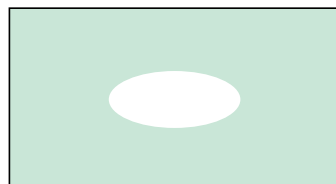


图 2-5 云母片的导热性

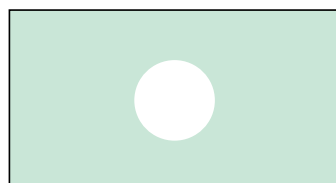


图 2-6 玻璃板的导热性

大量研究表明，单晶体在各个方向上的力学、热学、电学、光学等物理性质不一定相同，我们把这种特性称为**各向异性**（anisotropy）。非晶体在各个方向上的物理性质通常是相同的，我们把这种特性称为**各向同性**（isotropy）。对于多晶体而言，小晶粒的排列是杂乱无章的，每个小晶粒各向异性的特征相互抵消，在各个方向上的物理性质几乎相同，表现为各向同性。

晶体的另一个基本特性是在一定压强下有固定的熔点。在加热过程中先是温度升高，当温度达到熔点时晶体开始熔化，熔化过程中固态与液态共存，温度保持在熔点不变，直到晶体全部熔化为液体后，继续加热，液体温度才会再度升高，如图 2-7 中曲线 A 所示。非晶体没有固定的熔点。在加热过程中随着温度的升高，它先是变软，然后逐渐由稠变稀，最终完全变为液体，如图 2-7 中曲线 B 所示。

晶体与非晶体在一定的条件下还可相互转化，如非晶态的玻璃经过加热冷却反复处理，可使其结构有序化，变为多晶体；传统的金属晶体经过急冷处理，可制得非晶态金属——金属玻璃（图 2-8）。金属玻璃具有金属材料通常不具备的特性：较高的强度，很好的韧性、耐蚀性和磁性等。

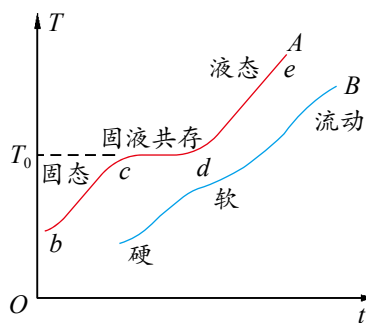


图 2-7 晶体和非晶体的熔化过程示意图



图 2-8 金属玻璃薄带



2.固体的微观结构

如果用点表示固体内部的物质微粒，把它们的排列方式画出来，可发现：单晶体内部，在不同方向的等长线段（图2-9中的 AD 、 BE 、 CF ）上，微粒的个数通常是不相等的，这说明单晶体在不同方向上的微粒排列及物质结构情况是不一样的，所以单晶体在物理性质上表现为各向异性；在非晶体内部，物质微粒的排列是杂乱无章的（图2-10），从统计的观点来看，在微粒非常多的情况下，在不同方向的等长线段上，微粒的个数大致相等。也就是说，非晶体在不同方向上的微粒排列及物质结构情况基本相同，所以非晶体在物理性质上表现为各向同性。

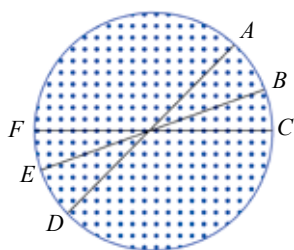


图2-9 单晶体内微粒排列的示意图

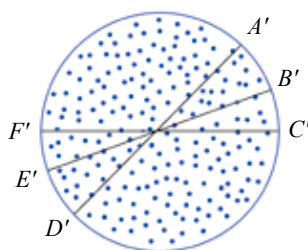


图2-10 非晶体内微粒排列的示意图

同种物质微粒在不同的条件下有可能生成不同的晶体，虽然构成这些晶体的物质微粒都相同，但是由于它们的排列形式不同，物理性质也不同。金刚石、石墨都是由碳原子构成的晶体，但是由于它们的物理性质有很大差异。金刚石晶体中的每一个碳原子周围都有四个碳原子，它们彼此之间的距离相等，且有很强的相互作用力（图2-11）。金刚石是自然界中硬度最大的物质，可用来切割玻璃，能钻透坚硬的岩层。金刚石几乎不导电。石墨晶体中的每一个碳原子同相邻的四个碳原子之间的距离不相等，呈明显的层状结构，每层中的碳原子都排成六边形（图2-12）。由于层与层之间的距离较大，碳原子之间的作用力较弱，沿着这个方向很容易把石墨一层层地剥离。石墨较软，常用来制造润滑剂，铅笔芯的主要成分也是石墨。石墨有良好的导电性。

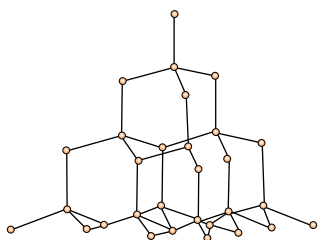


图2-11 金刚石晶体的结构示意图

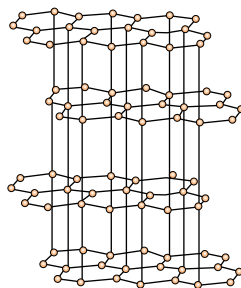


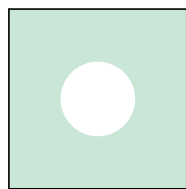
图2-12 石墨晶体的结构示意图

晶体熔化过程中，温度不变，只有在熔化完成后，温度才会升高，这是因为晶体在熔化成液体的过程中，规则排列的分子之间的距离要增加，分子间的作用力表现为引力，外界提供的热量用来克服分子的引力做功，使分子势能增大，而分子平均动能不变，所以熔化过程中温度不变，吸收的热量只转化成分子势能。

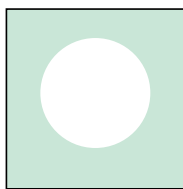


节 练 习

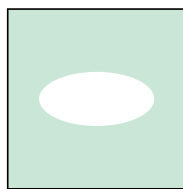
- 晶体具有哪些宏观特征？试从微观结构上对这些特征进行解释。
- 晶体在熔化过程中吸收的热量主要用于
 - 增加分子动能
 - 增加分子势能
 - 增加分子势能和分子动能
 - 不增加分子势能和分子动能
- 下列说法正确的是
 - 固体可分为晶体和非晶体两类，有些晶体在不同方向上有不同的光学性质
 - 由同种元素构成的固体，可能会因原子的排列方式不同而成为不同的晶体
 - 在合适的条件下，某些晶体可转变为非晶体，某些非晶体也可转变为晶体
 - 在熔化过程中，晶体要吸收热量，但温度保持不变，内能也保持不变
- 在甲、乙、丙三种固体薄片的上表面涂一层很薄的石蜡，用烧热的钢针接触固体薄片的下表面，石蜡熔化的范围分别如图(a)(b)(c)所示，而甲、乙、丙在熔化过程中温度随加热时间变化的关系如图(d)所示，下列说法正确的是
 - 甲、乙为非晶体，丙为晶体
 - 甲、丙为晶体，乙为非晶体
 - 甲、丙为非晶体，乙为晶体
 - 甲为多晶体，乙为非晶体，丙为单晶体



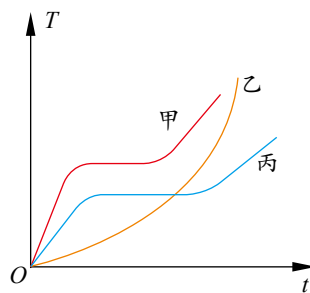
(a)



(b)



(c)



(d)

第4题



请提问

第2节

表面张力和毛细现象

水黾可在水面上跳来跳去，回形针可漂于水面（图 2-13）；水滴在蜡纸上近似球形，可来回滚动而不会附着在蜡纸上；水滴在洁净的玻璃上不仅不收缩成球形，还会沿着玻璃面向外扩展。这些现象的背后有着怎样的规律呢？本节我们将学习液体的表面张力和毛细现象，探索这些现象的奥秘。



图 2-13 漂于水面的回形针

1. 表面张力

为什么叶面上的小露珠、飞溅的小液滴等近似呈球形呢？下面让我们来做实验。



迷你实验室

观察肥皂膜的变化

（1）将细铁丝弯成 U 字形，再将另一细铁丝的两端弯曲制成滑杆。把该铁丝框完全浸入肥皂液中，缓慢水平地提出液面。轻轻向外拉滑杆，然后释放滑杆，你会观察到什么现象（图 2-14）？

（2）把一个棉线圈系在铁丝环上，将它们完全浸入肥皂液中，然后缓慢地提出液面，这时肥皂膜上的棉线圈是松弛的。刺破棉线圈里的那部分肥皂膜，你会观察到什么现象（图 2-15）？



图 2-14 U 形铁丝框肥皂膜实验现象

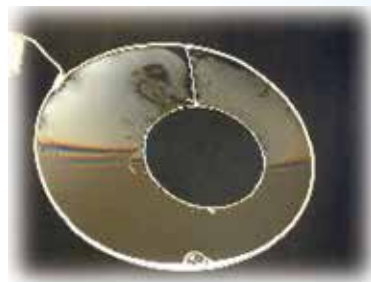


图 2-15 铁丝环肥皂膜实验现象

由实验可知，液体表面有一种收缩的趋势。为什么液体表面具有收缩趋势呢？

在液体内部，分子完全被其他分子包围，分子间的距离几乎等于分子力平衡的距离，分子间的作用力约等于零。液体与气体接触的表面存在一个薄层，即表面层。表面层分子的分布比液体内部稀疏，分子间的距离略大于分子力平衡的距离（图 2-16），分子间的作用力表现为引力。假想一条分界线 OO' 将液面分割成 A 、 B 两部分（图 2-17）。由于表面分子之间的引力作用， A 、 B 两部分的液体之间就有相互作用， A 部分对 B 部分的引力为 F_A ，使分界线 OO' 向 A 部分收缩； B 部分对 A 部分的引力为 F_B ，使分界线 OO' 向 B 部分收缩。 F_A 和 F_B 大小相等、方向相反。这种液体表面各部分间的相互引力，称为**表面张力**（surface tension）。表面张力使液体表面绷紧，液体就像被一层绷紧的弹性膜覆盖着。

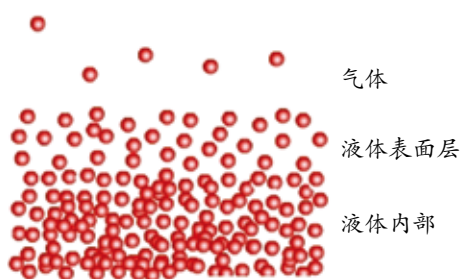


图 2-16 液体表面分子分布示意图

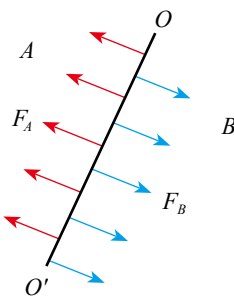


图 2-17 液体表面张力示意图

液体表面张力产生的这种“薄膜”，可使小昆虫在水面上行走或停留，也可使小硬币漂在水面上。小昆虫的脚踩在水面上，水的表面张力有使水面保持原来平坦形状的趋势，因而小昆虫在水面上的每只脚都受到水面支持力的作用，只要小昆虫的质量不太大，就可在水面上行走自如。

因为表面张力的作用，液体表面总有要收缩到表面积最小的趋势，所以雨滴、奶滴、油滴等液滴的外形就近似呈现球形；若重力的影响明显，其外形就呈现为椭球形；在完全失重的环境下，液滴能收缩成标准的球形。2013 年我国航天员在“天宫一号”进行世界瞩目的太空授课，其中的水球便是球形（图 2-18），展示了失重环境下液体表面张力的特性。



图 2-18 “太空授课”中的水球

2. 浸润与不浸润

表面张力是在液体与气体间的接触面上呈现的特殊现象。那么，液体和固体间的接触面又会出现怎样的现象呢？



不同固体材料表面上的水

- (1) 取一小块洁净的玻璃，用滴管将一滴清水滴到玻璃上，观察水滴的变化。
- (2) 取一小张蜡纸，用滴管将一滴清水滴到蜡纸上，观察水滴的变化。

由实验可见，液体与固体接触时会出现两种不同的现象：在洁净玻璃上的水滴扩展形成薄层，附着在玻璃上并把玻璃浸湿，这种液体润湿某种固体并附着在该固体表面上的现象称为**浸润**；在蜡纸上的水滴可来回滚动而不会扩展成薄层附着在蜡纸上，这种液体不润湿某种固体也不附着在该固体表面上的现象称为**不浸润**。为什么会出现浸润与不浸润现象呢？

当液体跟固体接触时，在接触处会形成一液体薄层，称为附着层。附着层中的液体分子一方面受到液体内部分子的吸引力（内聚力），另一方面受到固体分子的吸引力（附着力）。液体能否浸润固体由内聚力和附着力的 大小 决定。如果内聚力大于附着力，这时跟固体接触的液体表面有缩小的趋势，形成不浸润现象。相反，如果附着力大于内聚力，这时跟固体接触的液面有扩展的趋势，形成浸润现象。

把水装在玻璃管里，由于水浸润玻璃，器壁附近的液面沿器壁向上扩展，水面呈凹面。把水银装在玻璃管里，由于水银不浸润玻璃，器壁附近的液面沿器壁下移，水银面呈凸面（图2-19）。

在日常生活中，有时我们希望液体浸润固体。例如，毛巾都是用能被水浸润的织物做成的；洗衣服使用的合成洗涤剂内加有能浸润油污的物质，在洗涤过程中能带走衣物上的油污。有时我们不希望液体浸润固体。例如，在生产雨伞时，就应尽量选择不容易被雨水浸润的布料，以便更好地防水。



(a) 水浸润玻璃

(b) 水银不浸润玻璃

图2-19 浸润与不浸润

3.毛细现象

水在玻璃管中会出现凹面，水银在玻璃管中会出现凸面。如果减小或增大玻璃管的内径，管内的水和水银将会出现怎样的现象呢？



迷你实验室

内径不同的细玻璃管插入不同的液体中

(1) 把几根内径不同的细玻璃管插入水槽中，观察管内水面形状，并比较几根玻璃管中水面的高度（图 2-20）。

(2) 把这些细玻璃管再插入水银槽中，观察管内水银面形状，并比较几根玻璃管中水银面的高度（图 2-21）。

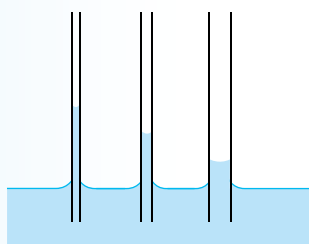


图 2-20 不同玻璃管中水面高度示意图

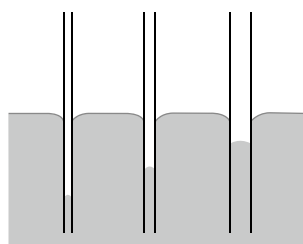


图 2-21 不同玻璃管中水银面高度示意图

在实验中我们看到，几根内径不同的细玻璃管插入水槽中，水面呈凹面；管内水面比容器内水面高，管内径越小，水面越高。把细玻璃管插入水银槽中，发生的现象则正好相反，水银面呈凸面；管内水银面比容器内水银面低，管内径越小，水银面越低。

浸润液体在细管里上升的现象和不浸润液体在细管里下降的现象，称为**毛细现象**。能发生毛细现象的管称为毛细管。

浸润液体与毛细管内壁接触时，液体表面弯曲，呈凹形。表面张力的收缩作用总是力图使凹形表面的面积缩小，形成向上的作用力（图 2-22），对液体产生向上的提拉作用，于是管内液体上升，直到表面张力向上的提拉作用与管内升高的液柱所受的重力达到平衡时，管内液体才停止上升，稳定在一定的高度。不浸润液体在毛细管里下降则是由于表面张力的收缩作用总是力图使凸形表面的面积减小，形成向下的作用力（图 2-23），使液体向下运动而导致的。

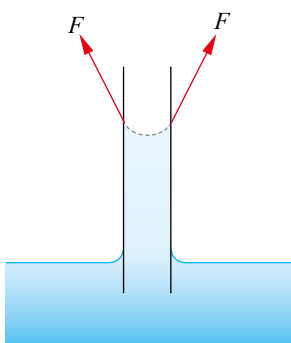


图 2-22 形成向上作用力的示意图

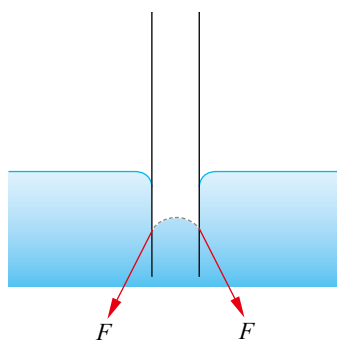


图 2-23 形成向下作用力的示意图



砖块吸水，粉笔吸墨水，都是常见的毛细现象。在纸张、棉花、毛巾、粉笔、木材、土壤、砖块等物体内部，有许多细小的孔道，起到毛细管的作用。在生命活动过程中，毛细现象也很重要。例如，植物根部的水分上升到顶部的枝叶里，部分原因是毛细现象（图2-24）。土壤里有很多像毛细管一样的细小孔道，土壤中的水分可沿着它们上升到地面。如果要保存土壤中的水分，就要把地表土壤锄松，破坏土壤表层的毛细管；如果想把地下的水分引上来，就需要保持土壤里的毛细管，还要使它们变得更细，这时就要压紧土壤。



图 2-24 红色液体通过植物的毛细管上升

能了解固体的微观结构，知道晶体和非晶体的特点，知道表面张力产生的原因和毛细现象；能从微观角度解释生活中与固体、液体有关的现象。具有与固体、液体相关的物质观念。

——物理观念

素养提升

4. 液晶

1888年，奥地利植物学家莱尼茨尔（F. Reinitzer，1857—1927）把一种有机物的晶体放在试管里加热，观察它熔化的情况。温度升到 145.5°C 后，不再上升，晶体开始熔化成乳白色浑浊流体。在晶体全部熔化以后，流体的温度随之升高。可是，当温度升到 178.5°C 时，温度竟又一次停止上升，而且浑浊的流体开始变得清亮，最后完全透明。难道这种晶体有两个熔点？这种乳白色的浑浊流体是什么？

研究发现，温度在 $145.5 \sim 178.5^{\circ}\text{C}$ 的这种有机物流体，既有液体的流动性质，又有晶体的某些电学和光学性质，分子在某些方向的排列比较整齐，具有各向异性。物理学中把这种既具有像液体那样的流动性和连续性，又具有像晶体那样的各向异性特点的流体，称为**液晶**（liquid crystal）。图2-25为晶体、液晶和液体的分子排列示意图。

外界条件的微小变化，会引起液晶分子排列的变化，从而改变液晶的某些性质。例如，温度、压力、摩擦、电磁作用、容器的表面差异等，都可能改变液晶的光学性质，这些性质使液晶有着广泛的应用。

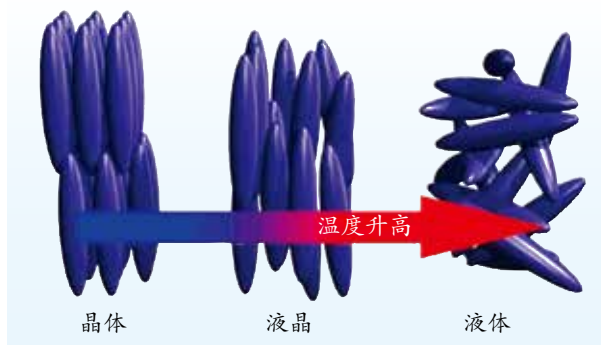


图 2-25 晶体、液晶和液体的分子排列示意图



彩色液晶显示屏

在外加电压影响下，液晶的分子排列会发生改变，使液晶由透明变为不透明，去掉电压又恢复透明。控制电压，就可让液晶像闸门一样阻隔光线或让光线穿过（图 2-26），其作用相当于光开关。利用液晶的这种性质可制造各种液晶显示屏。

液晶显示屏的关键部件是液晶层。将液晶层置于成千上万的透明电极之间，每个电极包含在细小的单元格结构中，一个或多个单元格构成屏幕上的一个像素。在电压控制下，某些单元格透光，对应的像素为白色；某些单元格不透光，对应的像素为黑色。大量按一定规律出现的白、黑像素点便形成了黑白图像。

彩色液晶显示屏的每一个像素都由三个单元格构成，分别对应红色、绿色和蓝色的过滤片，利用三原色原理就可组合出不同的色彩（图 2-27）。

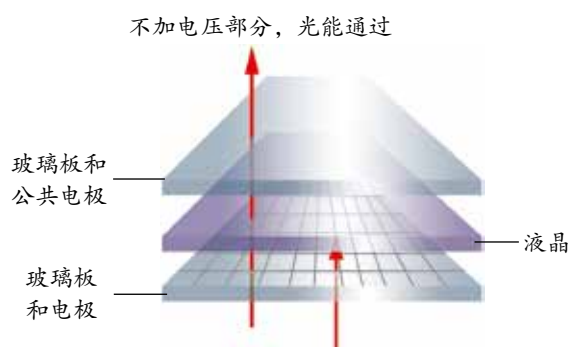


图 2-26 液晶显示屏的显示原理示意图



图 2-27 彩色液晶显示屏

液晶在温度改变时会改变颜色。随着温度的升高，色彩按红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫的顺序变化，温度下降时又按相反顺序变色，而且灵敏度很高，在不到 1°C 的温差内就可显出整个色谱。利用液晶的这种温度效应可探测温度。液晶在医学上可用来探查肿瘤。在皮肤表面涂上一层液晶，因肿瘤温度与周围正常组织的温度不同，液晶就会显示出不同颜色。此外，还可用液晶制造显示体温的帽子、显示气温的日历。液晶还可用来探测微电路中的热点（短路处），检查制冷机的漏热等。图 2-28 是将手放在液晶上，液晶颜色发生变化的情况。

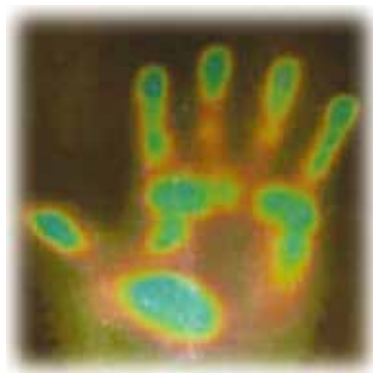
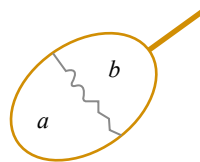


图 2-28 手的温度使液晶颜色变化

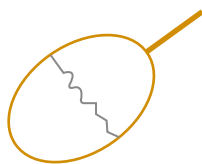


节 练 习

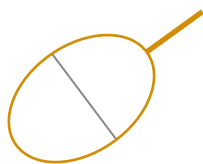
1. 在农作物生长期，常需要松土。这样做是为了加快还是减慢土壤中水分的蒸发？为什么？
2. 在多雨季节，楼房底层住户家的地面为什么会潮湿？如何防止？
3. 如图所示，把一条细棉线的两端系在铁丝环上，棉线处于松弛状态。将铁丝环浸入肥皂液里，拿出来时环上留下一层肥皂液的薄膜，这时薄膜上的棉线仍是松弛的。用烧热的针刺破 a 侧的薄膜，观察到棉线的形状为



第3题



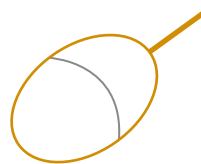
A



B

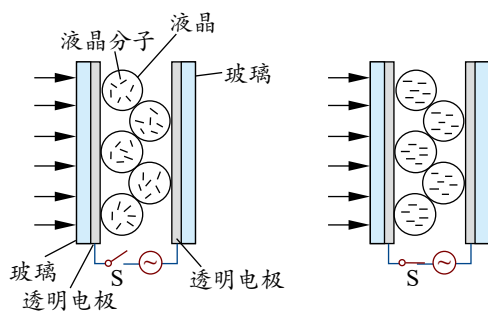


C



D

4. 下列说法正确的是
 - A. 把一枚针轻放在水面上，它会漂在水面，因为水表面存在表面张力
 - B. 水在涂有油脂的玻璃上能形成水珠，在洁净的玻璃上却不能，因为油脂使水的表面张力增大
 - C. 在围绕地球飞行的宇宙飞船中，自由飘着的水滴呈球形，这是表面张力作用的结果
 - D. 毛细管中的液面有的升高，有的降低，这与液体种类和毛细管材质有关
5. 关于液晶，下列说法正确的是
 - A. 液晶是一种晶体
 - B. 液晶分子的空间排列是稳定的，具有各向异性
 - C. 液晶的光学性质随温度的变化而变化
 - D. 液晶的光学性质随光照的变化而变化
6. 如图所示，通电雾化玻璃是将液晶膜固化在两片玻璃之间，未通电时，看起来像一块毛玻璃，不透明；通电后，看起来像一块普通玻璃，透明。通电雾化玻璃能满足玻璃的通透性和保护隐私的双重要求，被广泛应用于各领域。请根据液晶的特点，分析其工作原理。



第6题

请提问



第3节

材料及其应用

制造不同的物品，对所用材料的性能有不同的要求。例如，桥梁要坚固，才能承载各种重物；衣服要柔软，才不会妨碍身体各部位的活动；窗户要透明，才能使室内有充足的阳光……材料对于人类社会的发展有着怎样的影响？本节我们将学习有关内容。

1.材料对人类社会的影响

从石器时代、青铜时代、铁器时代到信息时代，人类在不同时代对材料的开发与应用有所不同。每一种重要材料的开发和应用，都把人类文明推向一个新的阶段。

远古，人们选择石器作为工具，因为石头是当时人们所能找到的自然界中最硬的材料。然而，石器虽硬却容易断裂，不易加工。原始社会绵延了二三百万年，只能使用效率低下的以石器为主的生产工具，生产力发展极其缓慢。青铜是人类制造和应用最早的一种合金材料，青铜工具的出现与使用给农业和手工业生产以更强大的力量，为我国夏、商、西周时期的繁荣与发展注入了新的活力。然而，青铜器的制作成本较高，所以当时用它制作的工具，特别是农具的数量，远不如供贵族使用的礼乐用品多（图2-29）。到了战国晚期，铁制农具的出现为当时我国带来了相对发达的生产力，促进了中华文明的发展。



图 2-29 河南安阳出土的商代青铜礼器——司母戊鼎

当历史进入 20 世纪下半叶，新材料已经成为各个高技术领域发展的突破口，并在很大程度上影响着新兴产业的发展进程。例如，半导体材料促进了计算机技术的发展；耐高温高强度的结构材料推动了航天技术的发展；低消耗的光导纤维引领了光纤通信技术的发展……材料已经与信息、能源一起，被当今国际社会公认为现代文明的三大支柱。

2.材料的种类

每一种材料都有自己的特性。按照材料的特性，可将材料分为结构材料和功能材料两类。结构材料主要利用材料的力学特性，功能材料主要利用材料的声、光、热、电、磁



等特性。按照材料的应用领域,又可将材料分为信息材料、能源材料、建筑材料、生物材料、航空航天材料等。习惯上,人们把材料分为金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料。

金属材料一般包括金属与合金。合金是由两种或两种以上的金属,或者金属与非金属结合而成的具有金属特性的材料。例如,钢是铁和碳的合金,再加上铬就成了不锈钢,不锈钢具有很强的耐腐蚀性,广泛用于制造餐具、外科手术器械及化工设备等。

无机非金属材料主要有陶瓷和玻璃等。传统的陶瓷材料主要用于制造碗、碟、卫生洁具等日常生活用品。如今,陶瓷新材料有惊人的耐腐蚀性能,能耐受强碱氢氧化钠、几乎所有的无机酸及有机酸的腐蚀,同时它又是一种高性能的电绝缘材料,在现代工业和航空航天领域得到了广泛的应用。

有机高分子材料是由含碳、氢、氧、氮、硅、硫等元素的有机化合物构成的材料。塑料、合成纤维和合成橡胶这三大合成高分子材料,已经成为生产和生活中必不可少的重要材料。例如,人工合成的有机玻璃不但具有玻璃的各种优点,而且非常坚韧,即使受到猛烈撞击也不易破碎,可用于制造飞机的座舱盖及汽车的挡风玻璃,还可用于制造文具、乐器(图2-30)和工艺品等。



图2-30 用有机玻璃制成的提琴

复合材料是由以上几类不同材料通过复合工艺组合而成的新型材料。它既能保留原组成材料的主要优点,又能通过复合效应获得原组合成分所不具备的性能,还可通过材料设计使各组合成分的性能互相补充并彼此关联,从而获得新的优越性能。例如,玻璃钢、碳纤维和陶瓷复合材料等新型复合材料具有强度高、耐腐蚀、刚性好、质量轻等优良特性,在许多方面都得到了应用(图2-31)。



图2-31 用碳纤维制成的自行车

3.材料的应用

随着材料科学与技术的飞速发展,各种具有独特性能的材料层出不穷,使人类生活和社会发展对材料的新需求不断得到满足。下面介绍三种典型材料的应用。

(1) 半导体

半导体是具有优异特性的微电子材料。从导电性能上看,半导体的电阻率介于金属导体(电阻率 $< 10^{-3} \Omega \cdot m$)和绝缘体(电阻率 $> 10^{12} \Omega \cdot m$)之间。微电子工业中使用的半导体材料主要是硅和砷化镓。硅的机械强度高,结晶性好,在自然界中储量丰富,成本低,是制造晶体管和集成电路的主要材料。在微电子工业中,集成块是利用集成工艺将晶

体管、电阻、电容及它们之间的连线集成在一块半导体芯片上制成的(图2-32)。集成电路是电子设备最重要的元件之一。

随着半导体器件的特性尺寸越来越接近原子极限,越来越多的新器件概念被提出,如自旋器件、铁磁存储器、量子晶体管等。

半导体是电子信息产业的基础,是许多工业整机设备的核心,作为芯片、存储器等应用在计算机、通信、军事、工业医疗等各个领域。半导体技术在各个领域的应用大大提高了生产效率,为人们带来各种便利,同时极大地推动着社会的文明和进步。



(a) 单晶硅及单晶硅片



(b) 蚀刻在单晶硅片上的集成电路

图 2-32 从单晶硅到电路芯片



科学书屋

发光二极管与 LED 灯

发光二极管,通常也简称为 LED,由含镓(Ga)、砷(As)、磷(P)、氮(N)等的化合物制成。发光二极管是半导体二极管的一种,可把电能转化成光能,发光效率高。与白炽灯泡和氖灯相比,由发光二极管组成的 LED 灯的工作电压低,工作电流小,抗震性能好,寿命长,使用方便,因此得到广泛应用(图2-33)。随着 LED 技术的发展、新型光学设计的突破、新灯种的开发等,LED 显示屏和 LED 照明将会更加广泛地应用于生产生活实际。



图 2-33 发光二极管和造型别致的 LED 灯

(2) 纳米材料

纳米是长度单位, $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ 。粒度在 $1 \sim 100 \text{ nm}$ 的材料称为纳米材料。人们发现,当材料小到纳米尺度时,其力、热、声、光、磁等方面的某些性能会突变。碳纳米管(图2-34)是目前纳米材料研究领域的热点之一。碳纳米管是由碳原子层卷曲而成的碳管,管直径一般为几纳米到几十纳米,管壁厚度仅为几纳



图 2-34 碳纳米管示意图



米，五万根碳纳米管集中起来也只有人的一根头发丝粗。它的成分和石墨一样，但韧性很高，导电性极强，兼具金属和半导体的特性。

纳米材料在短短的十几年中发展十分迅速，填补了一个曾被忽略了的小尺度材料科学研究的空白，使人们对物质世界的认识又向前迈进了一大步；同时，它也为新型材料的发明开辟了一个崭新的天地，显示出强大的生命力。纳米材料的应用范围十分广泛，如在文物保护方面，利用溶胶与凝胶相结合的方法，把新研制的纳米材料制成一种透明的胶体，涂在文物表面，可形成一种“无机膜”，使文物完全与外界隔离，有利于文物的长期保护。

(3) 石墨烯

石墨烯是人们发现的第一种由单层原子构成的材料，碳原子之间相互连接成六角网格（图 2-35）。石墨烯存在于自然界中，但难以剥离出单层结构。石墨烯一层层叠起来就是石墨，铅笔里用的石墨就相当于无数层石墨烯叠在一起。2004 年，英国曼彻斯特大学的科学家盖姆（A. Geim）和诺沃肖洛夫（K. Novoselov）从石墨中剥离出仅由一层碳原子构成的薄片，即石墨烯。

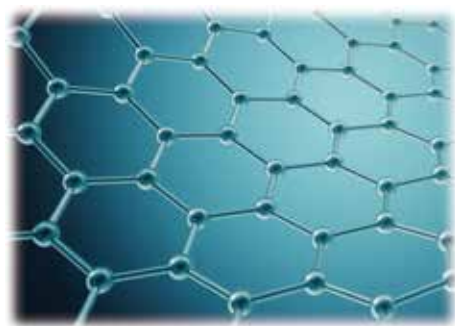


图 2-35 碳原子组成的六边形结构示意图

石墨烯具有优异的光学、电学、力学特性，是已知强度最高的材料之一，并且能弯曲，有很好的韧性。石墨烯可制作传感器，其灵敏度可与单分子检测的极限相比拟；还可用来制作晶体管，这种晶体管在接近单个原子的尺度上依然能稳定地工作。作为柔性显示屏（图 2-36）的基础材料，石墨烯的发展前景备受瞩目。石墨烯的研究与应用在化学、材料、物理、生物、环境、能源等众多学科领域已取得了一系列重要进展。

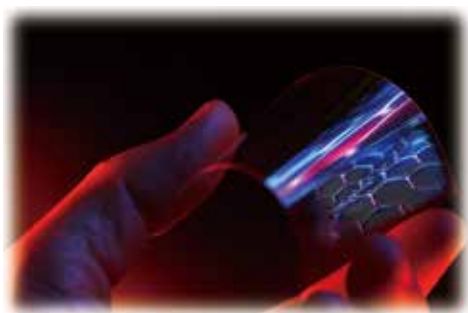


图 2-36 柔性透明显示屏

能从材料科学的发展中体会不同学科相互促进、共同发展的重要性；能主动了解材料科学的发展前沿；能体会材料科学的发展对人类生活和社会发展的影响，正确认识科技对社会进步的推动作用。

——科学态度与责任

素养提升



节 练 习

1. 谈谈纳米材料的研究和应用以及可能存在的问题。
2. 查阅资料，谈谈发光二极管的工作原理。说明为什么 LED 灯的应用越来越广泛。
3. 查阅资料，了解历史悠久、驰名世界的古代“中国漆”的特点，并说明其有哪些应用。



章末练习

科学认知

1. 一支洗净的毛笔浸在水中时, 笔锋是松开的; 当它被提出水面后, 笔锋会聚在一起。这是什么原因?
2. 从布雨伞的纱线间可看见空隙, 为什么下小雨时却不漏水? 下大雨时情形会如何? 做雨伞最好选用什么样的布料?
3. 准备两枚壹角硬币、两支滴管、约 10 mL 清水和食用油。先将水轻轻滴在一枚硬币上, 观察硬币上水面的情况, 记录硬币表面可承担的水滴数; 再将食用油滴到另一枚硬币上, 重复上述实验。比较记录的结果, 你发现了什么? 请解释原因。
4. 下列说法正确的是
 - A. 将一块晶体敲碎后, 得到的小颗粒是非晶体
 - B. 有些晶体在不同方向上有不同的光学性质
 - C. 元素相同, 也可能因原子排列方式不同而成为不同的晶体
 - D. 在合适的条件下, 某些晶体与非晶体之间可相互转化
5. 关于液体的表面张力, 下列说法正确的是
 - A. 液体表面张力使其体积有收缩到最小的趋势
 - B. 液体表面层的分子分布比内部密
 - C. 液体表面张力使其表面积有收缩到最小的趋势
 - D. 液体表面层分子之间只有引力而无斥力
6. 下列现象中, 可用液体的表面张力解释的是
 - A. 用细管蘸肥皂水, 向空中吹出球形的肥皂泡
 - B. 打湿的鞋不容易脱下来
 - C. 熔融的玻璃可制成各种玻璃器皿
 - D. 油在水面上会形成一层油膜
7. 对于生活中一些现象的解释, 下列说法正确的是
 - A. 水龟能停在水面而不沉, 是浮力作用的结果
 - B. 将棉线圈中的肥皂膜刺破后, 会扩出一个圆孔, 这是表面张力作用的结果
 - C. 毛细管中液面高于管外液面的是毛细现象, 低于管外液面的不是毛细现象
 - D. 玻璃管的裂口在火焰上烧熔后, 其尖端会变钝, 这是一种浸润现象

科技交流

8. 一位同学发现厨房碗柜里酱油瓶的下面总是有黑乎乎的酱油痕迹, 这是因为每次倒酱油的时候总会有一些酱油沿着瓶口流下来。他想, 只要选择恰当的材料做酱油瓶的瓶口, 就能保持瓶子清洁。你认为他的想法有道理吗? 说说应如何选择材料。

温故知新

9. 如图所示, 一根粗细均匀的玻璃管长 80 cm, 一端开口, 另一端封闭。管内有一段 25 cm 长的汞柱将一段空气柱封闭于管中。当玻璃管水平放置时, 空气柱长 40 cm。假设温度保持不变, 外界大气压为 75 cmHg, 当玻璃管开口向下竖直放置时, 求管内空气柱的长度。

某同学的解法为:

初、末两状态的压强 $p_1 = 75 \text{ cmHg}$, $p_2 = (75 - 25) \text{ cmHg} = 50 \text{ cmHg}$

此过程为等温变化, 根据玻意耳定律有 $p_1 V_1 = p_2 V_2$

即 $l_2 = \frac{p_1 l_1}{p_2} = 75 \times \frac{40}{50} \text{ cm} = 60 \text{ cm}$



第9题

你认为他的解法是否正确? 若正确, 请说明理由; 若错误, 也请说明理由, 并写出你认为正确的解题步骤和结果。



第3章

热力学定律

导 入 水车和水泵

第1节 热力学第一定律

第2节 能量的转化与守恒

第3节 热力学第二定律

第4节 熵——系统无序程度的量度

▶▶本章学业要求

- 能了解热力学第一定律和热力学第二定律的内涵，能理解能量守恒定律，知道自然界宏观过程的方向性；能用能量守恒与能量转化方向性的观点解释自然现象，说明保护环境、珍惜自然的重要性。具有与能量守恒定律相关的比较清晰的能量观念。

——物理观念

- 知道物理学研究中模型建构的意义，尝试将实际问题中的对象转化为物理模型；能对综合性物理问题进行分析 and 推理；能用证据说明第一类和第二类永动机是不可能实现的；能有依据地质疑，提出有创意的建议。

——科学思维

- 能通过调研对本地区能源利用状况提出问题；能通过调研，收集与本地资源开发相关的信息；能处理信息，形成相关结论；能写出调研报告，提出对本地环境资源保护的建

——科学探究

- 能通过了解热力学定律和能量守恒定律的发现过程，体会科学探索中的挫折和失败对科学发现的意义，知道科学发现需要科学家共同努力；能克服困难、努力学习；能依据道德规范评价物理技术的应用，具有保护环境、节约资源、促进可持续发展的责任感。

——科学态度与责任

导 人

水车和水泵

水可以自发地从高处流向低处，将势能转化为动能。水车就是利用水的动能工作的。被水冲击的水车获得动能后，可以对外做功，带动其他机械工作。在这一过程中，水的机械能最终转化为内能。

生活经验告诉我们，低处的水不可能自动地把内能收集起来，再转化为重力势能，自发地回到高处。要想让“水往高处流”，就必须借助外力做功，“水泵”抽水正是如此。抽水时电能转化为水的势能，同时伴有内能产生。



水车被高处落下的水冲击而转动



利用水泵工作的音乐喷泉

与热现象有关的能量转化过程有什么规律？本章将探讨与此有关的问题。

第1节

热力学第一定律

我们知道，在涉及热现象的能量转化或转移过程中，做功可将其他形式的能量转化为系统的内能，热传递是将热量从一个物体转移到另一个物体。那么，功、热量和内能的改变之间有什么样的定量关系呢？本节我们将学习与此有关的热力学第一定律。

1. 功、热量与内能

如果一个物体既不吸热也不放热，那么，当外界对它做功时，物体内能增加，且增加量等于外界做的功；当物体对外界做功时，物体内能减少，且减少量等于物体做的功。

如果一个物体既不对外界做功，外界也不对它做功，那么当物体从外界吸热时，物体内能增加，其增加量等于吸收的热量；当物体向外放热时，物体内能减少，其减少量等于放出的热量。

如果物体与外界之间同时存在做功和热传递的过程，那么物体内能的改变量 ΔU 等于外界对物体所做的功 W 与物体从外界吸收的热量 Q 之和

$$\Delta U = Q + W$$

上式中，当物体内能增加时， ΔU 为正值，物体内能减少时， ΔU 为负值；当物体从外界吸热时， Q 为正值，物体向外界放热时， Q 为负值；当外界对物体做功时， W 为正值，物体对外界做功时， W 为负值。

功、热量与内能改变量之间的上述定量关系，物理学中称为**热力学第一定律**（first law of thermodynamics）。

热力学第一定律是能量守恒定律在涉及热现象宏观过程中的具体表述。热力学第一定律表明：一个物体的内能增加，必定有其他物体对它做功，或向它传递热量。与此同时，对此物体做功或向它传递热量的其他物体要减少等量的能量，而系统的总能量保持不变。在一切涉及热现象的宏观过程中，能量可以发生转移或转化，在转移或转化过程中总能量守恒。

热力学第一定律在生产生活中有着广泛的应用。例如，飞机在万米高空飞行时，高空的气压低于机舱内的气压，要使舱内获得新鲜空气，必须使用空气压缩机把空气从舱外压进舱内。在这个过程中，由于空气压缩机对气体做功，必然使气体的内能增加，温度上

升, 如果不使用空调, 机舱内的温度可能升至 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 甚至更高。所以, 虽然万米高空气温很低, 但飞机上的空调不是使机舱内的空气升温, 而是降温。

例题

一定质量的气体从外界吸收了 $3.5 \times 10^5\text{ J}$ 的热量, 内能增加了 $1.2 \times 10^5\text{ J}$ 。气体对外界做功还是外界对气体做功? 做了多少功?

分析

气体与外界有热量的传递, 其内能发生了变化, 涉及热量、内能、做功三者之间的关系, 可应用热力学第一定律解决问题。

解

由热力学第一定律, 外界对气体所做的功

$$\begin{aligned} W &= \Delta U - Q \\ &= (1.2 \times 10^5 - 3.5 \times 10^5)\text{ J} \\ &= -2.3 \times 10^5\text{ J} \end{aligned}$$

W 为负值, 说明气体对外界做功 $2.3 \times 10^5\text{ J}$ 。

讨论

气体从外界吸收的热量大于内能的增加量, 说明气体对外做功, 计算结果为负值是合理的。

策略提炼

应用热力学第一定律解决问题时, 需要注意热力学第一定律表达式中的各个量可能为正值, 也可能为负值, 它们分别代表不同的意义。计算时已知量应代入正负号。

迁移

生活中的热学问题通常涉及多个过程。例如, 将气泡内的气体视为理想气体, 气泡在从湖底上升到湖面过程中, 对外界做了 0.20 J 的功。假设湖水温度保持不变, 此过程中的气泡是吸热还是放热? 吸收或放出的热量是多少? 气泡到达湖面后, 在其温度上升的过程中, 又对外界做了 0.02 J 的功, 同时吸收了 0.05 J 的热量, 气泡内气体内能增加了多少?

科学书屋

克劳修斯与热力学第一定律

克劳修斯 (R. Clausius, 1822—1888, 图 3-1), 德国物理学家, 气体分子动理论和热力学的主要奠基人之一。1847 年, 克劳修斯在哈雷大学主修数学和物理学, 获得博士学位。从 1850 年起, 先后任柏林炮兵工程学院、苏黎世工业大学、维尔茨堡大学、波恩大学物理学教授, 被法国科学院、英国皇家学会和彼得堡科学院选为院士或会员。



图 3-1 克劳修斯



克劳修斯主要从事分子物理、热力学、蒸汽机理论、理论力学、数学等方面的研究，在热力学理论、气体分子动理论方面建树卓著。1850年，克劳修斯在他发表的论文中首次把热力学第一定律用数学公式的形式表达出来，但他没有给式中的 U 命名。第二年，英国物理学家开尔文把 U 称为内能。

2. 第一类永动机

历史上，有人幻想设计一种不消耗任何能量而能永远对外做功的机器，这类机器通常称为**第一类永动机**（perpetual motion machine of the first kind）。

17世纪，有人设计了一种螺旋汲水永动机（图3-2）。他设想：上面水槽流出的水冲击水轮转动，水轮在带动水磨转动的同时，通过一组齿轮带动螺旋汲水器，永不停止地把蓄水池里的水重新提升到上面的水槽中，这样就永久地使用水磨了。

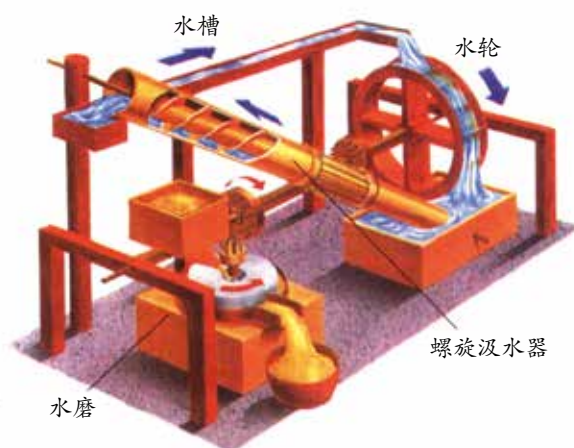


图3-2 螺旋汲水永动机示意图

17~18世纪，人们还提出过许多永动机设计方案，有利用轮子的惯性、水的浮力或毛细作用的，也有利用同名磁极之间的排斥作用的。无一例外，这类设计方案都以失败告终。

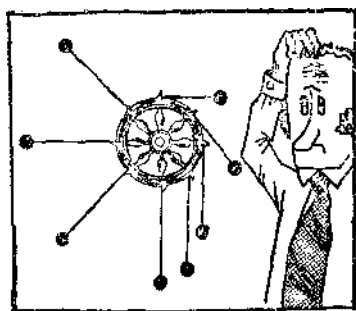
第一类永动机本质上都是认为能量能无中生有地创造出来，这违背了热力学第一定律，因而是不可能实现的。因此，热力学第一定律也被表述为：**第一类永动机是不可能实现的**。



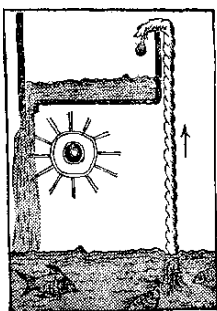
物理聊吧

图3-3是历史上曾经出现的几种永动机的设计方案示意图：图（a）是想利用短杆上的重球产生的作用，使轮子不停地转动；图（b）是想利用像灯芯那样的棉线把水吸到高处，再流下冲击轮子的叶片，使轮子不停地转动；图（c）是想利用重物在水中受浮力作用而上升，带动轮子不停地转动。

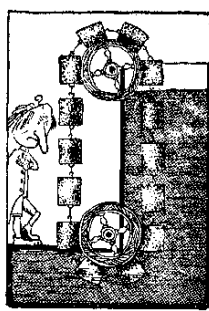
请仔细分析这些永动机的设想，指出它们不可能实现的原因，并与同学讨论交流。



(a)



(b)



(c)

图 3-3 几种永动机的设想示意图

节 练习

- 容器里有一定质量的理想气体，在保持体积不变时使其升温，气体的内能怎样改变？在保持温度不变时，把气体压缩，气体的内能改变吗？为什么？
- 用密封性好、充满气体的塑料袋包裹易碎品，如图所示。当充气袋四周被挤压时，假设袋内气体与外界无热交换，则袋内气体

- 体积减小，内能增大
- 体积减小，压强减小
- 对外界做负功，内能增大
- 对外界做正功，压强减小



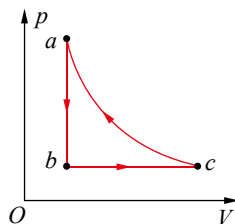
第2题

- 某驾驶员发现中午时车胎内的气压高于清晨时车胎内的气压，且车胎体积增大。若这段时间车胎内气体质量不变且可视为理想气体，那么

- 外界对车胎内气体做功，气体内能减小
- 外界对车胎内气体做功，气体内能增大
- 车胎内气体对外界做功，内能减小
- 车胎内气体对外界做功，内能增大

- 如图所示，一定质量的理想气体从状态 a 经等容过程到达状态 b ，再经过等压过程到达状态 c ，最后经等温过程回到初态 a 。下列说法正确的是

- 在过程 ca 中，外界对气体做功
- 在过程 ab 中，气体对外界做功
- 在过程 bc 中，气体从外界吸收热量
- 在过程 ca 中，气体从外界吸收热量



第4题

- 某汽车后备箱内安装有撑起箱盖的装置，它主要由气缸和活塞组成，如图所示。开箱时，密闭于气缸内的压缩气体膨胀，将箱盖顶起。在此过程中，若缸内气体与外界无热交换，忽略气体分子间的相互作用，则缸内气体

- 对外做正功，分子的平均动能减小
- 对外做正功，内能增大
- 对外做负功，分子的平均动能增大
- 对外做负功，内能减小



第5题

- 空气压缩机在一次压缩过程中，活塞对气缸中的空气做功 $2 \times 10^5 \text{ J}$ ，空气的内能增加了 $1.5 \times 10^5 \text{ J}$ 。空气传递的热量是多少？

第2节

能量的转化与守恒

19 世纪上半叶,已有很多种能量转化的形式被发现。蒸汽机将内能转化为机械能,电池将化学能转化为电能,法拉第发现的电磁感应现象实现了将机械能等转化为电能。随着研究的进一步深入,人们开始思考不同形式的能量在转化的过程中是否存在数量上的对应关系。本节我们将学习能量在转化过程中遵循的规律——能量守恒定律。

1. 能量守恒定律的发现

不同国家的多位科学家,通过不同的途径,几乎同时各自独立地发现了能量守恒定律,其中,迈尔、焦耳和亥姆霍兹的贡献更为突出。

(1) 迈尔的发现

1840 年,德国医生迈尔(J. Mayer, 1814—1878, 图 3-4)作为随船医生在赤道附近给船员做放血治疗时,发现船员流出的静脉血颜色较鲜艳,但回到欧洲后船员流出的静脉血又变成暗红色。由此,他把有机体的这种化学过程和无机的物理现象联系起来,产生了热和机械运动有一定对应关系的思想。迈尔认为,体力和体热必定来源于食物中的化学能,内能、化学能、机械能都是等价的,是可相互转化的。如果动物的能量输入与支出是平衡的,那么,所有这些形式的能在量上必定是守恒的。



图 3-4 迈尔

在此基础上,迈尔从理论上具体地论证了机械能、内能、化学能、电磁能等都可相互转化。随后,他提出了物理、化学过程中能量守恒的思想。

(2) 焦耳的研究

几乎与迈尔同时期,英国物理学家焦耳也开始研究物质运动之间的关系。他的研究方法 with 迈尔不同,他采用的是严格的定量实验分析法。1840 年,焦耳通过实验得出了焦耳定律,从而给出了电能向内能转化的定量关系,为发现普遍的能量守恒定律打下了基础。

从1840年到1879年，焦耳用了近40年的时间，不懈地钻研热功转换问题，先后用不同的方法做了400多次实验，为能量守恒定律提供了无可置疑的证据。

焦耳设计并完成了一个非常巧妙的实验：用一个保温性能良好的量热器装水，再浸入一个叶轮。叶轮由圆筒带动，而圆筒本身又与下垂的重锤连接（图3-5）。根据重锤的质量和下落的高度可算出机械功，根据水和量热器的质量、比热容、升高的温度可计算出产生的热量。

焦耳的工作开始时没有受到人们的重视。1844年，英国皇家学会甚至拒绝他宣读论文。但焦耳一直以百折不挠的精神专心致力于热功转换研究，终于使自己的研究成果得到了科学界的公认。后人为了纪念他，把功和能量的单位定为焦耳。

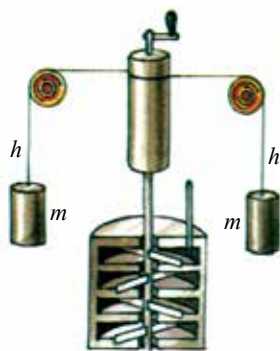


图3-5 焦耳的实验装置示意图

（3）亥姆霍兹的贡献

德国物理学家、生理学家亥姆霍兹（H. Helmholtz, 1821—1894，图3-6）从生理学问题入手，对能量守恒定律进行研究。1847年，他在柏林物理学会上宣读论文《论力的守恒》，系统地阐述了能量守恒原理，从理论上把力学中的能量守恒原理推广到热、光、电、磁、化学反应等过程，揭示了它们之间的统一性。他还将能量守恒原理与永动机不可能实现联系起来，使这一原理更具说服力。

亥姆霍兹的工作从理论上对能量守恒定律进行了重要的概括，他基本上是独立完成这一发现的。但是他没有去争取这一发现的优先权，而是谦逊地肯定了迈尔和焦耳所作的贡献。



图3-6 亥姆霍兹



科学书屋

不同形式能量的转化和统一

18世纪，蒸汽机广泛出现在煤矿、炼铁和纺织业的生产中。这种大规模把热能变为机械能的装置，启发了人们对能量转化规律的认识。

与此同时，在其他领域也分别发现了各种运动形式之间的相互联系和转化：伏打电池的发明及法拉第电解定律的发现，让化学运动与电运动统一起来；1820年奥斯特发现的电流磁效应与1831年法拉第发现的电磁感应，让电与磁统一起来；塞贝克制作的热电偶与焦耳发现的电流热效应，让电与热统一起来……

18世纪末，法国的拉瓦锡和拉普拉斯还证明了豚鼠吃过食物后释放出的动物热与等量的食物直接经化学过程燃烧所释放的热近似相等。

所有这些，都为能量守恒定律的发展奠定了基础。



2. 能量守恒定律及其应用

大量事实表明，能量既不会消失，也不会创生，它只能从一种形式转化为其他形式，或者从一个物体转移到其他物体，而能量的总值保持不变。这就是能量守恒定律（law of conservation of energy）。

能量守恒定律是19世纪自然科学的重大发现，它揭示了自然科学各个分支之间的普遍联系，是自然界内在统一性的第一个有力证据。

自然界的一切物质都处在运动中，不同的运动形式对应着不同形式的能量。在物质运动形式发生变化的过程中，与之相对应的能量形式也在转化。在转化过程中，一种形式的能量减少多少，必然伴随着另外一种或几种形式的能量增加多少，自然界能量的总和是不变的。

能量转化过程中总伴有内能的产生。例如，打篮球时，储存在肌肉里的能量不断地转化为动能，使你能跑动、传球和投篮等，在投篮时又将部分能量传给了篮球，整个过程中，总有部分能量转化为内能；打开台灯，过一会儿用手摸一摸灯罩，会发现温度升高，说明电能并没有全部转化为光能，部分电能还转化为内能。

人类所需的绝大部分能量都直接或间接地来自太阳。例如，植物通过光合作用把太阳能转变成化学能贮存在体内，煤、石油等化石能源是植物等经过漫长年代形成的，它们又可转化为电能和内能（图3-7）。此外，水能、风能等能量也是由太阳能转化而来的。例如，阳光对江河湖海的不断照射，使水蒸发到高处，并源源不断地流向低处，产生巨大能量。

在所有这些能量转化的过程中，能量都是守恒的。热力学第一定律就是能量守恒定律在热现象领域内的具体体现。

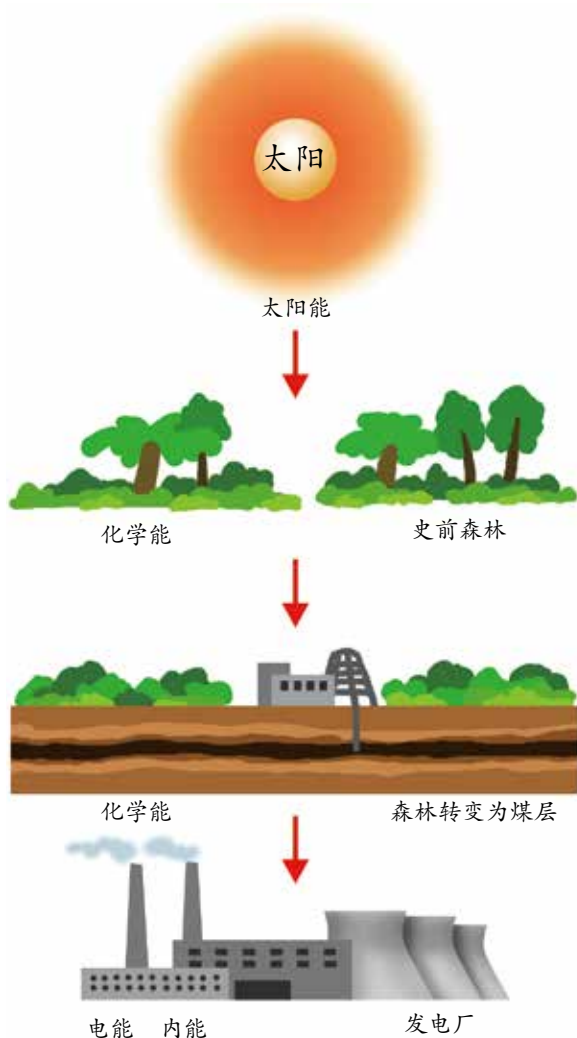


图3-7 从太阳能到火力发电的示意图



节练习

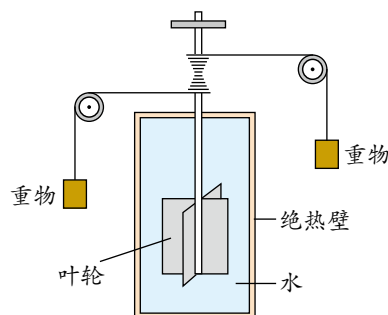
1. 在一个与外界没有热交换的房间内打开冰箱门，冰箱正常工作。过一段时间，房间内的温度将如何变化？为什么？

2. 1847 年，焦耳完成了下降重物带动液体中的叶轮转动而使液体温度上升的实验，如图所示。请说明这个实验的原理及意义。

3. 行驶中的汽车刹车后会滑行一段距离，最后停下；流星在夜空中坠落并发出明亮的火焰；降落伞在空中匀速下降；条形磁铁在下落过程中穿过闭合线圈，线圈中产生电流。上述不同现象所包含的相同物理过程是

- A. 物体克服阻力做功
- B. 物体的动能转化为其他形式的能量
- C. 物体的势能转化为其他形式的能量
- D. 物体的机械能转化为其他形式的能量

4. 质量 $m = 0.01 \text{ kg}$ 的铅弹以速度 $v_0 = 200 \text{ m/s}$ 水平射入质量 $M = 2 \text{ kg}$ 的靶中未穿出。靶原来静止在光滑的水平面上，并可自由滑动。已知铅弹的比热容 $c = 1.338 \times 10^2 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$ ，若铅弹射入靶的过程中，机械能的损失有 50% 转化为铅弹的内能，铅弹的温度将升高多少？



第2题

请提问



第3节

热力学第二定律

生活经验告诉我们，覆水难收、破镜难圆。水从高山流到河谷，不可能自动地流回高处；一滴墨水滴入一杯清水，最终会均匀地扩散开来（图 3-8），不可能再自动地凝成一滴墨水……在自然界中，一切与热现象有关的宏观过程都是有方向性的。这些过程的方向性有着怎样的规律？本节学习了热力学第二定律就知道其中的道理了。



图 3-8 墨水在清水中扩散

1. 可逆过程与不可逆过程

我们都有这样的生活经验，一杯开水放在空气中，温度会逐渐降低，最后与室温相同，但要使其温度升高，就必须给它加热，消耗外界的能量。众多现象表明，自然界中与热现象有关的宏观过程不可能自动地逆向进行。要使它们逆向进行，就必须由外界对它们施加影响。

一个系统由某一状态出发，经过某一过程到达另一状态，如果存在另一过程，它能使系统和外界完全复原，即系统回到原来的状态，同时消除原来过程对外界的一切影响，则原来的过程称为**可逆过程**（reversible process）；如果用任何方法都不能使系统和外界完全复原，则原来的过程称为**不可逆过程**（irreversible process）。

热量可自发地由高温物体传给低温物体，或者由物体的高温部分传给低温部分。但是，从未发现过热量自发地由低温物体传给高温物体，或由物体的低温部分传给高温部分，尽管这样的过程并不违背热力学第一定律。可见，**热传递是不可逆过程，具有方向性。**

转动着的飞轮在撤除动力后，会因摩擦而逐渐停下来。在这一过程中，机械能转化为内能，轴和飞轮的温度升高。而相反的过程（即轴和飞轮自动地冷却，内能重新转变为机械能而使飞轮转起来）却不会发生，尽管它并不违背热力学第一定律。

在焦耳的叶轮搅水实验中，重物可自动下落，使叶轮在水中转动，与水相互摩擦使水温上升，这是机械能转化为内能的过程。与此相反的过程，即水温自动降低，产生水流，推动叶轮转动，带动重物上升的过程是不可能发生的，尽管这样的过程不违背热力学第一定律。可见，**功热转化这一热现象是不可逆的，具有方向性。**

热传递是内能的转移过程，功热转化是内能的转化过程，它们都是不可逆的。因此，凡是与热现象有关的宏观过程都具有方向性。

2. 热力学第二定律及第二类永动机

为了阐明自然过程发生的方向，在大量研究的基础上，克劳修斯和开尔文分别提出了**热力学第二定律**（second law of thermodynamics）的两种不同表述。

克劳修斯表述：**不可能使热量从低温物体传向高温物体而不引起其他变化。**

这一表述阐述了热量传递的方向性，并不是热量不能从低温物体转移到高温物体，只是热量不能自发地从低温物体转移到高温物体。表述中的“不引起其他变化”是指外界不需要做功。如果外界做了一定的功，把热量从低温物体传到高温物体是完全可能的，电冰箱和空调机的制冷过程就是这样的实例。电冰箱通过电流做功，把热量从冰箱内温度较低的冷冻室、冷藏室传到冰箱外温度较高的空气中，但这一过程要消耗电能，即引起了“其他变化”（图 3-9）。

热机（thermal engine）是消耗内能对外做功的一种装置，在现代生产生活中有着广泛的应用。例如，汽车的发动机、飞机的喷气发动机、火力发电站和核能发电站的蒸汽轮机等都是热机。

研究表明，热机必须工作在两个温度不同的热源之间，通过工作物质，将从高温热源吸收的热量，一部分用来对外做功，另一部分传给低温热源，如图 3-10 所示。热机工作时，向低温热源放出的热量完全损耗掉了，而损耗的热量不可能再自动地收集起来。因此，热机对外做的功 W 总是小于其从高温热源吸收的热量 Q 。物理学中，把热机对外做的功跟它从高温热源吸收的热量的比值称为热机的效率，用 η 表示，即 $\eta = \frac{W}{Q}$ 。由此可见，热机的效率总是小于 100%。

在对热机的特点进行分析后，开尔文提出了热力学第二定律的另一种表述：**不可能从单一热源吸取热量，使之完全用来做功而不引起其他变化。**

这一表述中的“单一热源”是指温度恒定而均匀的热源；“不引起其他变化”是指唯一效果是热量全部转变为功，而外界及系统都不发生任何变化。

这一表述阐述了功热转化的方向性，不能把开尔文表述简单地说成“功可以完全转化为热，但热不能完全转化为功”。事实上，不是热不能完全转化为功，而是在不引起其他变化或不产生其他影响的条件下，吸收的热量不能完全用来对外做功。例如，

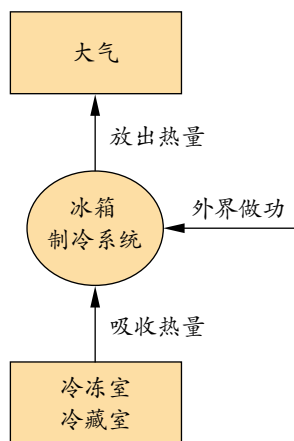


图 3-9 冰箱制冷工作原理示意图

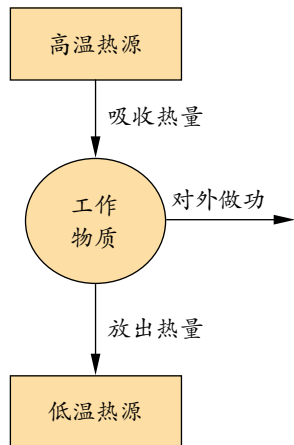


图 3-10 热机的工作原理示意图



理想气体经等温膨胀过程，系统内能不变，系统吸收的热量全部对外做功，但引起了其他变化，即系统的体积膨胀了。

历史上曾有人梦想制造一种机器，它可直接从海洋或大气中吸取热量，使之完全转变为机械功。他们认为，海洋和大气的热量是取之不尽的，因而这种机器可永不停息地运转做功。这种从单一热源吸取热量并使之完全转化为功而不引起其他变化的机器称为**第二类永动机**（perpetual motion machine of the second kind，图 3-11）。如果这种机器能制成，轮船就可利用海水的内能不停地航行，而不必再消耗燃料了。

第二类永动机虽然不违背热力学第一定律，但违背了热力学第二定律，也是不可能实现的。所以，热力学第二定律也可以表述为：**第二类永动机是不可能实现的。**

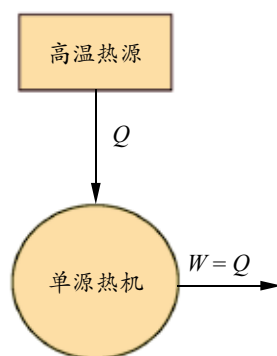


图 3-11 第二类永动机工作原理设想示意图

能了解热力学第一定律和热力学第二定律的内涵，能理解能量守恒定律，知道自然界宏观过程的方向性；能用能量守恒与能量转化方向性的观点解释自然现象，说明保护环境、珍惜自然的重要性。具有与能量守恒定律相关的比较清晰的能量观念。

能用证据说明第一类和第二类永动机是不可能实现的；能有依据地质疑，提出有创意的建议。

——物理观念，科学思维

素养提升



科学书屋

蒸汽机的工作原理

蒸汽机是早期的一种热机。如图 3-12 所示，蒸汽机通过燃烧煤给水加热获得蒸汽，蒸汽在高压下进入汽缸，利用蒸汽膨胀推动活塞往返运动，并通过连杆带动飞轮对外做功。

蒸汽相当于高温热源，冷凝器中的冷却水相当于低温热源。蒸汽机工作时产生的废气向冷凝器排放，变成冷凝水流出。同时，为了保持低温热源的恒温，要源源不断地输入冷却水，并把升了温的冷却水向外排出。

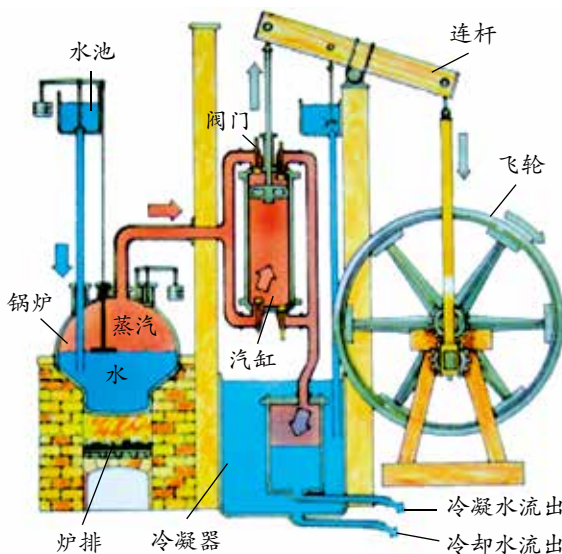
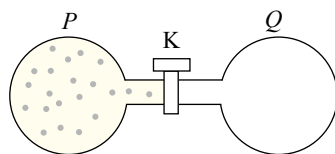


图 3-12 早期蒸汽机的工作原理示意图



节练习

1. 第二类永动机与第一类永动机的区别是什么？它为什么不能实现？
2. 一个木块沿着滑板滑下来的过程是不可逆过程吗？这是否意味着不可能使木块沿着滑板往上升？说明你的理由。
3. 为什么热机的效率不可能达到 100%？
4. 关于热力学定律，下列说法正确的是
 - A. 对某物体做功，必定会使该物体的内能增加
 - B. 可以从单一热源吸收热量，使之完全变为功
 - C. 不可能使热量从低温物体传向高温物体
 - D. 功转变为热的实际宏观过程是不可逆过程
5. 关于电冰箱，下列说法正确的是
 - A. 热量可以自发地从冰箱内传到冰箱外
 - B. 电冰箱的制冷系统能不断地把冰箱内的热量传到外界，是因为它消耗了电能
 - C. 电冰箱的工作原理不违背热力学第一定律
 - D. 电冰箱的工作原理违背热力学第二定律
6. 如图所示，两个相通的容器 P 、 Q 间装有阀门 K 。 P 中充满气体， Q 内为真空，整个系统与外界没有热交换。打开阀门 K 后， P 中的气体进入 Q ，最终达到平衡，则
 - A. 气体体积膨胀，内能增加
 - B. 气体分子势能减小，内能增加
 - C. 气体分子势能增加，压强可能不变
 - D. Q 中气体不可能自发地全部退回 P 中



第 6 题

请提问



第4节

熵——系统无序程度的量度

与热现象有关的宏观过程都具有方向性，热现象是大量分子无规则运动的结果。如何从微观的角度来理解与热现象有关的宏观过程的方向性？本节我们来学习热力学第二定律的微观本质和熵增加原理。

1.有序与无序

通常，人们将生活中符合某种规则的现象称为有序，反之称为无序。规则越多，一个宏观状态对应的微观状态越少，出现的概率越小，我们称之为越有序。反之规则越少，一个宏观状态对应的微观状态就越多，出现的概率也越大，我们称之为越无序。例如，学校大会上，学生按班级、学号就座是有序的，学生随意就座是无序的。有序与无序是相对的。按班级就座相对于全校随意就座来说是有序的，但相对于既按班级又按学号顺序入座来说是无序的。

设想用隔板将围栏隔成两部分，分别放养一群小黑鸡和一群小白鸡。日常经验告诉我们，如果将隔板抽去，一段时间后两群小鸡会混在一起。混合之后，小鸡的位置分布变得无序，混乱程度升高了，也就是说从有序（黑白分明）变成了无序（黑白混合）。这个过程是不可逆的，小黑鸡和小白鸡不可能自动分开，从无序到有序，回到原来的状态，除非小鸡经过专门训练或用捕捉的方式，即施加外界影响。

在热传递过程中，两个温度不同的物体放在一起，热量会自动地由高温物体传到低温物体，直到二者温度相同为止。从微观角度看，高温与低温的区别，在于分子的平均动能不同。图 3-13（a）中，左边表示高温物体中的分子，右边表示低温物体中的分子。两物体接触后，内能从高温物体向低温物体传递，导致高温物体中的分子运动减慢、低温物体中的分子运动加快，直到两个物体达到相同的温度为止 [图 3-13（b）]。此时，整个系统末态比初态更加无序。换句话说，热传递这个不可逆过程使无序程度增加了。

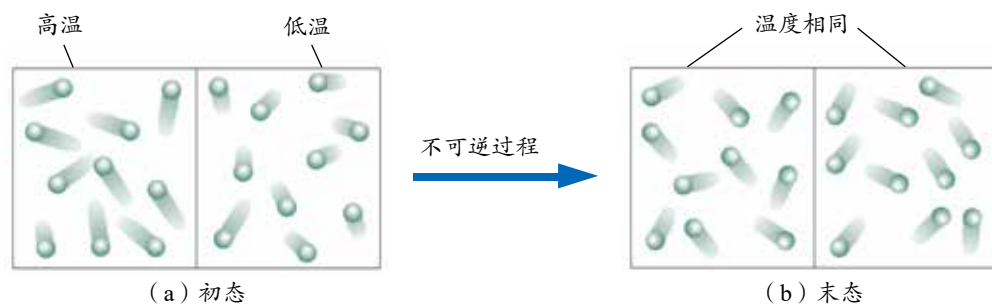


图 3-13 热传递的微观解释示意图



物理聊吧

整洁有序的书本，如果不注意整理，就会变得杂乱无序（图 3-14）。如何才能使它回到有序状态？

试想，如果分子的运动可自发地从无序变为有序，会有什么现象发生？这些现象会自然发生吗？为什么？

请与同学讨论交流。



图 3-14 书本的有序与无序

功转变为热是机械能转化为内能的过程。机械运动遵从牛顿运动定律，有明确的因果关系，是有序的运动；而在热运动中，分子杂乱无章地向各个方向运动，包含着大量的微观状态，是无序的运动。机械能转化为内能的过程即为从有序向无序变化的过程。在这个过程中，分子运动变得更加混乱，无序程度增加。例如，焦耳实验中叶轮转动时，将叶轮的机械能转化为水的内能之后，水的温度升高，水分子的热运动加剧，水分子的无序程度增加。

可见，与热现象有关的自然发生的宏观过程总是沿着大量分子热运动无序程度增大的方向进行。这就是热力学第二定律的微观本质。

2. 熵和熵增加原理

处于不同状态的物体，分子运动的无序程度也不同。物理学中用熵（entropy）来量度系统的无序程度，用符号 S 表示。熵是热力学中与温度、内能等同样重要的一个状态量，它只与热力学变化过程的初态和末态有关，与中间过程无关。热力学系统的每一个状态，都对应有一个熵值。熵值越大，意味着系统越“混乱”和“分散”，无序程度越高；熵值越小，意味着系统越“整齐”和“集中”，也就越有序（图 3-15）。例如，把一碗绿豆和一碗米掺和在一起煮成绿豆粥后，随便取出一勺都既有绿豆又有米，而不可能出现一勺都是绿豆或一勺都是米的情形。可见绿豆和米掺和后比掺和前变得更无序，也就是熵增加了。

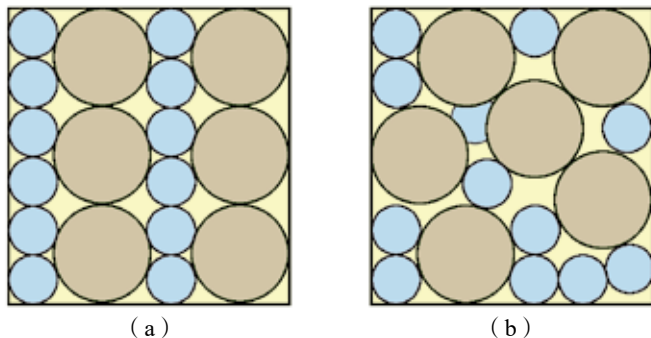


图 3-15 有序和无序的示意图



玻耳兹曼与熵

玻耳兹曼 (L. Boltzmann, 1844—1906), 奥地利物理学家。青少年时代的玻耳兹曼志趣广泛, 学习成绩始终名列前茅。1863 年, 他进入著名的维也纳大学学习物理学和数学, 22 岁获得博士学位。他先后在格拉茨大学、维也纳大学、慕尼黑大学、莱比锡大学任教。

在玻耳兹曼时代, 热力学理论并没有得到广泛传播。玻耳兹曼在使科学界接受热力学理论, 尤其是热力学第二定律方面, 立下了汗马功劳。玻耳兹曼把统计学的思想引入分子动理论, 通过熵与概率的联系, 指出热力学系统的宏观量与微观量之间的联系, 并对热力学第二定律进行了微观解释。他认为, 热力学第二定律所禁止的过程并不是绝对不可能发生的, 只是出现的概率极小, 但仍然是非零的。玻耳兹曼是统计力学的奠基者, 在气体分子动理论、统计力学和热力学方面作出了卓越的贡献。他去世后, 人们把熵的关系式镌刻在他的墓碑上, 以纪念他对热力学的杰出贡献。

与外界既没有物质交换又没有能量交换的系统称为孤立系统。孤立系统所发生的变化一定是自然发生的。根据热力学第二定律的微观解释, 自然过程总是沿着无序程度增大的方向进行, 而熵是无序程度大小的量度。所以, **在孤立系统中的宏观过程必然朝着熵增加的方向进行**。这就是**熵增加原理** (principle of entropy increase)。

熵增加原理与能量守恒定律在物理学中具有同等重要的地位, 二者都是对自然过程的一种限制, 即在任何自然过程中, 一切参与者的总能量必定保持不变, 而总熵则必定增加。



物理聊吧

一只完好的杯子从高处落到地上摔碎了 (图 3-16), 这是一个可逆过程还是不可逆过程? 在这个过程中熵是增加还是减少? 为什么? 请说说生活中的其他例子。



图 3-16 杯子摔碎了

3. 熵与能量退降

能量转化的过程常常伴有内能的产生。研究表明,即使是在最理想的热机中,内能也只是部分用来做功。只要有内能产生,热机做功的本领就会降低。例如,从高处抛向地面的小球,在与空气摩擦及与地面多次碰撞之后,机械能转变为内能,使小球逐渐停下来(图3-17)。根据热力学第一定律,整个系统(包括小球、空气和地面)的能量守恒,但随着内能的产生,系统的熵值增大,小球做功的本领逐渐减小。燃烧一块煤,虽然它的能量没有消失,但我们再也不能把这些能量全部收集起来,让它再一次做同样多的功了。

实际上,在熵增加的同时,一切不可逆过程总是使得能量从可利用状态转化为不可利用状态,能量品质退化了,这种现象称为**能量退降**(degradation of energy)。

热力学第一定律告诉我们,自然界的能量在总量上是不变的;热力学第二定律却告诉我们,自然界的能量品质正在退化,可利用的能量越来越少。因此,人类必须节约能源,提高能源的利用效率,积极开发新能源。

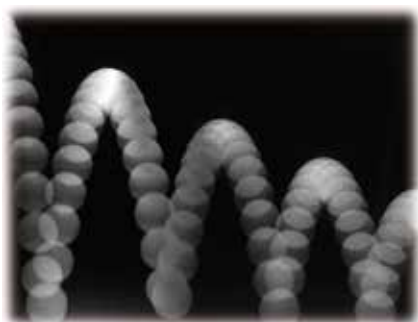


图3-17 运动小球逐渐停下来

能通过了解热力学定律和能量守恒定律的发现过程,体会科学探索中的挫折和失败对科学发现的意义,知道科学发现需要科学家共同努力;能克服困难、努力学习;能依据道德规范评价物理技术的应用,具有保护环境、节约资源、促进可持续发展的责任感。

——科学态度与责任

素养提升



科学书屋

熵与信息

现代社会是信息社会。信息不仅包含人类所有的文化知识,还包含我们五官所感受的一切,信息的特征在于能消除事情的不确定性。1948年,信息论的创始人、美国数学家香农(C. Shannon, 1916—2001)把信息与熵联系起来,认为信息量的增加就意味着熵的减少。

知识是一种信息,人的学习过程随着知识的逐渐积累,引起认知系统总熵值变小,从而产生更为有序、精确的认知结构。例如,电视机出现某种故障,对缺少这方面知识的人来说,难以找到问题的症结,会提出多种猜测;而对于精通电视机并有修理经验的人来说,会根据现象准确地判断出问题在哪里。前者这方面的信息量少,熵较大;后者这方面的信息量多,熵较小。



节 练 习

1. 日常生活中有许多现象都是无序程度增大的过程，请列举几种。
2. 对于孤立系统中发生的实际过程，下列说法正确的是
 - A. 系统的总熵只能增加，不可能减少
 - B. 系统的总熵可能增加，可能不变，还可能减少
 - C. 系统逐渐从比较有序向更无序的状态发展
 - D. 系统逐渐从比较无序向更有序的状态发展
3. 为什么说热传导是无序程度增大的过程？在热传导过程中能量是否发生了退降？为什么？
4. 举例说明不可逆过程必定朝着熵增加的方向进行。
5. 寒冷的冬季，室外的水很容易结冰。液态水分子的无序度比冰高。那么，结冰的过程违反熵增加原理吗？为什么？



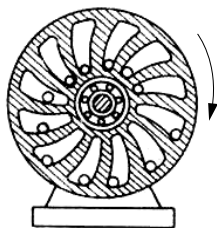
请提问



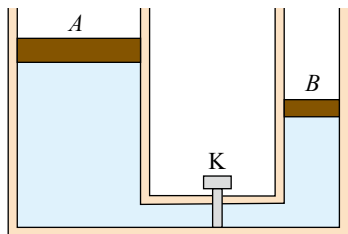
章末练习

科学认知

1. 文艺复兴时期，达·芬奇制造的永动机装置如图所示。他认为右边的重球比左边的重球离轮心更远些，两边不平衡的作用会使轮子沿箭头方向转动不息。请问该装置属于第几类永动机，并说明这类永动机为什么不能成功。
2. 如图所示，容器 A 、 B 中各有一个可自由移动的活塞。活塞下面是水，上面为大气，大气压恒定。 A 、 B 间用带有阀门 K 的管道相连，整个装置与外界隔热。 A 容器的横截面面积大于 B 容器的横截面面积， A 的液面高于 B 的液面。开启阀门后， A 中的水逐渐流向 B ，直至两边液面相平。在这个过程中大气压是否对水做功？水的内能会怎样变化？



第1题

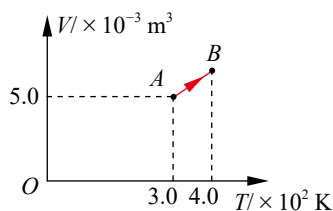


第2题

3. 根据热力学定律，下列说法正确的是
 - A. 气体吸热后温度一定升高
 - B. 对气体做功可以改变其内能
 - C. 理想气体的等压膨胀过程一定放热
 - D. 热量不可能自发地从低温物体传到高温物体
4. 古代发明的点火器原理如图所示，用牛角做套筒，木质推杆前端粘着易燃艾绒。猛推推杆，艾绒即可点燃。对筒内封闭的气体，在此压缩过程中
 - A. 气体温度升高，压强不变
 - B. 气体温度升高，压强变大
 - C. 气体对外界做正功，气体内能增加
 - D. 外界对气体做正功，气体内能减少
5. 出租车常以天然气为燃料。加气站储气罐中，天然气的温度随气温的升高而升高。在这个过程中，若储气罐内气体的体积及质量均不变，则罐内气体（可视为理想气体）
 - A. 压强增大，内能减小
 - B. 吸收热量，内能增大
 - C. 压强减小，分子平均动能增大
 - D. 对外界做功，分子平均动能减小
6. 一定质量的理想气体从状态 A 经等压过程到状态 B ，如图所示。在这个过程中，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。



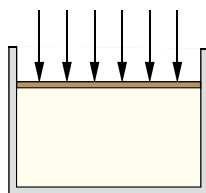
第4题



第6题



7. 如图所示, 一集热箱里面封闭着一定质量的气体, 集热板作为集热箱的活塞且始终正对着太阳, 其面积为 S , 在 t 时间内集热箱里气体膨胀对外做功 W , 其内能增加了 ΔU , 不计封闭气体向外散的热。已知照射到集热板上的太阳光的能量有 50% 被箱内气体吸收。求这段时间内集热箱里气体共吸收的热量。



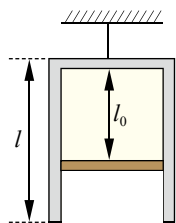
第 7 题

科技交流

8. 调查了解热电厂采用哪些办法增加能源的利用效率和减少对环境的污染。将调查结果整理后, 陈述如何降低熵增加的速度, 并与同学交流。

温故知新

9. 如图所示, 一个内壁光滑的圆柱形气缸, 高度为 l 、底面积为 S , 缸内有一个质量为 m 的活塞, 封闭了一定质量的理想气体。气体的热力学温度为 T_0 时, 用绳子系住气缸底, 将气缸倒立并悬挂起来, 气缸处于竖直状态, 活塞到缸底距离为 l_0 。已知重力加速度为 g , 大气压强为 p_0 , 不计活塞厚度及活塞与缸体的摩擦。



第 9 题

- (1) 采用缓慢升温的方法使活塞与气缸脱离, 缸内气体的温度至少要升高到多少?
 - (2) 从开始升温到活塞刚要脱离气缸, 缸内气体压力对活塞做了多少功?
 - (3) 当活塞刚要脱离气缸时, 缸内气体的内能增加量为 ΔU , 则在活塞下移的过程中气体吸收的热量是多少?
10. 请根据第 1 章(分子动理论与气体实验定律)、第 2 章(固体与液体)和第 3 章(热力学定律)的内容, 结合你的理解, 画出概念图。



我的学习总结

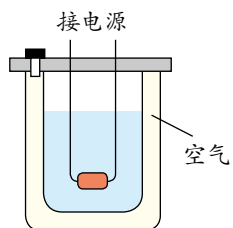


单元自我检测

一、选择题（本题共5小题。在每小题给出的四个选项中，第1~3题只有一项符合题目要求，第4、5题有多项符合题目要求）

1. 某实验器材的结构如图所示，金属内筒和隔热外筒间封闭了一定质量的空气，内筒中有水，在水加热升温的过程中，被封闭的空气

A. 内能不变
B. 压强增大
C. 分子间引力和斥力都减小
D. 所有分子运动速率都增大



第1题

2. 某种椅子的结构如图所示， M 、 N 两筒间密闭了一定质量的气体， M 可沿 N 的内壁上下滑动。设筒内气体不与外界发生热交换，在 M 向下滑动的过程中

A. 外界对气体做功，气体内能增大
B. 外界对气体做功，气体内能减小
C. 气体对外界做功，气体内能增大
D. 气体对外界做功，气体内能减小



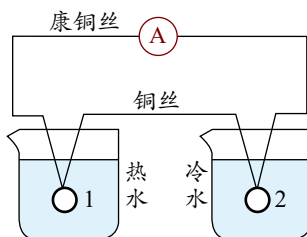
第2题

3. 一定质量的理想气体，从某一状态开始，经过一系列变化后又回到初始状态。 W_1 表示外界对气体做的功， W_2 表示气体对外界做的功， Q_1 表示气体吸收的热量， Q_2 表示气体放出的热量。在整个过程中一定有

A. $Q_1 - Q_2 = W_2 - W_1$ B. $Q_1 = Q_2$
C. $W_1 = W_2$ D. $Q_1 > Q_2$

4. 如图所示，用两种不同的金属丝组成一个回路，触点1插在热水中，触点2插在冷水中，电流表指针会发生偏转，这就是温差发电现象。下列说法正确的是

A. 该实验符合能量守恒定律，但违背了热力学第二定律
B. 该实验中有部分内能转化为电路的电能
C. 该实验中热水的温度降低，冷水的温度不变
D. 该实验中热水的温度降低，冷水的温度升高



第4题

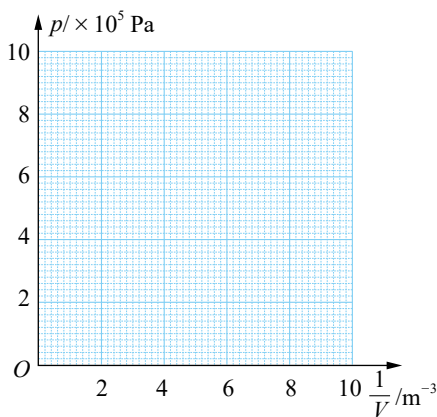
5. 将适当的糖放入一杯热水，糖会全部溶于水中。一段时间后又观察到杯子底部有糖结晶。关于这个过程，下列叙述正确的是

A. 溶解过程是自发的，结晶过程也是自发的，所以溶解过程是可逆的
B. 溶解过程是有序向无序转变的过程
C. 结晶过程是有序向无序转变的过程
D. 结晶过程不是自发的，因为有外界的影响

二、非选择题

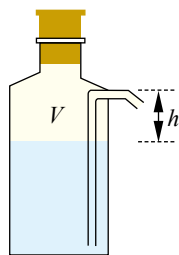
6. 在保持温度不变的情况下, 研究一定质量气体的压强 p 与体积 V 的关系。实验数据见下表。

V/m^3	1.00	0.50	0.40	0.25	0.20
$p/\times 10^5 \text{ Pa}$	1.45	3.10	3.95	5.98	7.70

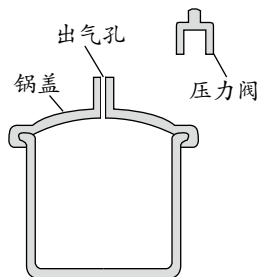


第 6 题

- (1) 根据表中数据在坐标图中画出 $p-\frac{1}{V}$ 图像。
 - (2) 由所画图像可知, 在压强为 $8.85 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时, 气体的体积为_____。
 - (3) 所画图像的斜率大小反映气体的_____。
7. 某水瓶的结构如图所示, 瓶内水面与出水口的高度差为 h , 瓶内密封空气的体积为 V 。设水的密度为 ρ , 外界大气压强为 p_0 , 最初水管内水面与瓶内水面等高。忽略水管的体积, 且温度保持不变。为让水从出水口流出, 瓶内空气压缩体积 ΔV 至少为多少?
8. 某压力锅结构如图所示。盖好密封锅盖, 将压力阀套在出气孔上, 给压力锅加热, 当锅内气体压强达到一定值时, 气体就把压力阀顶起放气。在压力阀被顶起时, 停止加热。
- (1) 若此时锅内气体的体积为 V , 摩尔体积为 V_0 , 阿伏伽德罗常数为 N_A , 写出锅内气体分子数的表达式。
 - (2) 设在一次放气过程中, 锅内气体对压力阀及外界做功 1 J , 并向外界释放了 2 J 的热量。锅内原有气体的内能如何变化? 变化了多少?
 - (3) 已知大气压强 p 随海拔高度 H 的变化满足 $p = p_0 (1 - \alpha H)$, 其中常数 $\alpha > 0$ 。结合气体定律定性分析在不同的海拔高度使用压力锅, 当压力阀被顶起时锅内气体的温度有何不同。



第 7 题



第 8 题



单元自我评价

回顾本单元的学业要求和所学内容, 结合本次单元自我检测和平时学习情况进行自我评价, 写一篇“单元自我评价”报告。说说你学会了什么、存在什么问题及今后努力的方向等。

第4章

原子结构

导 入 从一幅图片说起

第1节 电子的发现与汤姆孙原子模型

第2节 原子的核式结构模型

第3节 光谱与氢原子光谱

第4节 玻尔原子模型

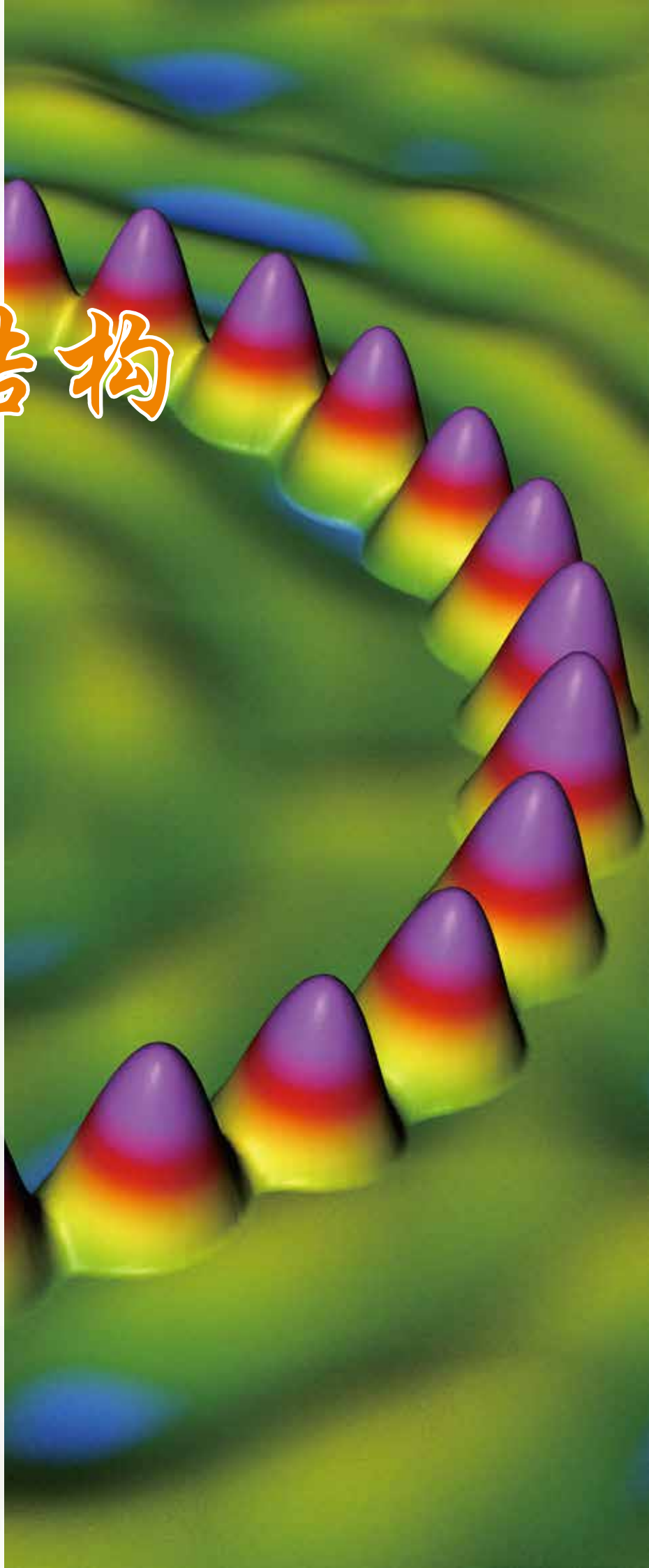
►►本章学业要求

●能了解人类探索原子及其结构的历史，知道原子的核式结构模型，通过对氢原子光谱的分析，了解原子的能级结构；能运用所学知识分析微观世界的一些问题。具有与原子结构相关的物质观念、运动与相互作用观念和能量观念。——物理观念

●知道不同原子结构模型之间的区别，知道原子模型的建立是在实验的基础上不断发展和修正的过程，能利用玻尔原子模型解释氢原子光谱等相关现象；能分析氢原子光谱，推断原子的能级结构；能恰当使用证据说明不同的原子结构模型；有不断创新的行为。——科学思维

●能查阅资料，提出与原子结构相关的物理问题；能通过网络查询，收集与原子结构相关的信息；能处理信息，形成相关的结论；能完成与原子结构探索相关的科技论文，并能与他人交流，体会成果分享的意义。——科学探究

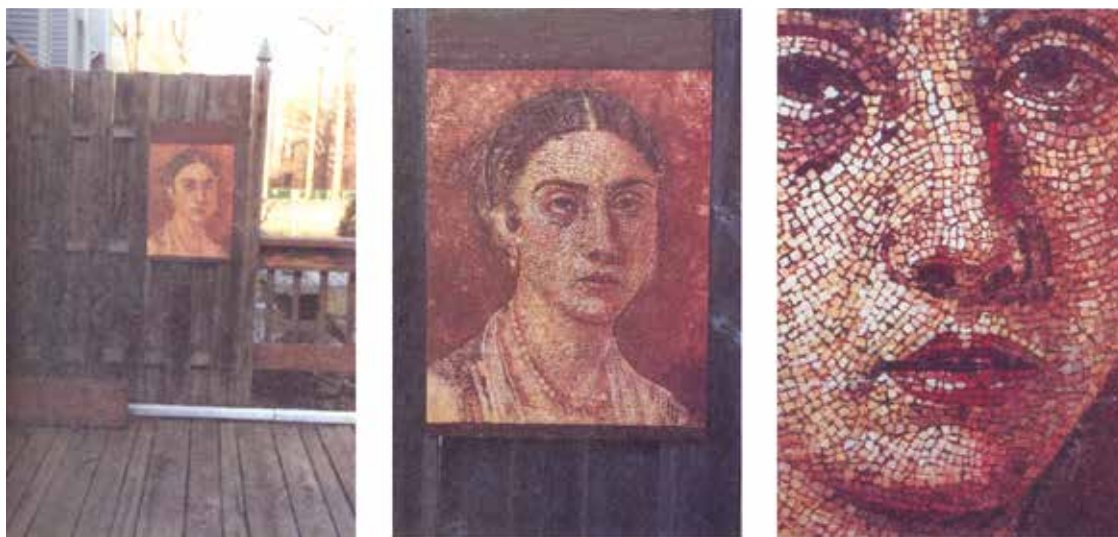
●能认识物理模型的局限性，体会科学家在对原子结构的探索中敢于怀疑的科学精神；能对微观世界的探索产生兴趣，能感受关于微观世界研究结论的魅力；能关注古人对原子的探索及相关的观点。——科学态度与责任



导 人

从一幅图片说起

大千世界，多姿多彩：纤薄的蝴蝶翅膀、坚硬的飞机机翼、起伏的山峦、蓝色的大海、白色的冰河，等等。借助仪器还可观察到一些肉眼无法看到的细节：将一幅图画逐步放大后，我们会看到，原本平滑的画面竟然是许许多多的小色块组成的。



精美图画逐步放大

在显微镜下，我们可观察到：皮肤由一个个细胞组成，一杯热水中的悬浮颗粒像蝌蚪一样运动。用更先进的电子显微镜，我们可看到组成物质的原子图像。原子还可再分吗？它有什么样的结构呢？人类是怎样在实验与理论的推动下深入探索微观世界的？让我们带着这些问题进入本章的学习吧。

第1节

电子的发现与汤姆孙原子模型

大千世界是由什么构成的（图 4-1）？自古以来，人们坚持不懈地追寻着答案。电子的发现打开了人们认识微观世界的大门。电子是怎么发现的？原子的内部有着怎样的结构？本节我们将了解电子的发现过程，学习汤姆孙原子模型。



图 4-1 大千世界

1. 物质结构的早期探究

古人曾将自然界的某些具体物质视为构成世界万物的元素：我国古代的“五行说”认为，万物是由金、木、水、火、土五种基本“元素”组成的；古希腊的亚里士多德认为，万物的本质是土、水、火、空气四种“元素”，天体则由第五种“元素”——“以太”构成。也有的古人认为万物的构成来源于抽象的概念：我国春秋时期的老子讲“道生一，一生二，二生三，三生万物”；古希腊的毕达哥拉斯则认为自然界中的一切都服从于一定比例的数。

从古人的物质观可知，人们很早就探索构成物质的最小微粒。古希腊哲学家德谟克利特等人建立了早期的原子论，认为宇宙间存在一种或多种微小的实体，即“原子”（在希腊语中，原子的含义是“不可分割的东西”），这些“原子”在虚空中运动，并可按照不同的方式重新结合或分散；我国战国时期的思想家墨子认为物体是由不可分割的最小单元——“端”构成的。

大约在 17 世纪中叶，人们开始通过实验来了解物质的结构。

1661 年，玻意耳以化学实验为基础建立了科学的元素论。他认为，只有那些不能用化学方法再分解的简单物质才是元素，各种元素存在着不同的原子，元素的差异源于原子的差异。18 世纪一系列重要的实验结果，如化学反应遵循质量守恒定律，元素形成化合物须遵循定比定律、倍比定律等，启示人们推想物质是由一些不可毁灭的微粒构成的，而且各种不同的元素微粒按照一定的比例形成化合物。在此基础上，19 世纪初，道尔顿（J. Dalton, 1766—1844）提出了原子论，认为原子是元素的最小单元。1811 年，意大利化学家阿伏伽德罗（A. Avogadro, 1776—1856）提出了分子假说，指出分子可由多个相同的原子组成。



可见，19 世纪初期形成的分子—原子论认为：在物质的结构中存在着分子、原子这样的层次；宏观物质的化学性质决定于分子，而分子则由原子构成；原子是构成物质的不可再分割的最小颗粒，它既不能创生，也不能消灭。

原子真的不可再分了吗？

2. 电子的发现

19 世纪后半叶，科学家在研究稀薄气体放电时发现，当玻璃管内的气体足够稀薄时，阴极会发出一种射线，这种射线能使玻璃管壁发出荧光，人们把这种射线称为阴极射线。当时科学家对这种射线的认识有分歧，有的认为阴极射线是带负电的粒子，有的则认为是以太波。为了探究阴极射线的本质，人们都在寻找实验支持。

英国科学家汤姆孙（J. Thomson, 1856—1940）从 1890 年开始对阴极射线进行研究。1897 年，他设计了一个巧妙的实验，通过使阴极射线粒子受到的静电力和洛伦兹力平衡等方法，确定了阴极射线粒子的本质是带负电的粒子流，并确定了其速度，测量出了这些粒子的比荷（图 4-2）。

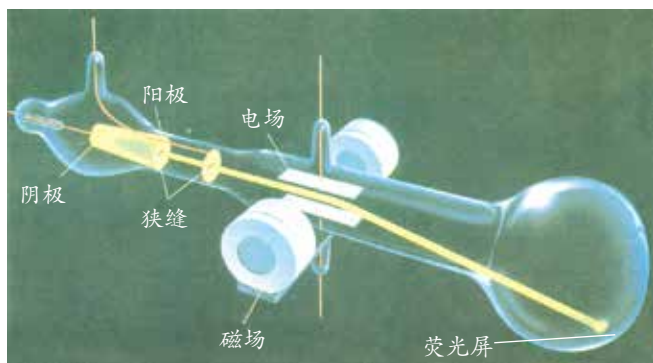


图 4-2 阴极射线实验示意图

当带电粒子受到的静电力与洛伦兹力平衡时，有

$$qE = qvB$$

由此确定带电粒子的运动速率。然后使电场为零，带电粒子在磁场区内做圆周运动，有

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

由以上两式可得带电粒子的比荷

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

实验中测得的带电粒子的比荷大约是 10^{11} C/kg ，比氢离子的比荷大得多。汤姆孙还把各种不同的气体充入管内，

方法点拨

质量和电荷是微观粒子的本质属性，电荷和质量的比值同样反映它的本质属性，所以测量比荷是确定粒子性质的有效方法。历史上，光电流的研究、 β 射线的研究等，也是通过测定比荷及电量来判定其本质的。

用不同的金属分别制成阴极，实验测出的比荷大体相同，说明这种带电粒子是组成各种物质的共同成分。

后来，汤姆孙测量了阴极射线粒子的电荷，发现这些粒子电荷量的大小与氢离子大致相同，而比荷却是氢离子的近两千倍。因此，汤姆孙认为，阴极射线粒子是电荷量大小与氢离子相同、而质量比氢离子小得多的粒子，他把这种带电粒子称为**电子**（electron）。电子电荷量的精确测定是由密立根于 1909 ~ 1913 年通过油滴实验完成的。

电子的发现说明原子具有一定的结构，也就是说原子是由电子和其他物质组成的。电子的发现是 19 世纪末物理学的三大发现之一。



科学书屋

19 世纪末物理学的三大发现

19 世纪末，X 射线、放射性和电子的发现揭开了研究微观世界的序幕。

X 射线的发现应归功于伦琴（W. Rontgen, 1845—1923，图 4-3）。1895 年，他在进行阴极射线实验时，发现在距离放电管较远的荧光屏上出现荧光，伦琴将这种具有很强穿透力的未知射线称为 X 射线。接着，他发表了关于 X 射线的论文，并公布了他妻子手骨的 X 射线照片，在世界上引起轰动。伦琴由于 X 射线的发现获得了首届诺贝尔物理学奖。

X 射线发现后不久，法国科学家贝可勒尔（H. Becquerel, 1852—1908，图 4-4）通过实验发现铀盐能自发辐射出一种使底片感光的射线，这就是铀的天然放射现象。此后，皮埃尔·居里夫妇从沥青铀矿渣和钼盐中分别提取出放射性更强的钋和镭。放射现象的发现进一步揭开了微观世界的奥秘。

英国物理学家汤姆孙（图 4-5）在研究阴极射线本质时，发现了电子的存在。他通过实验证明，阴极射线是带负电的粒子流，并测定了它的比荷。1897 年，汤姆孙在论文中指出，电子是一切原子所共有的组成成分。电子是人类认识的第一种组成原子的微观粒子。



图 4-3 伦琴

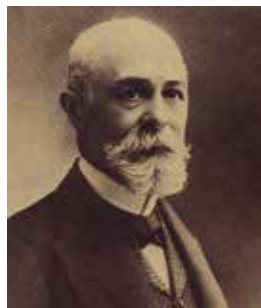


图 4-4 贝可勒尔



图 4-5 汤姆孙

3. 汤姆孙原子模型

汤姆孙的阴极射线实验证明了电子的存在，从而打破了对原子不可分的认知，激发人们对原子内部结构进行探索。



电子的发现只是揭开了原子内部神秘结构的一角。我们知道，物质在通常情况下是不带电的，原子呈电中性。如果电子是原子的组成部分，而且是带负电的，那么原子中一定还有带正电的部分。电子的质量很小，原子的质量应该主要集中在带正电的部分。那么，原子中带正电的部分和带负电的电子是怎样合为一体的呢？

当时，无法直接通过实验探测原子内部的奥秘。汤姆孙运用经典力学的理论，根据电荷之间的作用力与距离的平方成反比进行了大量计算，以求证电子稳定分布所处的状态。他认为，既然电子那么小，又那么轻，原子带正电的部分应充斥整个原子，很小很轻的电子镶嵌在球体的某些固定位置，正像葡萄干镶嵌在面包中那样，这就是原子的“葡萄干面包”模型（图4-6）。电子带的负电被原子内带的正电抵消，因此原子呈电中性。如果原子失去电子或得到电子，就会变成离子。电子一方面要受正电荷的吸引，另一方面又要互相排斥，因此必然有一个处于平衡的状态。电子在它们的平衡位置附近做简谐振动，可发射或吸收特定频率的电磁波。

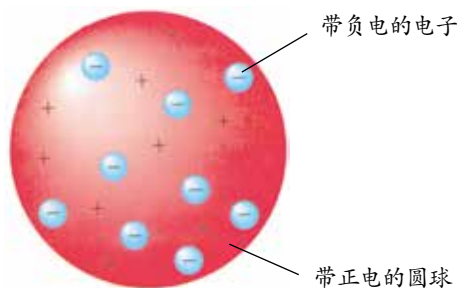
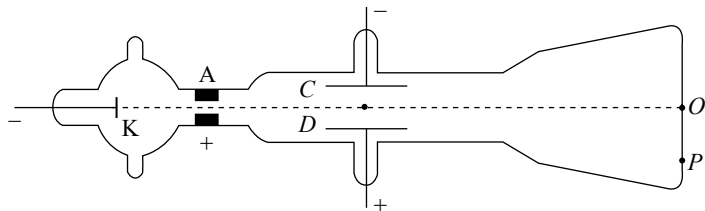


图4-6 汤姆孙原子模型示意图



节 练 习

- 请说说英国物理学家汤姆孙如何由实验判定电子是原子的组成部分。
- 汤姆孙通过对阴极射线的实验研究发现
 - 阴极射线在电场中受力方向与电场方向相反
 - 阴极射线在磁场中受力情况跟正电荷受力情况相同
 - 不同材料所产生的阴极射线的比荷不同
 - 阴极射线的比荷比氢离子的比荷大得多
- 利用电场偏转作用可测定电子比荷。实验装置如图所示，真空玻璃管内，阴极K发出的电子经其与阳极A之间的高电压加速后，形成一束电子流，沿图示方向进入两极板C、D间的区域。若两极板C、D间无电压，电子将打在荧光屏上的O点；若在两极板间施加电压 U ，则离开极板区域的电子将打在荧光屏上的P点；若再在极板间施加一个方向垂直于纸面向外、磁感应强度为 B 的匀强磁场，则电子打在荧光屏上产生的光点又回到O点。已知极板的长度为 l ，极板右端到荧光屏的距离为 L ，C、D间的距离为 d ，电压为 U ，P点到O点的距离为 y 。求电子的比荷。



第3题

- 19世纪末物理学的三大发现对人们了解微观世界有什么价值？请查阅资料，写一篇小论文，通过网络或者板报的方式交流。

第2节

原子的核式结构模型

汤姆孙原子模型建立后，人们便希望用该模型去解释实验现象，但在解释有些实验现象时遇到了困难。原子内部究竟是怎样的结构？本节我们学习原子的核式结构模型。

1. α 粒子散射实验

1903 年，勒纳德（P. Lenard，1862—1947）做了电子穿过金属箔的实验，发现高速电子很容易穿过金属中的原子。这表明原子不像是正电荷均匀分布的实心球体。

19 世纪末，对放射性现象的研究发现，某些放射性物质释放出的 α 粒子具有很大的动能，可作为轰击金属的“炮弹”。用这些已知的粒子与金属内的原子相互作用，根据粒子的偏转情况来获得原子内部的信息，成为研究物质结构的新方法。这种研究方法使得人们对原子结构的研究取得了突破。

1909 年，卢瑟福（E. Rutherford，1871—1937）和他的合作者做了用 α 粒子轰击金箔的实验。在一个小铅盒里放有少量的放射性元素钋（Po），它发出的 α 粒子从铅盒的小孔射出，形成很细的一束射线，射到金箔上。 α 粒子穿过金箔后，打到环形荧光屏上，产生一个个闪烁的光点，这些光点可用显微镜观察到（图 4-7）。

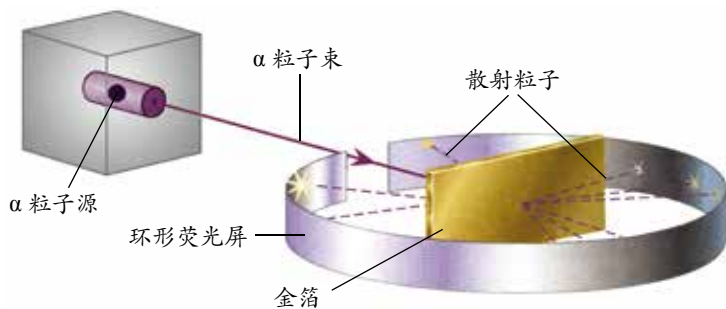


图 4-7 α 粒子散射实验示意图



方法点拨

电场无法直接观察，我们曾用放入试探电荷的方法，通过观察电荷的“行为”来了解电场的性质。原子太小，内部结构无法直接观察，我们也可用已知粒子与原子相互作用的方法，通过对实验结果的分析推断原子结构。卢瑟福的 α 粒子散射实验便采用了这样的方法。



实验结果表明,绝大多数 α 粒子穿过金箔后仍沿原来的方向前进,但是有少数 α 粒子发生了较大的偏转,有极少数 α 粒子的偏转角超过了 90° ,有的甚至被原路弹回。大量实验发现, α 粒子被反射回来的概率竟然有 $\frac{1}{8\,000}$ 。用其他金属箔做实验,也都观察到了大角度散射现象,这一现象令人惊奇。后来,人们将卢瑟福的这个实验称为 α 粒子散射实验。

根据汤姆孙原子模型, α 粒子穿过金箔后偏离原来方向的角度应该是很小的,因为电子的质量很小,不到 α 粒子的 $\frac{1}{7\,000}$, α 粒子碰到它,就像飞行着的子弹碰到一粒尘埃一样,运动方向不会发生明显的改变。当 α 粒子在原子的外面时,由于原子呈电中性,而且是球形对称分布,原子对 α 粒子没有作用力;当 α 粒子接近原子或进入原子内部时,由于正电荷均匀分布在原子球体中,越靠近球心,其受到的电场力越小, α 粒子也不应发生大角度的散射。因此,汤姆孙原子模型无法解释 α 粒子的大角度散射现象。



物理聊吧

(1) $1\,\mu\text{m}$ 厚的金箔大约有3 300层原子,绝大多数 α 粒子穿过金箔后仍沿原来的方向前进,这说明了什么?

(2) 散射的 α 粒子有极少数偏转角超过 90° ,有的甚至被原路弹回,偏转角几乎达到 180° 。请你猜想一下原子内部正电荷的分布情况。

2. 卢瑟福原子模型

卢瑟福(图4-8)无法用汤姆孙原子模型解释 α 粒子大角度散射现象,这种现象就好像一颗炮弹射到一张薄纸上,竟被薄纸弹回来一样不可思议。卢瑟福尊重实验事实,利用与原子结构有关的信息,经过严谨的理论推导,于1911年提出了原子核式结构模型。他认为,原子内部有一个很小的核,称为原子核,原子的全部正电荷及几乎全部的质量都集中在原子核内;电子在原子核外面运动。卢瑟福原子模型有些像太阳系,电子绕原子核运行就像太阳系的行星绕太阳运行似的。因此,原子核式结构模型又被称为行星模型。



图4-8 卢瑟福

按照这个模型, α 粒子穿过原子时,电子对 α 粒子运动的影响很小,影响 α 粒子运动的主要因素是原子核。若 α 粒子穿过金箔时离核较远,受到的斥力很小,它们的运动几乎不受影响;只有 α 粒子从原子核附近飞过,才会明显地受到原子核的库仑力而发生大

角度偏转（图4-9）。因为原子核很小， α 粒子十分接近它的机会很少，所以绝大多数 α 粒子基本上仍按直线方向前进，发生偏转的粒子中大多数偏转角度也不大，只有极少数 α 粒子发生大角度偏转，甚至被弹回。卢瑟福核式结构模型很好地解释了 α 粒子大角度散射现象。

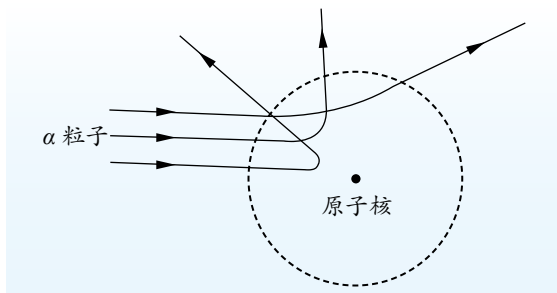


图4-9 α 粒子散射示意图



方法点拨

卢瑟福把原子的结构跟太阳系比较，认为原子核是原子的中心，正像太阳是太阳系的中心一样。电子隔着很远的距离沿轨道绕着原子核旋转，正像行星隔着很远的距离沿轨道绕太阳旋转一样。这是科学类比方法的又一应用。

根据卢瑟福的原子核式结构模型，可计算出原子核直径的数量级应在 10^{-14} m 以下。进一步的研究表明，原子核直径的数量级为 10^{-15} m，原子直径的数量级为 10^{-10} m，原子核的直径只相当于原子直径的十万分之一。

原子核式结构模型，给当时的物理学家和化学家以巨大震动，对原子物理学的发展起了重大推动作用。



拓展一步

原子核大小的估计

由 α 粒子散射实验的数据可估计出原子核的大小。当 α 粒子与原子核发生弹性正碰时， α 粒子以接近 180° 的角度返回。假定原子核静止不动， α 粒子以一定的初动能接近原子核，达到离原子核的最小距离时，初动能完全转变为在原子核电场中的电势能，然后在原子核的排斥作用下以接近 180° 的角度返回。

假设 α 粒子的初速度为 v_0 ，质量为 M_α ，金属箔的原子序数为 Z ， α 粒子接近原子核的最小距离为 $r_{\min}$ 。根据初动能等于核电场中的电势能，即

$$\frac{1}{2} M_\alpha v_0^2 = k \frac{2e \cdot Ze}{r_{\min}}$$

可得

$$r_{\min} = \frac{4ke^2Z}{M_\alpha v_0^2}$$



科学书屋

卢瑟福及其贡献

卢瑟福，英国著名物理学家，原子核物理学之父。学术界公认他为伟大的实验物理学家。

卢瑟福首先提出放射性半衰期的概念，证实放射性涉及从一个元素到另一个元素的蜕变。他又将射线按照贯穿能力分类为 α 射线与 β 射线，并且证实前者就是氦原子核。他因为“对元素蜕变以及放射化学的研究”，荣获1908年诺贝尔化学奖。

卢瑟福领导的团队根据 α 粒子散射实验现象提出原子核式结构模型。该实验被评为“最美物理实验”之一。他成功地在氦原子核与 α 粒子的核反应中将原子核分裂，且在同一实验中发现了质子。



节练习

1. 简述卢瑟福是如何建立原子模型的，他建立的模型有什么特点及意义？
2. 关于 α 粒子散射实验，下列说法正确的是
 - A. 多数 α 粒子穿过金箔后仍沿原方向前进，极少数发生较大偏转，甚至被弹回
 - B. 当 α 粒子接近电子时，是电子引力使其发生明显偏转
 - C. 实验表明原子中心有一个极小的核，它占原子体积的极小部分
 - D. 实验表明原子中心的核集中了原子的全部正电荷及全部质量
3. 已知氢原子的半径是 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ 。按照卢瑟福的原子模型，若近似认为电子绕原子核做匀速圆周运动，求电子绕原子核运动的速率和频率。
4. 已知 α 粒子的质量约为电子质量的7300倍。如果 α 粒子以速度 v 与电子发生弹性正碰（假定电子原来是静止的），求碰撞前后 α 粒子的速度变化，并由此说明为什么原子中的电子不能使 α 粒子发生明显偏转。



请提问

第3节

光谱与氢原子光谱

物质发光虽然有多种方式，但本质上都是由它们的原子内部的状态发生变化而产生的，研究物质发光也就成为研究原子结构的线索之一。本节我们将学习光谱的基础知识及氢原子光谱的特点。

1.不同的光谱

当复色光经过棱镜或光栅后，被色散开的单色光按波长（或频率）大小依次排列的图案，称为光谱。太阳光通过三棱镜折射后，会形成由红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫顺次连续分布的彩色光谱，覆盖了 $400 \sim 760 \text{ nm}$ 的可见光区，如图 4-10 所示。像这种包含有各种色光且连续分布的光谱称为连续光谱。

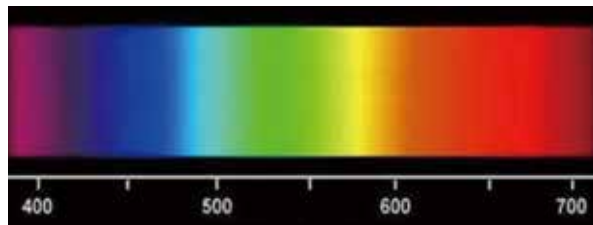


图 4-10 连续光谱

有些光谱不是连续的，而是由一条条的亮线组成，这种光谱称为线状光谱（图 4-11）。原子的发射光谱都是线状光谱，这些亮线称为原子的特征谱线。每种原子都有独自的特征谱线，人们利用特征谱线来鉴别物质或确定物质的化学组成，这种方法称为光谱分析。光谱分析在科学研究中有着广泛的应用，如人们曾通过光谱分析发现了若干新元素，像铯、铷、铊、铟、镓等；通过光谱分析检查半导体材料的纯度等。

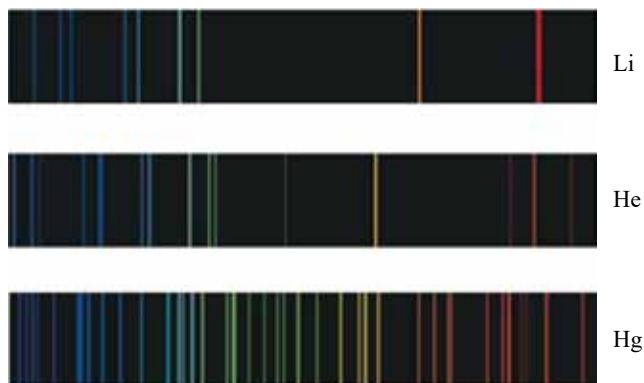


图 4-11 线状光谱



拓展一步

吸收光谱

光谱可分为发射光谱和吸收光谱。物体自身发光形成的光谱称为发射光谱，发射光谱又分为连续光谱和线状光谱。高温物体发出的包含连续分布的各种波长的光通过其他物质时，某些波长的光被该种物质吸收后，在连续光谱中相应波长的位置上便出现了暗线，这样的光谱称为吸收光谱（图 4-12）。

19 世纪初，人们在研究太阳光谱时，发现它的连续光谱中有许多暗线。人们最初不知道这些暗线是怎样形成的，直到发现了吸收光谱的成因后，才知道这是太阳内部发出的强光经过温度比较低的太阳大气层时形成的吸收光谱。仔细分析这些暗线，把它跟各种原子的特征谱线对照，人们就知道太阳大气层中存在钠、镁、铜、锌、镍等金属元素。

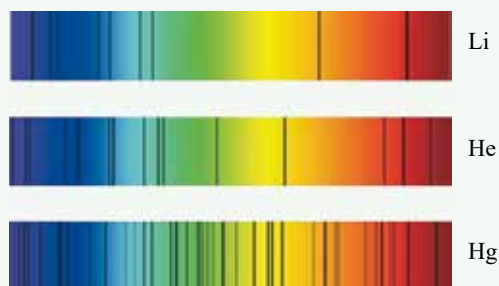


图 4-12 吸收光谱

2. 氢原子光谱

把不同的气体放电管接入高电压，就会发出不同颜色的光。下面我们通过实验观察气体放电发光的现象。



迷你实验室

观察气体放电管发光

观察气体放电发光的装置，如图 4-13 所示，不同放电管内充有不同物质的稀薄气体。当感应圈给放电管两端加上高电压，管内气体分子在强电场作用下发生电离就会发光。

将金属导杆分别接触不同放电管的上端，观察并比较其发光情况。

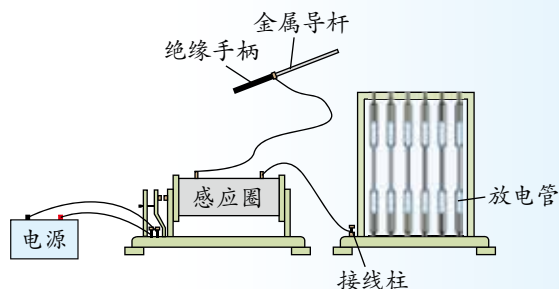


图 4-13 观察气体放电管发光装置示意图

由上述实验现象可见，不同物质的稀薄气体发出光的颜色不同。若对这些可见光的光谱进行分析，其特征谱线不同。

19 世纪，许多物理学家试图通过原子光谱来分析原子结构，由于氢是最轻的元素，且光谱相对简单，人们对氢原子光谱进行了很多研究。

图 4-14 展示了氢原子在可见光区域的光谱线。利用专门的仪器和方法，可测得：红色的 H_α 线，波长为 656.2 nm；蓝绿色的 H_β 线，波长为 486.1 nm；青色的 H_γ 线，波长为 434.0 nm；紫绿色的 H_δ 线，波长为 410.2 nm。这几个波长数值构成了氢原子的“印记”，不论是何种化合物的光谱，只要它含有这些波长的光谱线，我们就能断定这种化合物一定含有氢。



图 4-14 氢原子在可见光区域的光谱线

氢原子光谱的另一个特点是 $H_\alpha \sim H_\delta$ 两相邻光谱线间的距离越来越小，表现出明显的规律性。1885 年，瑞士科学家巴耳末 (J.J. Balmer, 1825—1898) 总结出了氢原子在可见光区域的光谱线遵循的规律

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

式中， R 称为里德伯常量， $R = 1.096\,775\,81 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 。

这个公式称为巴耳末公式，满足该式的光谱线称为巴耳末系。

分别将 $n = 3, 4, 5, 6, \dots$ 代入公式后，便可计算出对应的波长 λ ，而这些计算值都与氢原子光谱线吻合。



拓展一步

里德伯公式

1889 年，里德伯 (J. Rydberg, 1854—1919) 提出了一个普遍的公式

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

该公式表示氢原子的任一条光谱线都可表示为两个光谱项之差，氢原子光谱是各种光谱项差的综合。例如，当 $m = 2$ 时，里德伯公式就变为巴耳末公式，对应的谱线系为巴耳末系。后来，人们通过实验先后发现了氢原子其他谱线系的规律，如在红外区的帕邢系 ($m = 3; n = 4, 5, 6, \dots$) 和紫外区的赖曼系 ($m = 1; n = 2, 3, 4, \dots$)。这些实验规律都能很好地用里德伯公式解释。里德伯公式是经验公式，却与实验事实符合得很好。



节 练习

- 谈谈连续光谱与线状光谱的区别与联系。
- 利用光谱分析的方法能鉴别物质的组成成分。关于光谱分析，下列说法正确的是
 - 利用高温物体的连续光谱可鉴别其组成成分
 - 利用物质的线状光谱可鉴别其组成成分
 - 吸收光谱的暗线反映高温物体的组成成分
 - 同一种物质线状光谱的亮线与吸收光谱的暗线没有联系
- 关于太阳光谱，下列说法正确的是
 - 太阳光谱是吸收光谱
 - 太阳光谱中的暗线，是太阳光经过太阳大气层时某些特定频率的光被吸收后产生的
 - 根据太阳光谱中的暗线，可分析太阳的物质组成
 - 根据太阳光谱中的暗线，可分析地球大气层中含哪些元素
- 请根据巴耳末公式 $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ ，计算当 $n = 3, 4, 5, 6$ 时的波长，并与实验结果进行对比。
- 查阅相关资料，了解光谱分析在科学研究中的应用。

请提问



第4节

玻尔原子模型

卢瑟福的原子核式结构模型不能解释原子光谱等一些物理现象。丹麦物理学家玻尔针对这些问题，提出了新的原子结构模型。本节我们将学习玻尔原子模型及其对氢原子光谱的解释。

1.玻尔原子模型

按照经典电磁理论，绕原子核做圆周运动的电子应向外辐射电磁波，其能量要逐渐减少。随着能量的减少，电子绕原子核运行的轨道半径会减小，电子应沿螺旋线轨道落入原子核，从而导致原子不稳定，但实际上原子却是稳定的。另外，电子辐射的电磁波的频率应等于它绕原子核运行的频率，随着轨道半径的不断变化，电子绕原子核运行的频率不断变化，辐射的电磁波的频率也应不断变化。这样，大量原子发光的频率应当是连续变化的，而实际上原子光谱是不连续的线状光谱。卢瑟福的原子核式结构模型不能解释原子的稳定性和原子光谱的不连续性。

玻尔在卢瑟福的原子核式结构模型的基础上提出了玻尔原子模型，其基本假设如下：

(1) 轨道定态

原子核外的电子只能在一些分立的特定轨道上绕核运动；电子在这些轨道上运动时，原子具有一定能量，其数值也是分立的，电子的轨道和原子的能量都是量子化的。电子虽然做圆周运动，但不向外辐射能量，处于稳定的状态，电子处于分立轨道的这些状态称为定态 [图 4-15 (a)]。

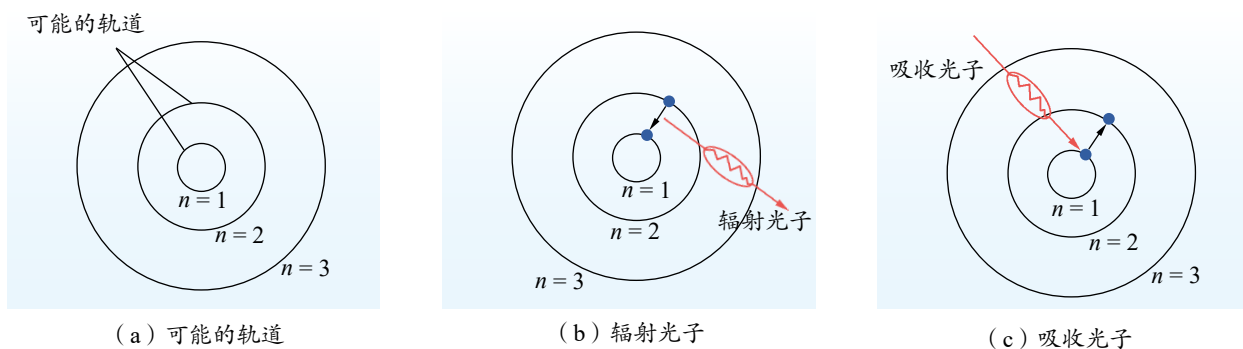


图 4-15 玻尔原子模型示意图



(2) 频率条件

当电子从能量较高的定态轨道跃迁到能量较低的定态轨道时，原子会辐射光子[图 4-15 (b)]。反之，当吸收光子时，电子会从能量较低的定态轨道跃迁到能量较高的定态轨道[图 4-15 (c)]。辐射（或吸收）的光子的能量 $h\nu$ 由两个定态的能量差决定，即该光子的能量应满足频率条件

$$h\nu = E_m - E_n \quad (m > n)$$

2. 氢原子的能级结构

在玻尔的原子模型中，原子只能处于一系列不连续的能量状态。在每个状态中，原子的能量值都是确定的，各个确定的能量值称为**能级**（energy level）。

氢原子在不同能级上的能量值和相应的电子轨道半径分别为

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

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

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

根据以上结果，若将氢原子所有可能的能量值画在一张图上，则可得到氢原子的能级结构示意图（图 4-16）。

在正常状态下，原子处于最低能级，电子受核的作用力最大而处于离核最近的轨道，这时原子的状态称为**基态**（ground state）。电子吸收能量后，原子从低能级跃迁到高能级，这时原子的状态称为**激发态**（excited state）。当电子从高能级轨道跃迁到低能级轨道时，原子会辐射能量；当电子从低能级轨道跃迁到高能级轨道时，原子要吸收能量。因为能级是不连续的，所以原子在电子跃迁时吸收或辐射的能量都不是任意的，这个能量等于电子跃迁时始、末两个能级间的能量差。能量差值不同，辐射的光子频率也不同，由此便产生了不同波长的光。

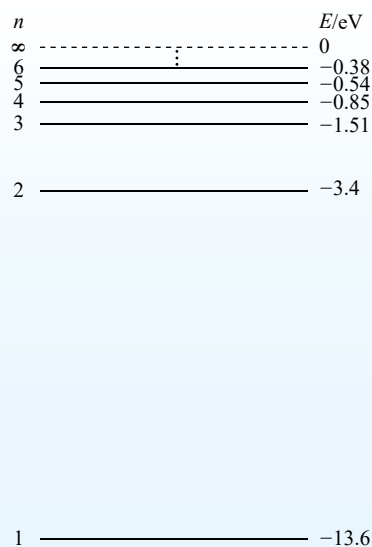


图 4-16 氢原子能级结构示意图



物理聊吧

当电子从离原子核较近的轨道跃迁到离原子核较远的轨道上时，电子受原子核的作用力怎样变化？电子的电势能怎样变化？在玻尔的氢原子能级公式中，为什么原子的能量是负值？请与同学讨论交流。

3. 解释氢原子光谱

人们在了解原子内部结构之前，就已观察到了气体的光谱。长期以来，人们无法对气体光谱进行解释。玻尔理论的最成功之处，就是解释了氢原子的光谱。

由玻尔理论可知，激发到高能级 E_m 的电子跃迁到低能级 E_n ，辐射出的光子的能量为

$$h\nu = E_m - E_n$$

$$= \frac{E_1}{m^2} - \frac{E_1}{n^2}$$

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

此式在形式上与氢原子光谱规律的波长公式一致。当 $n=2, m=3, 4, 5, 6, \dots$ 时，这个式子与巴耳末公式一致。电子从更高的能级跃迁到 $n=2$ 的能级，可得氢原子巴耳末系的光谱线（图 4-17）。

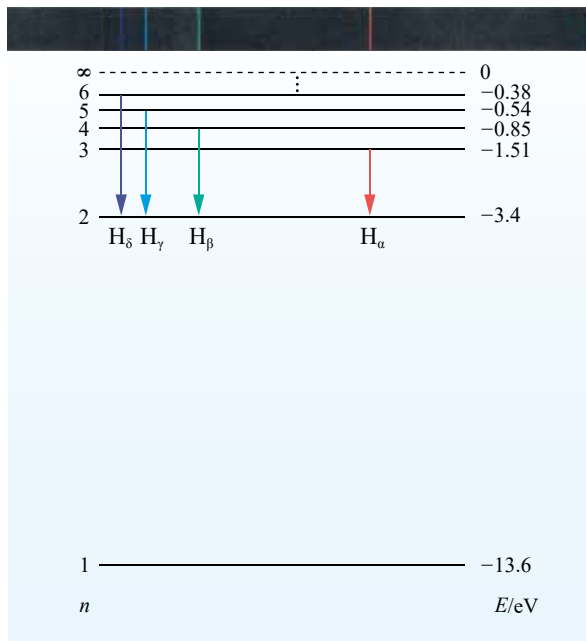


图 4-17 氢原子光谱巴耳末系示意图

拓展一步

氢原子其他谱线系的解释

玻尔理论也能解释氢原子光谱其他线系的规律。例如，氢原子的电子从较高能级跃迁到 $n=1$ 的能级时，可得到紫外区的赖曼系；从较高能级跃迁到 $n=3$ 和 $n=4$ 的能级时，可分别得到帕邢系和布喇开系（图 4-18）。请查阅相关资料，试着解释上节学习的里德伯公式。

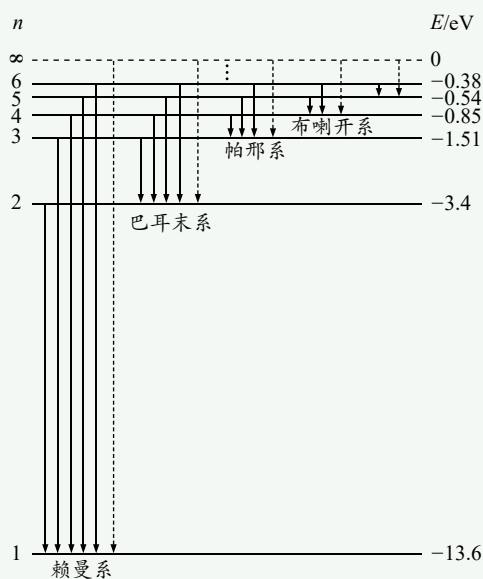


图 4-18 氢原子谱线系示意图



4.玻尔理论的局限

玻尔理论冲破了经典物理中能量连续变化的束缚，解释了原子结构和氢原子光谱的关系。然而，玻尔理论却无法解释多电子原子的光谱（如氦原子光谱）。这是因为，该理论虽然引入了普朗克的量子化概念，认为电子轨道和能量都是量子化的，但没有跳出经典力学的范围，认为电子是经典粒子，运动有确定的轨道。因此，玻尔理论是一种半经典的量子论，是向描述微观粒子规律的量子力学过渡阶段中的一个理论。

实际上，电子是微观粒子，其运动与宏观物体运动不同，没有确定的方向和轨迹。它们在原子核周围各处出现的概率是不同的。为了形象地描述电子的运动情况，人们将这些概率用点的方式表现出来，若某一空间范围内电子出现的概率大，则这里的点就密集；若某一空间范围内电子出现的概率小，则这里的点就稀疏。这种用点的疏密表示电子出现的概率分布的图形，称为电子云（图4-19）。

从汤姆孙到卢瑟福再到玻尔，科学家对原子结构的认识不断深入，并将继续向前。在这永无止境的探索过程中，科学家的智慧、思维方法及科学精神等得到了充分体现。

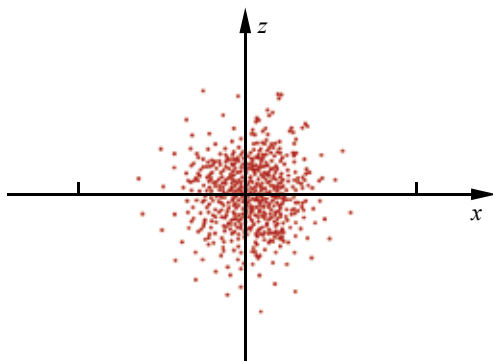


图4-19 氢原子处于 $n=1$ 状态时的电子云示意图

能认识物理模型的局限性，体会科学家在对原子结构的探索中敢于怀疑的科学精神；能对微观世界的探索产生兴趣，能感受关于微观世界研究结论的魅力。

——科学态度与责任

素养提升

例题

氢原子从 $n=4$ 的能级跃迁到 $n=1$ 的能级，所辐射光子的能量、频率和波长分别是多少？

分析

按照氢原子模型的能量公式分别计算 $n=1$ 和 $n=4$ 能级时的能量，再由能量差计算辐射光子的频率和波长。

解

根据

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}, E_1 = -13.6 \text{ eV}$$

$$\text{得 } E_4 = -13.6 \times \frac{1}{4^2} \text{ eV} = -0.850 \text{ eV}$$

辐射的光子的能量

$$\Delta E = E_4 - E_1 = [-0.850 - (-13.6)] \text{ eV} = 12.8 \text{ eV}$$

策略提炼

根据氢原子模型的能量公式解决问题时，要注意前面的负号，即最低能级的能量值最小。

光子的频率

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{12.8 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} \text{ Hz} = 3.09 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

光子的波长

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3.0 \times 10^8}{3.09 \times 10^{15}} \text{ m} = 9.71 \times 10^{-8} \text{ m} = 97.1 \text{ nm}$$

讨论

处于高能级的氢原子能自发地跃迁到低能级并辐射光子，上述处于 $n = 4$ 能级的氢原子辐射光子的频率可能有几种？



迁移

用一束单色光照射处于 $n = 4$ 能级的氢原子使其电离（电子脱离原子核的束缚成为自由电子），光子的能量至少为多大？

能了解人类探索原子及其结构的历史，知道原子的核式结构模型，通过对氢原子光谱的分析，了解原子的能级结构；能运用所学知识分析微观世界的一些问题。具有与原子结构相关的物质观念、运动与相互作用观念和能量观念。

知道不同原子结构模型之间的区别，知道原子模型的建立是在实验的基础上不断发展和修正的过程，能利用玻尔原子模型解释氢原子光谱等相关现象；能分析氢原子光谱，推断原子的能级结构；能恰当使用证据说明不同的原子结构模型；有不断创新的行为。

——物理观念，科学思维

素养提升



科学书屋

玻尔

玻尔（图 4-20），丹麦物理学家。

1912 年，玻尔在曼彻斯特大学卢瑟福的实验室工作过四个月，其时正值卢瑟福原子核式结构模型的建立与检验阶段，他十分了解核式结构模型的局限性。1913 年，他提出了定态跃迁原子模型理论。1922 年，他因对原子结构及原子辐射的研究而获得诺贝尔物理学奖。

1920 年，玻尔在丹麦创立了哥本哈根大学理论物理研究所，并担任所长 40 年。在创立量子力学的过程中，玻尔领导的研究所成为世界原子物理研究中心。



图 4-20 玻尔



节 练 习

1. 玻尔理论中哪些方面引入了量子化的思想？存在哪些不足之处？
2. 氦原子被电离一个核外电子，形成类氢结构的氦离子。已知基态的氦离子能量 $E_1 = -54.4 \text{ eV}$ ，氦离子能级结构如图所示。在具有下列能量的光子中，不能被基态氦离子吸收而发生跃迁的是

A. 40.8 eV B. 43.2 eV C. 51.0 eV D. 56.0 eV

3. 一个氢原子从 $n=3$ 能级跃迁到 $n=2$ 能级，该氢原子

A. 放出光子，能量增加 B. 放出光子，能量减少
C. 吸收光子，能量增加 D. 吸收光子，能量减少

4. 根据玻尔的氢原子模型，氢原子的核外电子在第 1、3 轨道上运动时，求它们的轨道半径之比、速率之比、周期之比及能量之比。

5. 有若干氢原子处于 $n=4$ 的能级，已知氢原子的基态能量 $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ ，普朗克常量 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 。

(1) 这些氢原子的光谱共有几条谱线？

(2) 这些氢原子发出的光子的最大频率是多少？

6. 已知氢原子基态的能量 $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ 。大量氢原子处于某一激发态，这些氢原子可能发出的所有的光子中，频率最高的光子能量为 $-0.96 E_1$ 。

(1) 求频率最低的光子的能量。(结果保留 2 位有效数字)

(2) 这些光子可具有多少种不同的频率？

n	E/eV
∞	0
4	-3.4
3	-6.0
2	-13.6
1	-54.4

第 2 题



请提问



章末练习

科学认知

- 关于卢瑟福的原子核式结构,下列叙述正确的是
 - 原子是一个质量分布均匀的球体
 - 原子的质量几乎全部集中在原子核内
 - 原子的正电荷和负电荷全部集中在一个很小的核内
 - 原子直径的数量级大约是 10^{-10} m, 原子核直径的数量级是 10^{-15} m
- 对于原子光谱,下列说法正确的是
 - 原子光谱是不连续的
 - 因为原子都是由原子核和电子组成的,所以各种原子的光谱是相同的
 - 各种原子的原子结构不同,所以各种原子的光谱也是不同的
 - 分析物质的光谱,可鉴别物质含哪种元素
- 下列叙述符合玻尔理论的是
 - 电子的可能轨道的分布是不连续的
 - 电子从一条轨道跃迁到另一条轨道上时,原子将辐射或吸收一定的能量
 - 电子在可能轨道上绕原子核做圆周运动,不向外辐射能量
 - 电子没有确定的轨道
- 太阳光谱中有许多暗线,它们对应着某些元素的特征谱线。产生这些暗线的原因是
 - 太阳表面大气层中缺少相应的元素
 - 太阳内部缺少相应的元素
 - 太阳表面大气层中存在着相应的元素
 - 太阳内部存在着相应的元素
- 氢原子从基态跃迁到激发态时,下列说法正确的是
 - 动能变大,势能变小,总能量变小
 - 动能变小,势能变大,总能量变大
 - 动能变大,势能变大,总能量变大
 - 动能变小,势能变小,总能量变小
- 氢原子从能级 m 跃迁到能级 n 时辐射红光的频率为 ν_1 , 从能级 n 跃迁到能级 k 时吸收紫外光的频率为 ν_2 。已知普朗克常量为 h , 若氢原子从能级 k 跃迁到能级 m , 辐射的光子能量为多少?
- 氢原子第 n 能级的能量为 $E_n = \frac{E_1}{n^2}$, 其中 E_1 为基态能量。当氢原子由第 4 能级跃迁到第 2 能级时, 发出光子的频率为 ν_1 。若氢原子由第 2 能级跃迁到基态, 发出光子的频率为 ν_2 , 则 $\frac{\nu_1}{\nu_2}$ 为多少?
- 氢原子基态能量 $E_1 = -13.6$ eV, 电子绕原子核做圆周运动的半径 $r_1 = 5.3 \times 10^{-11}$ m。当氢原子处于 $n=4$ 激发态时, 求:
 - 原子系统具有的能量;
 - 电子在轨道上运动的动能。

温故知新

- 一定质量的理想气体从外界吸收了 4.2×10^5 J 的热量, 同时气体对外界做了 6×10^5 J 的功。
 - 物体的内能增加还是减少? 变化量是多少?
 - 分子势能增加还是减少?
 - 分子的平均动能增加还是减少?



第5章

原子核与核能

导 入 打开原子核的大门

第1节 认识原子核

第2节 原子核衰变及半衰期

第3节 核力与核能

第4节 核裂变和核聚变

第5节 核能的利用与环境保护

►►本章学业要求

- 能了解原子核的组成和核力的内涵，知道四种基本相互作用，能根据质量数守恒和核电荷数守恒写出核反应方程，知道放射性、原子核衰变、半衰期和同位素等，知道原子核结合能、原子核裂变与聚变；能运用所学知识解释核物理的一些技术应用。具有和原子核与核能相关的物质观念、相互作用观念和能量观念。

——物理观念

- 能用原子核的结构模型解释与核物理有关的问题；能对原子核与放射性物理问题进行分析和推理，能推算原子核的半衰期，知道半衰期的统计意义；能恰当使用证据证明相关结论；能对已有结论提出有依据的质疑，采用不同方式分析解决物理问题。

——科学思维

- 能查阅资料，提出和原子核与核能相关的物理问题；能进行调研，收集和原子核与核能相关的信息；能处理信息，形成相关的结论；能完成和原子核与核能相关的科技论文，参与有关的科技交流活动。

——科学探究

- 能体会人类对物质结构的探索是不断深入的，科学的探索没有止境；能自觉抵制违反实事求是精神的行为；能主动关注核技术应用对人类生活和社会发展带来的影响，能遵守普遍接受的与科技研究有关的道德与规范，有保护环境、理性评价科技应用的良好习惯与使命感。

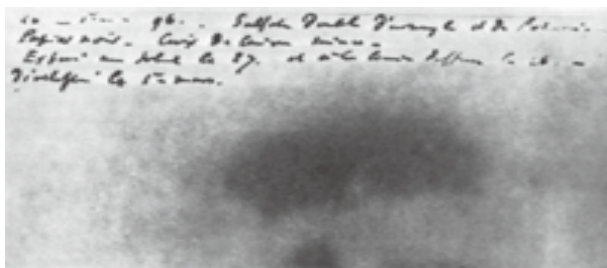
——科学态度与责任

导 人

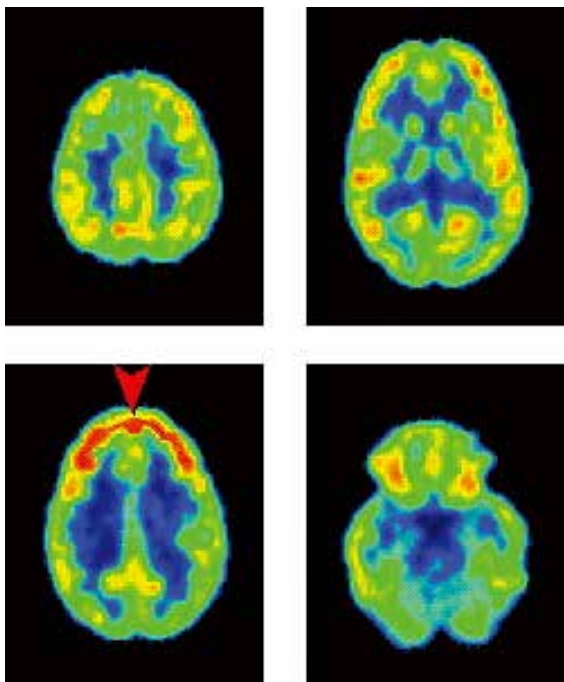
打开原子核的大门

19 世纪末，科学家发现了打开原子核大门的一把钥匙——物质的放射性。从此，原子核越来越清晰地走进了人类的视野，走进了人类的生活。

1896 年的一天，法国物理学家贝可勒尔偶然发现，铀盐能发出一种未知的新奇射线。这种射线能透过黑纸使照相底片感光，留下黑黑的印迹。贝可勒尔由此发现了物质的放射性。



贝可勒尔发现铀盐放射现象的感光底片



放射性在医学中的应用

放射性的发现意义深远，它使人们对物质的微观结构有了更新的认识，使人类找到了打开原子核大门的钥匙。通过放射性，人们认识到原子核是可再分的。以放射性物质发出的射线为工具，科学家又发现了质子和中子等微观粒子，对原子核有了进一步的认识。现在，放射性已经成为科学研究的重要工具，在医学、工业、农业、考古等方面有广泛用途，与人们的生活密切相关。

你了解原子核的奥秘吗？让我们通过本章的学习，一起进入原子核的世界吧。

第1节

认识原子核

为什么说放射性的发现使人们认识到原子核还可再分？原子核有着怎样的结构？本节我们将学习这些内容，进一步探索微观世界的奥秘。

1.天然放射现象的发现

1895年，德国物理学家伦琴发现了一种人们未曾了解的射线，并将这种射线命名为X射线。1896年，法国物理学家贝可勒尔知道了伦琴的发现，对此很感兴趣，他试图研究X射线与荧光的联系，于是选择了一种经阳光照射后能发荧光的铀盐来做实验。实验过程中他意外地发现，未经阳光照射的铀盐也能使照相底片感光。这表明铀盐除能发出X射线外，还能发出某种看不见的射线，这种射线能穿透黑纸，使照相底片感光。物质能自发地放出射线的现象称为**天然放射现象**。物质放出射线的这种性质，称为**放射性**（radioactivity）。具有放射性的元素，称为**放射性元素**（radioactive element）。

法国物理学家皮埃尔·居里夫妇对铀和钍的矿石进行了深入研究，发现了两种放射性更强的新元素，即钋（Po）和镭（Ra）。天然放射性的发现开拓了一个新的研究领域。



科学书屋

玛丽·居里

玛丽·居里（M. Curie, 1867—1934，图 5-1），即居里夫人，1867年出生于波兰华沙一个中学教师家庭。她从小学习勤奋刻苦，24岁到法国巴黎大学攻读物理学和数学。1895年和皮埃尔·居里（P. Curie, 1859—1906）结婚。1896年，贝可勒尔发现了放射性现象，引起了居里夫妇的极大兴趣，他们开始从事放射性研究。

1898年，居里夫妇发现了钋和镭，其中“钋”是居里夫人为了纪念祖国波兰而命名的。居里夫妇在极端艰苦的条件下，以惊人的毅力，终于在1902年从几吨沥青铀矿渣中分



图 5-1 玛丽·居里

离出 0.12 g 纯氯化镭。1903 年，居里夫妇和贝可勒尔一起获诺贝尔物理学奖。1910 年居里夫人成功提炼出纯镭，1911 年居里夫人又获诺贝尔化学奖。

居里夫人一生谦虚谨慎，受到世人的尊敬。爱因斯坦曾评价，在他认识的著名人物中，居里夫人是唯一不为盛名所累之人。

2. 认识三种放射线

铀、钋和镭等放射性元素放出的射线到底是什么呢？

我们可通过让射线穿过强电场或强磁场来研究其性质。如图 5-2 所示，放射性元素通常盛放在特殊的容器中，当射线从容器的小孔中穿出时，只是细细的一束射线，让射线通过强磁场，射线分裂为三束，这表明有三种射线，且它们的电性不同。带正电的射线向左偏转，称为 α 射线；带负电的射线向右偏转，称为 β 射线；不发生偏转的射线不带电，称为 γ 射线。

α 射线是高速运动的氦原子核粒子流，射出时的速率可达 $0.1c$ 。 α 射线有很强的电离作用，很容易使空气电离，使照相底片感光的作用增强，但它的穿透能力很弱，在空气中只能飞行几厘米，一张铝箔或一张薄纸就能将它挡住。

β 射线是高速运动的电子流，射出时的速率可达 $0.99c$ ，穿透能力较强，能穿透几毫米厚的铝板，但电离作用较弱。

γ 射线是波长很短的电磁波，穿透能力很强，能穿透几厘米厚的铅板，但电离作用很弱。

三种射线的穿透能力如图 5-3 所示。

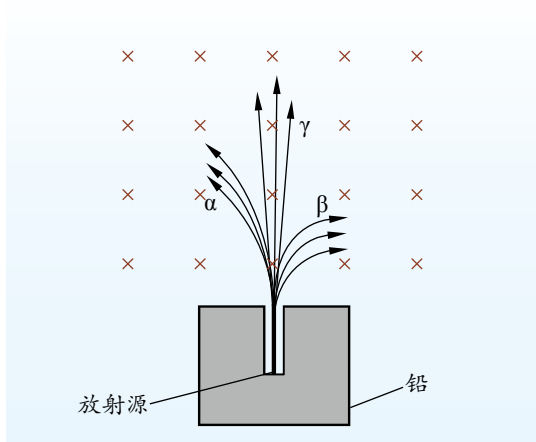


图 5-2 射线通过强磁场发生偏转的示意图

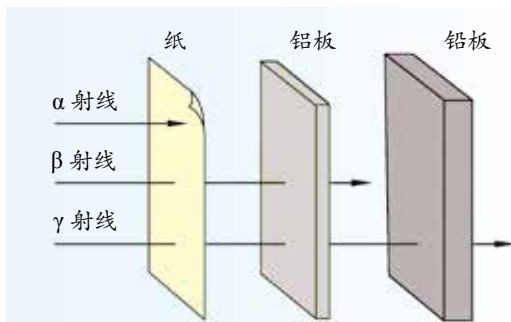


图 5-3 三种射线的穿透能力示意图

3. 质子和中子的发现

为了探测原子核的结构，1919 年，卢瑟福做了用 α 粒子轰击氮原子核的实验。实验装置如图 5-4 所示，容器 C 中放有放射性物质 A ，从 A 中放射出的 α 粒子能射到铝箔 F 上，铝箔后面是荧光屏 S 。选取适当厚度的铝箔，使 α 粒子恰好不能穿透铝箔，用显微镜 M 观察，荧光屏没有闪烁

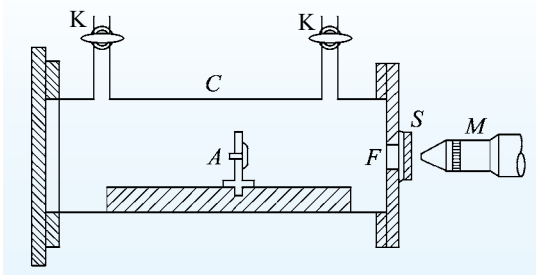


图 5-4 用 α 粒子轰击氮原子核实验装置示意图



的亮点。经阀门 K 向容器 C 中加入氮气后，可在荧光屏 S 上观察到闪烁的亮点。

卢瑟福研究后发现，闪烁的亮点是 α 粒子击中氮原子核后，从原子核中飞出的新粒子产生的。后来，他把这种粒子分别引进电场和磁场，根据该粒子在电场和磁场中的偏转情况，测出其质量和电荷量，确定了它就是氢原子核，又称为**质子**（proton）。

质子是 α 粒子直接从氮原子核中轰击出来的，还是 α 粒子与氮原子核结合成复核后从复核中放出来的呢？为了探明这个问题，1925 年，英国物理学家布莱克特（P. Blackett, 1897—1974）在充氮的云室里重做了这个实验。他拍摄了 2 万多张云室照片，从 40 多万条 α 粒子径迹照片中发现，有 8 条径迹产生了分叉。分析表明， α 粒子的径迹在与氮原子核碰撞后不再出现；形成的分叉径迹中，细长的径迹是质子的径迹，另一条短粗的径迹是新产生的核的径迹，如图 5-5 所示。这就表明， α 粒子击中氮原子核后形成一个复核，而这个复核不稳定，生成后随即发生变化，放出一个质子。



图 5-5 布莱克特拍摄的云室照片

后来，人们用同样的方法从氟、钠、铝等原子核中也轰击出了质子，这些研究都表明，质子是原子核的组成部分。

质子带一个单位的正电荷，用符号 p 表示，质量 $m_p = 1.672\,623\,1 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。

原子核带正电，质子正好也带正电，原子核只由质子组成吗？这种猜想不能解释当时已发现的一些物理现象。例如，有实验结果显示，带正电的质子的质量大体上只占原子核质量的一半。这表明，原子核不仅仅是由质子组成的。卢瑟福猜想原子核内可能还存在着质量跟质子相近的不带电的中性粒子，并将其称为**中子**（neutron）。

中子的发现是许多科学家研究的结晶。1930 年，科学家发现，用从钋发出的 α 射线轰击铍（Be）时，会产生一种不受电场和磁场影响、穿透能力很强的射线。1932 年，约里奥—居里夫妇发现，如果用这种射线轰击石蜡，能从石蜡中轰击出质子（图 5-6）。

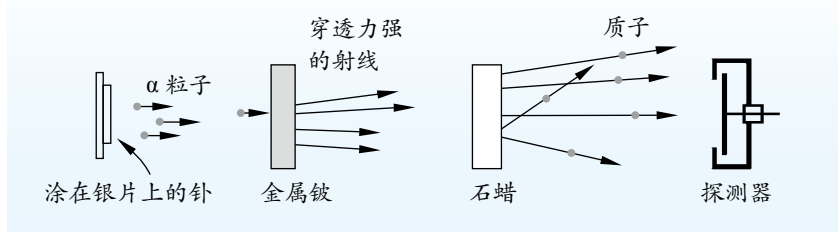


图 5-6 从石蜡中轰击出质子的实验示意图

查德威克（J. Chadwick, 1891—1974）在这些研究的基础上，对云室中的这种射线与氮原子核碰撞的径迹进行了深入研究，发现这种射线是一种不带电、质量接近质子的粒子流，这种粒子正是卢瑟福猜想的中子。后来，大量实验证实，从许多元素的原子核中都能轰击出中子，这表明中子是原子核的组成部分。中子不带电，用符号 n 表示，质量 $m_n = 1.674\,928\,6 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。



查德威克与中子的发现

查德威克(图5-7),英国物理学家。1911~1913年在卢瑟福指导下从事放射性研究并获得曼彻斯特大学理学硕士学位。

20世纪30年代,德国科学家用 α 粒子去轰击铍,发现一种穿透力极强的射线,他们一致认为是高能量的 γ 射线。接着,约里奥—居里夫妇用这种射线轰击石蜡,发现有大量质子被轰击出来。他们解释为这是由 γ 光子撞击氢离子的结果,认为发现了 γ 射线的一种新应用。这引起了查德威克的高度重视,他立即重做了约里奥—居里夫妇的实验。通过从能量守恒和动量守恒角度进行分析,查德威克认为 γ 射线不具备从原子中轰击出质子所需要的动量。他进一步研究获知,组成这种射线的粒子质量与质子质量几乎相等,这就是中子。

中子的发现使人们对原子核的组成有了正确的认识,使人们对物质结构的认识产生了新的飞跃。因为中子不带电且穿透力强,是转变原子核的理想“炮弹”,为人工转变原子核提供了有效的手段。查德威克因发现中子而获得1935年诺贝尔物理学奖。

查德威克不轻信别人的实验解释,敢于突破传统观念的束缚,善于独立思考和实验探索,这是他能发现中子的重要原因。



图5-7 查德威克

4.原子核的组成

质子和中子都是原子核的组成部分,人们将质子和中子统称为**核子**(nucleon)。

现在我们知道:原子核是由一定数量的质子和中子组成的,质子和中子的质量几乎相等,原子核的质量等于核内质子和中子的质量之和。原子核的质量近似等于核子质量的整数倍,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**(mass number)。质子带正电,中子不带电,原子核的电荷数(简称核电荷数)就等于它的质子数。原子呈电中性,因此核电荷数就等于原子核外的电子数,就是元素周期表中的原子序数。即核电荷数等于质子数等于原子序数,质量数等于质子数与中子数之和,也等于核子数。

例如,常见的碳原子核的质量数是12,表明它的核子数是12;碳的原子序数是6,表明碳原子核的电荷数是6,核内有6个质子和6个中子。

我们以通式 ${}_Z^AX$ 为原子核符号,其中X为元素符号;A表示原子核的质量数,写在元素符号的左上角;Z表示核电荷数,写在元素符号的左下角。据

方法点拨

原子核太小,无法直接观察,怎样才能知道原子核的构成呢?科学家采用的方法是用高速粒子流轰击原子核,迫使原子核发生人工转变,通过对生成的新核及产生的粒子进行研究,了解原子核的构成。



此, 碳原子核就可表示为 ${}^{12}_6\text{C}$ (为了方便, 有时也可简记为 ${}^{12}\text{C}$)。同样道理, 因为 α 粒子是氦原子核, 质子是氢原子核, 所以可分别用 ${}^4_2\text{He}$ 和 ${}^1_1\text{H}$ 表示。质子有时也用符号 ${}^1_1\text{p}$ 表示, 中子则用符号 ${}^1_0\text{n}$ 表示。

研究发现, 有些原子核具有相同的质子数, 但却具有不同的中子数。物理学中, 这种具有相同质子数、不同中子数的原子核互称**同位素** (isotope)。氢有 3 种同位素, 分别称为氕、氘、氚, 符号分别是 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^3_1\text{H}$ (图 5-8)。

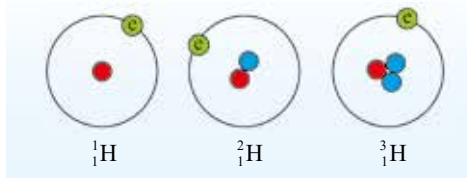
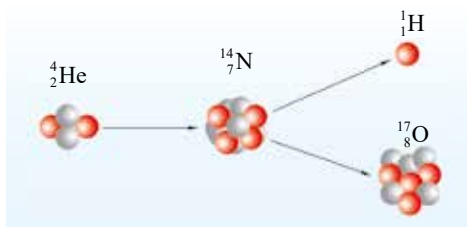
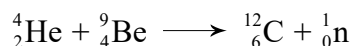


图 5-8 氢的同位素示意图

在核物理学中, 原子核在其他粒子的轰击下产生新原子核的过程称为**核反应** (nuclear reaction), 用原子核符号描述核反应过程的式子称为核反应方程。大量研究发现, 在核反应中, 质量数和核电荷数守恒, 即核反应后的质量数等于核反应前的质量数, 核反应后的核电荷数等于核反应前的核电荷数。例如, 卢瑟福发现质子的核反应 (图 5-9) 方程为



查德威克发现中子的核反应方程为

图 5-9 ${}^4_2\text{He}$ 与 ${}^{14}_7\text{N}$ 的核反应示意图

以发现中子的核反应方程为例, 核电荷数: 方程左侧为 $2 + 4 = 6$, 方程右侧为 $6 + 0 = 6$; 质量数: 方程左侧为 $4 + 9 = 13$, 方程右侧为 $12 + 1 = 13$ 。反应前后的核电荷数和质量数均守恒。



中国散裂中子源

中国散裂中子源 (CSNS) 于 2011 年动工, 2018 年 8 月 23 日通过国家验收正式投入运行。它和正在运行的美国、日本与英国的散裂中子源一起构成世界四大脉冲散裂中子源。散裂中子源就像“超级显微镜”, 是研究物质材料微观结构的理想探针, 可带动物理学、化学、生命科学、材料科学、纳米科学、医药和新型核能开发等学科发展。

散裂中子源是由加速器 (图 5-10) 提供的高能质子轰击重金属靶而产生中子, 每个高能质子可产生 20 ~ 40 个中子, 大大提高了中子源的强度, 使中子探针的功能变得更加强大。



图 5-10 回旋加速器



节练习

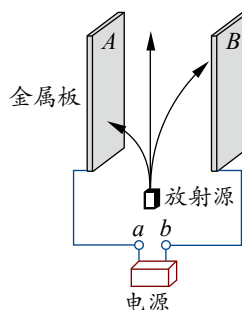
1. 请列表总结三种射线的性质。

名称	本质	射出速度	穿透能力	电离作用
α 射线				
β 射线				
γ 射线				

2. 在探索原子核的结构时，人们首先发现了质子。在发现质子后，人们根据什么认为原子核并不仅仅是由质子构成的？

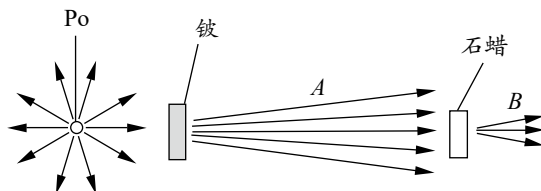
3. 研究放射性元素射线性质的实验装置如图所示。两块平行放置的金属板 A 、 B 分别与电源的两极 a 、 b 连接，放射源发出的射线从其上方小孔向外射出。则

- A. a 为电源正极，到达 A 板的为 α 射线
- B. a 为电源正极，到达 A 板的为 β 射线
- C. a 为电源负极，到达 A 板的为 α 射线
- D. a 为电源负极，到达 A 板的为 β 射线



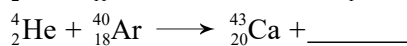
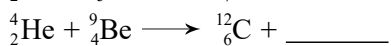
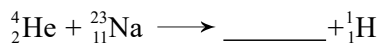
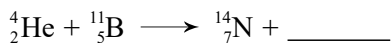
第3题

4. 查德威克发现新粒子的实验示意图如图所示。由天然放射性元素钋 (Po) 放射的 α 射线轰击铍时会产生粒子流 A ，用粒子流 A 轰击石蜡时，会轰击出粒子流 B ，请问 A 和 B 分别是什么粒子？



第4题

5. 完成下列核反应方程：



6. 查找资料，举例说明同位素在生产和科学研究中有哪些作用，写成一篇小论文，题目自拟。

请提问



第2节

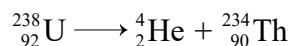
原子核衰变及半衰期

放射现象有着怎样的规律？我们如何利用放射性，又如何防护放射性污染？本节我们将学习这些内容。

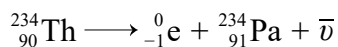
1. 原子核的衰变

射线是从原子核中释放出来的，这表明一些元素的原子核是不稳定的。原子核因释放出像 α 、 β 这样的射线（粒子流）而转变成新核的变化称为**原子核的衰变**。

放出 α 粒子的衰变称为 α 衰变。例如，原子核 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 放出 α 粒子，变成新原子核 ${}^{234}_{90}\text{Th}$ （图 5-11），衰变方程为



放出 β 粒子的衰变称为 β 衰变。例如， ${}^{234}_{90}\text{Th}$ 具有放射性，它能放出一个 β 粒子而变成新原子核 ${}^{234}_{91}\text{Pa}$ ，衰变方程为



式中， $\bar{\nu}$ 为反中微子，不带电，静止质量几乎为 0。

在原子核衰变过程中产生的新核，有些处于激发态，这些不稳定的激发态会辐射出光子（ γ 射线）而变成稳定的状态。而在自然界中，放射性元素往往要经历一系列的衰变，直到变为一种稳定的非放射性元素为止。例如，天然放射性元素 ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ 衰变成不具有放射性的元素 ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ 时，经历了 14 次衰变，同时释放出 γ 射线。

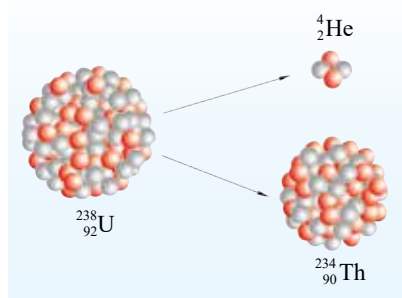


图 5-11 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 的 α 衰变示意图

2. 衰变的快慢——半衰期

放射性元素的衰变都有一定的速率。例如，10 g 的 ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ 经 α 衰变变为 ${}^{218}_{84}\text{Po}$ 的过程中，每经过 3.8 天就有一半的 ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ 发生衰变，即 ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ 从 10 g 减少到 5 g 需要经过 3.8 天，从 5 g

减少到 2.5 g 又需要经过 3.8 天……图 5-12 展示了 $^{222}_{86}\text{Rn}$ 衰变的快慢。放射性元素的原子核有半数发生衰变需要的时间称为**半衰期** (half life)。

设某放射性元素的半衰期为 T ，原来的质量为 M ，经过时间 t ，该元素的剩余质量 m 为

$$m = M \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}}$$

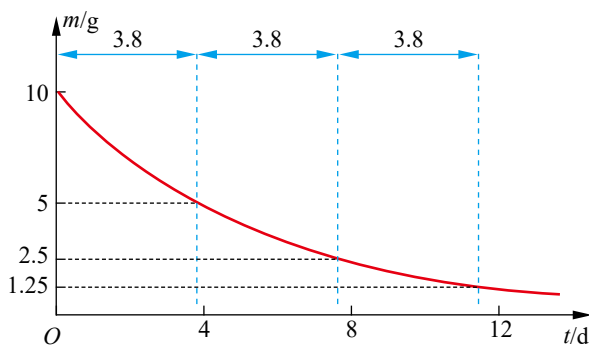


图 5-12 $^{222}_{86}\text{Rn}$ 的衰变曲线

不同元素的放射性半衰期一般不同。例如， $^{226}_{88}\text{Ra}$ 衰变为 $^{222}_{86}\text{Rn}$ 的半衰期为 1.6×10^3 年， $^{238}_{92}\text{U}$ 衰变为 $^{234}_{90}\text{Th}$ 的半衰期为 4.5×10^9 年， $^{60}_{27}\text{Co}$ 的半衰期为 5.27 年，而 $^{212}_{84}\text{Po}$ 的半衰期只有 3.0×10^{-7} 秒。

元素半衰期的长短只由原子核自身因素决定，一般与原子核所处的物理、化学状态无关。无论放射性元素所处的温度和压强如何变化、是以单质还是化合物的形式存在，原子的结构都不会受到影响，它的半衰期都不会改变。

半衰期描述的是大量原子核发生衰变的统计规律，即在大量原子核群体中，经过一定时间将有一定比例的原子核发生衰变。但对于一个特定的原子核，我们不知道它将何时发生衰变，只知道它发生衰变的概率。

3.放射性的应用

放射性在工业、农业、医疗卫生和科学研究等许多领域已得到了广泛应用。

来自宇宙的射线在大气中能产生放射性 ^{14}C ，与氧结合形成二氧化碳后进入所有活体组织，先被植物吸收，后被动物纳入。只要植物或动物生存着，它们就会持续不断地吸收 ^{14}C ，使其在机体内保持一定的水平。而当有机体死亡后，即会停止吸收 ^{14}C ，其组织内的 ^{14}C 便以 5 730 年的半衰期开始衰变并逐渐消失。对于任何含碳物质，只要测定剩余的放射性 ^{14}C 的含量，就可推断其年代。例如，提取古树木制成的碳样品 1 g，放在射线粒子计数器上进行测



图 5-13 用专门仪器估测古树木的年代

量 (图 5-13)。如果测得该样品每分钟衰变的次数是等质量现代树木所制碳样品的 $\frac{1}{4}$ ，就表明该古树木经过了 ^{14}C 的两个半衰期，即古树木距今约 11 460 年。

如果在某种元素里掺进一些该元素的放射性同位素，用仪器探测它放出的射线，就可查明这种元素的行踪。人们把具有这种用途的放射性同位素称为示踪原子。在医疗上，



医生给病人口服或静脉注射某种放射性示踪剂，它们就会参与体内特定组织器官的物质循环和代谢，并不断放出射线。用探测器追踪探查，如通过正电子发射断层摄影（简称PET扫描仪，图5-14），就可显示病人内脏器官是否发生病变。

又如，人们利用 γ 射线照射种子，可使种子内的遗传物质发生变异，培育出新的优良品种；制作放射性同位素电池，放射性同位素电池是一种把放射性同位素衰变时释放的能量转化成电能的装置，它体积小、功率大、使用寿命长，可作为人造卫星、宇宙飞船、海洋工程设施等的电源；进行 γ 射线探伤，利用 γ 射线穿透能力强的特点，可探查金属内部有没有缺陷或裂纹，这种无损探伤技术已广泛应用于冶金和机械工业。

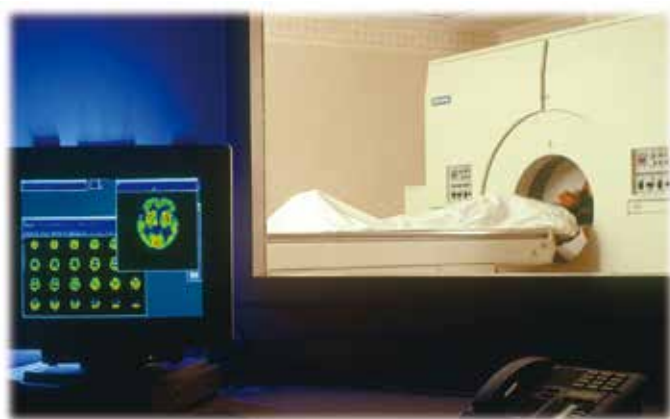


图 5-14 PET 扫描仪



科学书屋

烟雾探测器

烟雾探测器是一种能探测空气中的烟雾并自动报警的装置。图5-15是一种价格低廉、灵敏度高、利用 α 射线进行探测的烟雾探测器示意图。

探测器中装有大约0.2 mg的 $^{241}_{95}\text{Am}$ ，它是一种半衰期长达432年的放射性金属，会释放出 α 射线和 γ 射线。 α 粒子在探测腔内与空气中的氧、氮等分子碰撞，会使这些分子电离。探测腔内有两个加有低电压的极板，电离产生的正、负离子在电场力作用下移动，形成微小电流，探测器内装有能探测微小电流的芯片。烟雾一旦进入探测腔内，烟雾中的微粒会吸附部分 α 粒子，使探测腔内 α 粒子的数量减少，从而使被电离的分子数目相应减少，最终导致电极中电流减小，探测器探测到电流的变化，就会使报警电路发出警报。



图 5-15 烟雾探测器示意图

4. 放射性污染和防护

过量的放射线会对环境造成污染，对人类和自然界产生破坏作用。放射性污染主要来自核爆炸、核泄漏和医疗照射。在核电站、医院等地方，都设有辐射警示标志（图 5-16）。

核爆炸在最初几秒钟辐射出来的是强烈的 γ 射线和中子流，这些射线具有很强的穿透能力，对人体和其他生物体有很强的杀伤作用。核工业和核科学研究中的放射性原材料一旦泄漏，会对生物体和环境产生长期的辐射，重者使人当场死亡，轻者使人患放射性疾病。例如，核辐射地区癌症、甲状腺疾病患者的比例会增多。医疗中，如果放射线的剂量过大，也会导致患者受到损害，甚至造成患者死亡。

为了避免放射线的伤害，人们要尽量减少受辐射的时间，同时采取必要的防范措施。科研单位、医院和学校实验室中使用的放射源都必须装在铅制容器中，放置放射源的铅容器要锁好并贴上警示标志；核工业废料要放在厚厚的重金属箱内，深埋于地下或深海。在学校里，学生做核物理实验使用的都是放射性很弱的放射源，即便如此，在拿放射源时也要使用特制的镊子，并且不能让放射源靠近眼睛。在放射源与人体之间加屏蔽物能起到防护作用，铅的屏蔽作用最好，水、水泥等也常用作屏蔽物。

在自然界和日常生活中，宇宙射线、矿石、食物等都可能有一定的放射性，应该注意监测，防止它们的辐射超过安全标准。



图 5-16 辐射警示标志



人工放射性同位素的发现

1934 年，约里奥—居里夫妇（图 5-17）用人工方法得到了具有放射性的同位素。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（正电子的质量与电子相同，所带电荷与电子相反，为一个单位的正电荷，符号为 ${}^0_1\text{e}$ ）。他们认为铝核被 α 粒子击中后发生了下面的反应： ${}^4_2\text{He} + {}^{27}_{13}\text{Al} \longrightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n}$ 。反应生成物 ${}^{30}_{15}\text{P}$ 是磷的一种同位素，具有放射性，像天然放射性元素一样可发生衰变，衰变时放出正电子，衰变方程为 ${}^{30}_{15}\text{P} \longrightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + {}^0_1\text{e}$ 。

人工放射性同位素的发现，开拓了放射性研究的一个崭新领域。约里奥—居里夫妇因在人工放射性同位素发现上的巨大贡献，获得了 1935 年的诺贝尔化学奖。

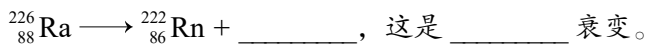


图 5-17 约里奥—居里夫妇



节 练 习

1. 把铀矿石放在一支玻璃试管里，经过几天后，在玻璃试管里发现了氦气。怎样解释这种现象？
2. 完成下面的核反应方程，并指出其衰变类型。



3. 若放射性同位素 ${}_{11}^{23}\text{Na}$ 的样品经过 6 小时只剩下 $\frac{1}{8}$ 没有发生衰变，它的半衰期是多少？
4. 放射性同位素 ${}_{90}^{232}\text{Th}$ 经 α 、 β 衰变会生成 ${}_{86}^{220}\text{Rn}$ ，其衰变方程为 ${}_{90}^{232}\text{Th} \longrightarrow {}_{86}^{220}\text{Rn} + x\alpha + y\beta$ ，求 x 和 y 的值。
5. 请收集资料，调查了解房屋装修材料和首饰材料中是否具有放射性以及相关的国家标准，了解周围人对这些放射性危害的态度。

请提问



第3节

核力与核能

我们知道，原子核由质子和中子这些核子组成。那么，核子是靠什么力来维系在一起的？这与核能又有着怎样的关系呢？本节我们将学习与此有关的内容。

1.核力与核的稳定性

在原子核中，质子和中子被约束在线度为 10^{-15} m 的区域内。因质子带正电，中子不带电，质子之间的库仑排斥力会使原子核不稳定，实际上核子却紧紧吸引在一起。是万有引力的作用吗？不是。因为两个质子间的库仑斥力比万有引力大得多，万有引力不可能将核子紧紧约束在一起。所以，一定存在除万有引力和静电力之外的另一种力，把原子核中的核子维系在一起，这种力称为**核力**（nuclear force）。

力的作用范围称为力程。核力是短程力，作用范围不能从一个原子核延伸到另一个原子核。核力是一种强相互作用，必须非常强才能抵消所有质子库仑力的作用。

我们把具有一定质子数和中子数的原子核称为核素。用横坐标表示质子数，纵坐标表示中子数，每一种核素用一小方块表示，所得到的图像称为核素图（图 5-18）。研究核素图可发现，稳定的核素几乎全落在一条曲线上，或紧靠曲线的两侧，这个区域称为核素的稳定区。对于较轻的核（ $A \leq 40$ ），库仑力影响不大，这一区域与直线 $N=Z$ 重合，说明 $N=Z$ 的核素比较稳定。当 $N、Z$ 增大到一定数值后，稳定区逐渐向 $N > Z$ 的方向偏离，这是因为库仑力是长程力，它作用于核内所有质子；而核力只作用于相邻的核子，随着 Z 的增加，为使原子核保持稳定，必须靠中子数的增多来抵消库仑力的作用。因此，随着 Z 的增加，稳定核素的中子数越来越大大于质子数。

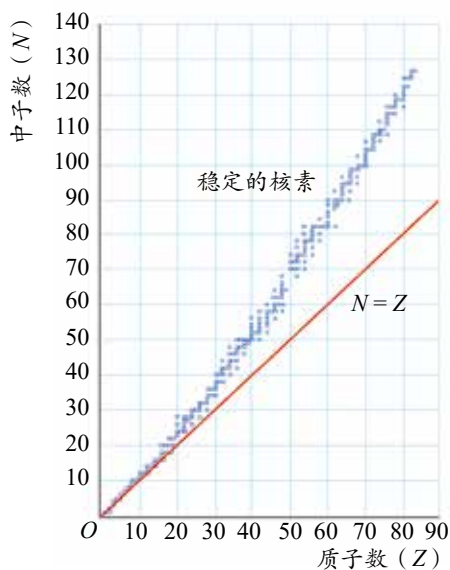


图 5-18 核素图



2. 四种基本相互作用

现代物理学认为，自然界中所有的作用力，从本质来说都可归结为四种基本的相互作用：引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用。

引力相互作用 (gravitational interaction) 是所有物体之间都存在的一种相互作用。日常生活中的物体和微观粒子，它们之间的引力非常微弱，可忽略不计。但对于质量较大的天体，引力则是它们之间的主要作用力。

电磁相互作用 (electromagnetic interaction) 是电荷间、磁体间或电荷与磁体间的相互作用。摩擦力、弹力等接触力都是大量原子、分子之间电磁相互作用的宏观表现。

引力相互作用和电磁相互作用能在宏观世界里显示其作用，二者是长程力。

强相互作用 (strong interaction) 和**弱相互作用** (weak interaction) 是短程力，作用范围在原子核尺度内。核子间的核力是由强相互作用引起的，对强相互作用本质的研究仍然是物理学研究的重要前沿。质量数相同的不同原子核之间的转换就是由弱相互作用引起的。

四种相互作用按由强到弱排列：强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用、引力相互作用。

科学家们有一种设想，认为可用某一理论将自然界中的四种基本作用统一起来，这就是统一场论，但至今尚无定论，科学家正在探索中。

3. 结合能与平均结合能

原子核中，核子与核子之间存在核力，要将核子从原子核中分离，需要外力克服核力做功。当自由核子结合成原子核时，核力将做功，会释放能量。人们把核子结合成原子核所释放的能量称为**原子核的结合能** (binding energy of the nucleus)。

实验发现，任何一个原子核的质量总是小于组成它的所有核子的质量之和，这一差值称为**质量亏损** (mass defect)。如果用 Δm 表示质量亏损，根据爱因斯坦质能方程

$$E = mc^2$$

可知，核子结合成原子核时，释放出的结合能是

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

例题

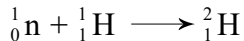
已知中子的质量 $m_n = 1.674\,9 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，质子的质量 $m_p = 1.672\,6 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，氦核的质量 $m_D = 3.343\,6 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。写出中子、质子结合成氦核的核反应方程并求氦核的结合能。

分析

已知中子、质子和氦核的质量，可求出中子和质子结合成氦核的质量亏损，根据 $\Delta E = \Delta mc^2$ 可求氦核的结合能。

解

核反应方程为



中子和质子结合成氦核的质量亏损

$$\begin{aligned}\Delta m &= (m_p + m_n) - m_{\text{He}} \\ &= (1.674\,9 \times 10^{-27} + 1.672\,6 \times 10^{-27} - 3.343\,6 \times 10^{-27}) \text{ kg} \\ &= 3.90 \times 10^{-30} \text{ kg}\end{aligned}$$

中子和质子结合成氦核释放的能量，即氦核的结合能

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

核物理中常用 eV 作为能量单位，根据 $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ ，可得氦核的结合能

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

讨论

当核反应中发生质量亏损时，根据爱因斯坦质能方程，反应前对应的能量大于反应后对应的能量，核反应中释放核能；反之，当质量增加时，就有其他形式的能转化为核能，使核能增加。在中子和质子结合成氦核时，释放的核能会以光子的形式释放出去。

策略提炼

运用 $\Delta E = \Delta mc^2$ 计算核能的变化时，若 Δm 以 kg 为单位，可代入公式计算。若 Δm 以 u 为单位，还可利用 1 u 相当于 931.5 MeV 计算。



迁移

原子核的质量单位，通常会用原子质量单位 u 表示， $1 \text{ u} = 1.660\,5 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。请证明，质量亏损 1 u 将释放 931.5 MeV 的核能。

钚核发生 α 衰变，其核衰变方程为 ${}_{94}^{239}\text{Pu} \longrightarrow {}_{92}^{235}\text{U} + {}_2^4\text{He}$ 。已知钚核的质量为 $239.052\,2 \text{ u}$ ，铀核的质量为 $235.043\,9 \text{ u}$ ，氦核的质量为 $4.002\,6 \text{ u}$ 。请根据上述结论，计算该衰变过程中释放的核能。

原子核的结合能与其核子数有关。原子核的结合能与其质量数之比称为该核的**平均结合能** (specific binding energy)，又称为比结合能。平均结合能是核子结合成原子核时每个核子平均释放的能量，也是把原子核分解成自由核子时每个核子平均吸收的能量，反映了



原子核结合的稳定程度或分裂的难易程度。显然，平均结合能越大，原子核越难分离成单个，核子越稳定。图 5-19 是不同原子核的平均结合能曲线。

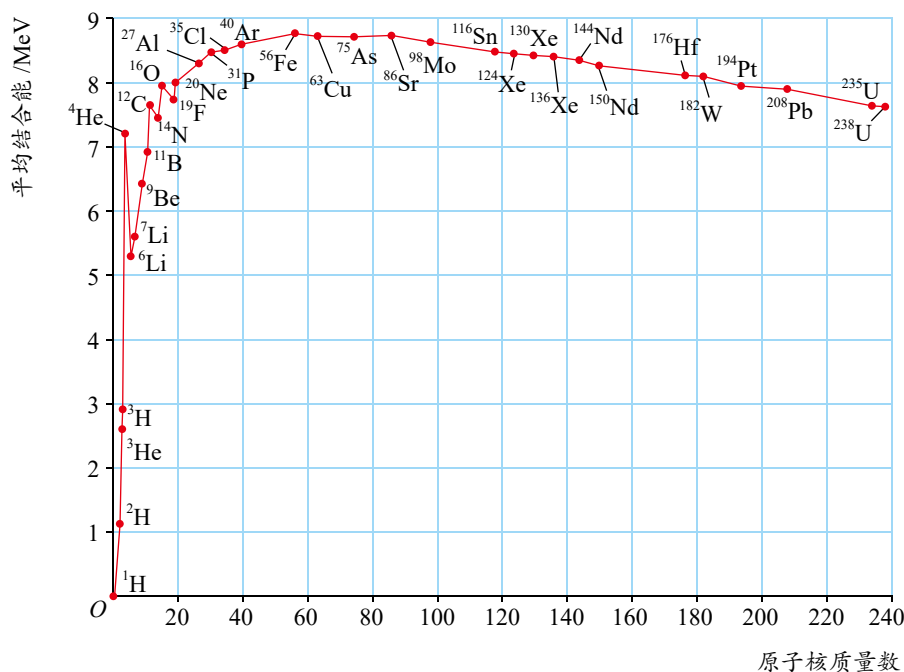


图 5-19 不同原子核的平均结合能曲线

由平均结合能曲线可看出：重核的平均结合能比中等质量核的要小，容易裂变成中等质量的核而释放出能量；轻核的平均结合能比稍重的核的要小，如果它们聚变成较重的核，也要释放出能量。



物理聊吧

由平均结合能曲线观察原子核质量数与平均结合能的关系，比较不同原子核的稳定性，找出核素的平均结合能有什么特点，并与同学讨论交流。



节 练 习

- 关于原子核的结合能，下列说法正确的是
 - 原子核的结合能等于使其完全分解成自由核子所需的最小能量
 - 一重原子核衰变成 α 粒子和另一原子核，衰变产物的结合能之和一定大于原来重核的结合能
 - 平均结合能越大，原子核越不稳定
 - 自由核子组成原子核时，其质量亏损所对应的能量大于该原子核的结合能
- 质子、中子和氦核的质量分别为 m_1 、 m_2 和 m_3 ，真空中光速为 c 。当质子和中子结合成氦核时，释放出的能量是多少？

3. 太阳因核聚变释放出巨大的能量, 同时其质量不断减少。太阳每秒钟辐射出的能量约为 $4 \times 10^{26} \text{ J}$, 根据爱因斯坦质能方程, 太阳每秒钟减少的质量大约为多少?
4. 已知 $^{16}_8\text{O}$ 的平均结合能是 7.98 MeV , ^4_2He 的平均结合能是 7.07 MeV , 如果要把 $^{16}_8\text{O}$ 分成 4 个 ^4_2He , 需要多少能量?
5. 某次核反应中, $^{235}_{92}\text{U}$ 变成 $^{136}_{54}\text{Xe}$ 和 $^{90}_{38}\text{Sr}$, 同时释放出若干中子。 $^{235}_{92}\text{U}$ 的平均结合能约为 7.6 MeV , $^{136}_{54}\text{Xe}$ 的平均结合能约为 8.4 MeV , $^{90}_{38}\text{Sr}$ 的平均结合能约为 8.7 MeV 。
- (1) 把 $^{235}_{92}\text{U}$ 分解成核子时, 要吸收多少能量?
- (2) 使相应的核子分别结合成 $^{136}_{54}\text{Xe}$ 和 $^{90}_{38}\text{Sr}$ 时, 要释放出多少能量?
- (3) 在这个核反应中是吸收能量还是释放能量? 这个能量大约是多少?
6. 静止的镭核 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 发生衰变, 放出 1 个粒子, 变为氡核 $^{222}_{86}\text{Rn}$ 。已知 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 原子核的质量为 226.0254 u , $^{222}_{86}\text{Rn}$ 原子核的质量为 222.0163 u , 放出粒子的质量为 4.0026 u 。
- (1) 写出核反应方程。
- (2) 求镭核衰变释放的能量。
- (3) 若衰变释放的能量均转变为氡核和放出粒子的动能, 求放出粒子的动能。



请提问

第4节

核裂变和核聚变

我们已经知道，重核裂变成中等质量的核，轻核聚变成较重的核，都会释放出能量。那么，如何才能得到这些能量并供人类使用呢？本节我们将学习获得核能的两种方式：核裂变和核聚变。

1. 重核裂变

20 世纪 30 年代，科学家用中子轰击铀核，发现铀核分裂成质量相近的两部分，并释放出能量。科学家从生物学的细胞分裂中得到启示，把这种核反应过程称为**核裂变**（nuclear fission）。核裂变是释放核能的方法之一。

为什么会发生核裂变？科学家认为，中子击中 $^{235}_{92}\text{U}$ 后，将复合成 $^{236}_{92}\text{U}$ ，且处于高激发状态。 $^{236}_{92}\text{U}$ 要发生形变，从一个接近球形的核变为一个拉长的椭球形的核，核子间的距离增大，核力迅速减小，不能抵消质子间的库仑斥力从而不能使核恢复原状， $^{236}_{92}\text{U}$ 就分裂成两部分，同时放出中子，如图 5-20 所示。

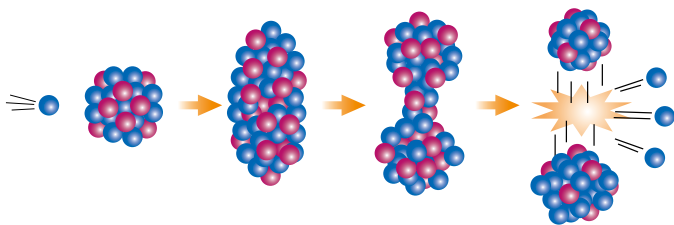
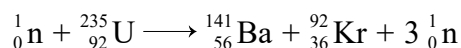


图 5-20 $^{235}_{92}\text{U}$ 裂变示意图

$^{235}_{92}\text{U}$ 裂变的产物是多种多样的，其中一种典型的裂变是生成钡（Ba）和氪（Kr），同时放出 3 个中子，其核反应方程为



一个 $^{235}_{92}\text{U}$ 裂变为 $^{141}_{56}\text{Ba}$ 和 $^{92}_{36}\text{Kr}$ 释放的能量计算如下

裂变前		裂变后	
$^{235}_{92}\text{U}$	235.043 9 u	$^{141}_{56}\text{Ba}$	140.913 9 u
^1_0n	1.008 7 u	$^{92}_{36}\text{Kr}$	91.897 3 u
		3^1_0n	3.026 1 u
236.052 6 u			
		235.837 3 u	

反应过程中质量减小了 $\Delta m = 0.2153 \text{ u}$ ，释放的能量

$$\Delta E = 0.2153 \times 931.5 \text{ MeV} = 200.55 \text{ MeV}$$

在不同的裂变反应中， ${}_{92}^{235}\text{U}$ 核释放的能量也不同。如果按照一个 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 核裂变时释放 200 MeV 的能量来估算，1 kg 的 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 全部裂变，释放出的核能相当于两千余吨标准煤完全燃烧释放的能量。



科学书屋

核裂变的发现

1934 年，在中子和人工放射性发现的启发下，费米 (E. Fermi, 1901—1954) 用中子轰击 ${}_{92}^{238}\text{U}$ ，得到了一种新的放射性元素，费米误认为这种新元素是原子序数为 93 的超铀元素。后来证实费米的结论是错误的。

1938 年，约里奥—居里夫妇用慢中子照射铀盐，分离出了类似镧 ($Z = 57$) 的放射性元素。他们对中子与铀 ($Z = 92$) 发生反应生成核电荷数与铀相距很远的镧感到疑惑。

德国科学家哈恩 (O. Hahn, 1879—1968, 图 5-21) 等人看到了约里奥—居里夫妇的实验结果后，重复做了有关实验，不仅肯定了镧的存在，而且发现了放射性钡核 ($Z = 56$)。哈恩将这个结果告诉了迈特纳 (L. Meitner, 1878—1968, 图 5-22)，这位奥地利女物理学家认为：铀核俘获一个中子后分裂成两个大致相等的部分，这就是核裂变。哈恩因发现核裂变现象而获得 1944 年诺贝尔化学奖。



图 5-21 哈恩



图 5-22 迈特纳

核裂变的发现引起了科学界的极大轰动，许多科学家投入到重核裂变的研究中。不久，科学家通过实验证明了链式反应的可能性，为人类应用原子能打开了大门。

2. 链式反应

如果中子能持续不断地轰击 ${}_{92}^{235}\text{U}$ ，就能持续不断地释放核能。在 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 核裂变释放出巨大能量的同时，平均每次可放出 2 ~ 3 个中子，这些中子称为第 1 代中子，如果其中至少



有一个继续轰击 ${}_{92}^{235}\text{U}$ ，使之发生裂变，就能产生第2代中子。这样继续下去，中子会不断增加，裂变反应会不断加强，这就形成了裂变的**链式反应**（chain reaction，图5-23）。

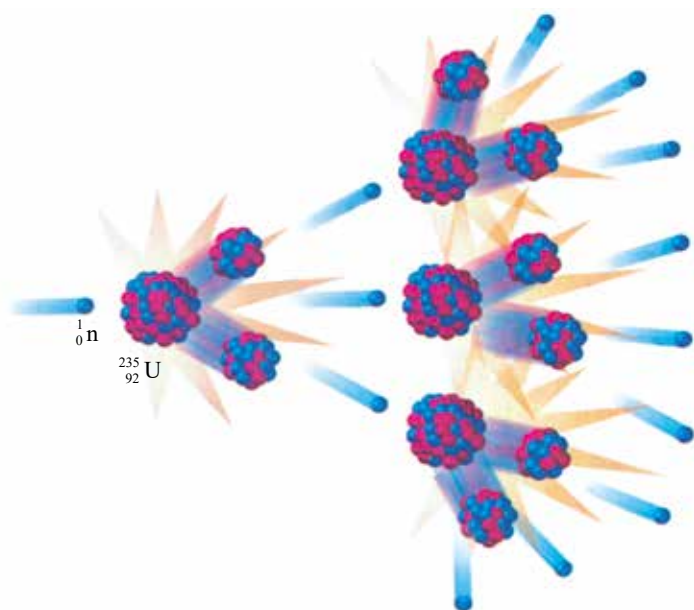


图5-23 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 的链式反应示意图



物理聊吧

假定第1代中子数为2，此后，每一个核裂变都产生2个中子，那么第10代中子数是多少？第100代中子数是多少？想一想链式反应的威力，并与同学交流。

发生链式反应的另一个重要因素是铀块的体积。原子核的体积非常小，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了。能发生链式反应的铀块的最小体积称为**临界体积**（critical volume）。



科学书屋

核反应堆

为了使核能比较平稳地释放出来，人们制成了能维持和控制链式反应速度的装置，这种装置称为核反应堆。1942年12月，费米领导的研究小组在芝加哥大学建成了世界上第一座人工裂变反应堆，命名为芝加哥一号堆，首次实现了可控核裂变链式反应。

核反应堆包含堆芯、反射层、控制系统和防护层等部分，其中堆芯由燃料元件、减速剂、控制棒、冷却剂等组成（图5-24）。

燃料元件是指反应堆内有特定形状和结构的核燃料，为了使裂变产生链式反应，核燃料一般使用浓缩铀。减速剂能使核裂变产生的快中子减速，使之成为慢中子（也称热中子），重水和石墨都是很好的减速剂。控制棒用能吸收慢中子的镉或硼钢制成，以控制链式反应的速度。为避免堆芯和反射层受到高温损坏，要使冷却剂循环流过堆芯，吸收反应所产生的大量热能，并传送到堆外加以利用。常用的冷却剂有普通水、重水、氦和二氧化碳等。

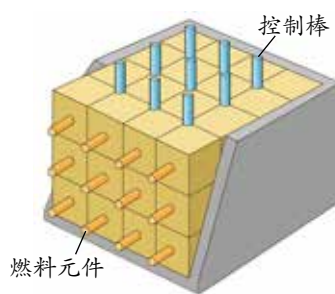
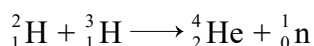


图5-24 堆芯构成示意图

3. 轻核聚变

根据平均结合能曲线,轻核的平均结合能小于中等质量核的平均结合能。采用轻核聚变成较重核引起结合能变化的方式可获得核能,这样的核反应称为**核聚变**(nuclear fusion)。太阳和其他恒星之所以能发光并辐射出巨大的能量,就是它们内部氢核聚变的结果(图5-25)。氢核聚变的核反应方程为

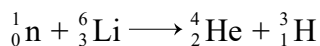


聚变前		聚变后	
${}_1^2\text{H}$	2.014 1 u	${}_2^4\text{He}$	4.002 6 u
${}_1^3\text{H}$	3.016 0 u	${}_0^1\text{n}$	1.008 7 u
5.030 1 u		5.011 3 u	

核聚变过程中质量亏损 $\Delta m = 0.018\ 8\ \text{u}$, 释放的能量 $\Delta E = \Delta mc^2 = 0.018\ 8 \times 931.5\ \text{MeV} = 17.51\ \text{MeV}$ 。

这里共有 5 个核子参与聚变, 平均每个核子释放的结合能约为 3.5 MeV, 要比裂变中平均每个核子释放的能量(约 1 MeV)大得多。太阳每天释放的能量约为 $2.1 \times 10^{44}\ \text{MeV}$ 。如此巨大能量的一小部分辐射到地球, 就可为地球上生命的生存提供能量。

聚变反应不仅能释放巨大的能量, 而且其所用的燃料氘和氚容易获得。氘可从海洋中提取, 以一年消耗 $5.6 \times 10^5\ \text{kg}$ 氘计算, 海洋中的氘估计可使用 10^{11} 年。氚是放射性核素(半衰期为 12.5 年), 天然的氚不存在, 但可通过下列反应得到



轻核聚变是最理想的能源。如果能实现可控轻核聚变反应, 就可实现人造“小太阳”的梦想。

4. 可控热核聚变

要使轻核发生聚变, 必须使它们的间距达到核力作用的范围。要使它们达到这种程度, 必须克服原子核间巨大的库仑斥力, 这就得让核子获得足够大的动能。以氘核发生聚变为例, 必须在大约 $10^8\ \text{K}$ 高温下, 使氘核获得至少 70 keV 的动能才能达到核力作用的范围而发生核聚变。



图 5-25 太阳内部时刻发生着氢核聚变



物理聊吧

太阳中发生的氢核聚变成氦核的反应, 是太阳辐射能量的来源。假定地球表面 $1\ \text{m}^2$ 接受能量的功率为 1.4 kW, 地球到太阳的距离为 $1.5 \times 10^{11}\ \text{m}$, 太阳的质量为 $2 \times 10^{30}\ \text{kg}$, 请估算太阳的寿命。将你的估算与查到的资料对照, 看一看是否有差异, 分析产生差异的原因, 并与同学交流。



在这样的高温下，原子已完全电离，形成了物质第四态——等离子态。高温等离子体的密度及高温必须维持一定时间才能实现聚变，但这是非常困难的。目前，约束高温等离子体的方法有三种：一是引力约束，二是磁约束，三是惯性约束。

引力约束 太阳是一个巨大的火球，日夜不停地进行着核聚变。核爆炸产生的膨胀与万有引力的收缩达到一个动态平衡，太阳的大小就基本稳定。这种靠自身巨大的质量产生的引力，把高温等离子体约束在一起，维持热核反应的方法，就是引力约束。

磁约束 利用磁场将高温、高密度等离子体约束在一定的容积内，且维持足够长的时间，使其达到核聚变的条件。磁约束装置的种类很多，其中最有发展前途的是环流器，又称托卡马克装置（图 5-26）。这种约束装置可产生螺旋形磁场，将等离子体约束在环状真空室内。

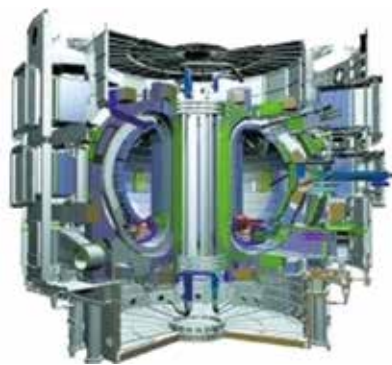


图 5-26 托卡马克装置



科学书屋

磁约束装置

20 世纪 70 年代后期建造的四个大型托卡马克装置已在 20 世纪 80 年代逐渐投入运行。这四个装置是美国的 TFTR、日本的 JT-60、欧洲的 JET、苏联的 T-15（1986 年，苏联的 T-20 已投入使用）。20 世纪 80 年代中期建成的“中国环流器一号”，代表了当时中国核聚变研究发展的最高水平，是我国受控聚变研究史上一座光辉的里程碑。2016 年 11 月，我国重大科学工程“人造太阳”实验装置 EAST（图 5-27）获得超过 60 s 的稳态高约束模等离子体放电，成为世界首个实现稳态高约束模运行持续时间达到分钟量级的托卡马克核聚变实验装置。



图 5-27 EAST 托卡马克实验装置

惯性约束 利用强激光从多个方向同时轰击氘和氚的混合燃料丸（微小球体，直径几毫米），使燃料丸的表面层形成等离子体，在强激光的惯性压力下，内层燃料丸密度迅速增大，直径减小，温度升高，引起热核聚变。

惯性约束核聚变的思想是 1964 年我国科学家王淦昌与苏联科学院院士巴索夫分别独立提出的。目前可控热核聚变还处于基础研究阶段，大功率激光器的研制是实现惯性约束的关键。我国“神光”系列激光器相继研制成功，为核聚变的进一步研究创造了条件。

能了解原子核的组成和核力的内涵，知道四种基本相互作用，能根据质量数守恒和核电荷数守恒写出核反应方程，知道放射性、原子核衰变、半衰期和同位素等，知道原子核结合能、原子核裂变与聚变；能运用所学知识解释核物理的一些技术应用。具有和原子核与核能相关的物质观念、相互作用观念和能量观念。

——物理观念



节 练 习

- 核电站利用原子核链式反应释放的巨大能量发电， $^{235}_{92}\text{U}$ 是核电站常用的核燃料。当 $^{235}_{92}\text{U}$ 受 1 个中子轰击裂变成 $^{144}_{56}\text{Ba}$ 和 $^{89}_{36}\text{Kr}$ 两部分时，将放出几个中子？为确保链式反应的发生，裂变物质的体积要满足什么条件？
- 下列核反应中，表示核裂变的是
 A. $^{238}_{92}\text{U} \longrightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + ^4_2\text{He}$
 B. $^1_0\text{n} + ^{235}_{92}\text{U} \longrightarrow ^{141}_{56}\text{Ba} + ^{92}_{36}\text{Kr} + 3^1_0\text{n}$
 C. $^{30}_{15}\text{P} \longrightarrow ^{30}_{14}\text{Si} + ^0_1\text{e}$
 D. $^4_2\text{He} + ^9_4\text{Be} \longrightarrow ^{12}_6\text{C} + ^1_0\text{n}$
- 我国重大科学工程“人造太阳”主要是将氘核聚变反应释放的能量用来发电。氘核聚变反应方程为 $^2_1\text{H} + ^2_1\text{H} \longrightarrow ^3_2\text{He} + ^1_0\text{n}$ 。已知 ^2_1H 的质量为 2.013 6 u， ^3_2He 的质量为 3.015 0 u， ^1_0n 的质量为 1.008 7 u，求氘核聚变反应中释放的核能。
- 1 个质子和 2 个中子聚变为 1 个氦核。已知质子质量 $m_p = 1.007\ 3\ \text{u}$ ，中子质量 $m_n = 1.008\ 7\ \text{u}$ ，氦核质量 $m = 3.018\ 0\ \text{u}$ 。
 (1) 写出聚变方程。
 (2) 求释放出的核能。
 (3) 求平均每个核子释放的能量。
- 核聚变的燃料可从海水中提取。海水中的氘主要以重水的形式存在，含量为 0.034 g/L。从 1 L 海水中提取的氘发生聚变反应时，能释放多少能量？相当于燃烧多少升汽油？（汽油的热值为 $4.6 \times 10^7\ \text{J/kg}$ ）
- 4 个氢核（质子）聚变成 1 个氦核，同时放出 2 个正电子 ^0_1e 。写出这个过程的核反应方程，并计算释放了多少能量。若 1 g 氢完全聚变，能释放多少能量？（氢核的质量为 1.007 3 u，氦核的质量为 4.002 6 u，1u 相当于 931.5 MeV）

请提问



第5节

核能的利用与环境保护

19 世纪末 20 世纪初，人类通过实验认识了核能并逐步学会使用和控制核能。人类如何利用核能？如何避免核能带来的危害？本节我们将学习有关的内容。

1. 核电站

核反应堆能实现核能的稳定输出，使其转化为其他形式的能量，从而使核能具有广泛用途。核电站就是将核反应堆释放的核能转化为电能的发电厂。

现以压水式反应堆核电站为例，讨论核电站的工作原理。压水式反应堆核电站包括反应堆本体、一回路系统、二回路系统、汽轮发电机组以及为支持系统正常运行并保证反应堆安全而设置的辅助系统。一回路系统是蒸汽供应系统，包括蒸汽发生器、稳压器、主冷却剂泵等，反应堆释放的内能由冷却剂带到蒸汽发生器中，产生蒸汽；二回路系统是蒸汽驱动汽轮发电机组进行发电的系统，与常规火电厂汽轮发电系统基本相同（图 5-28）。

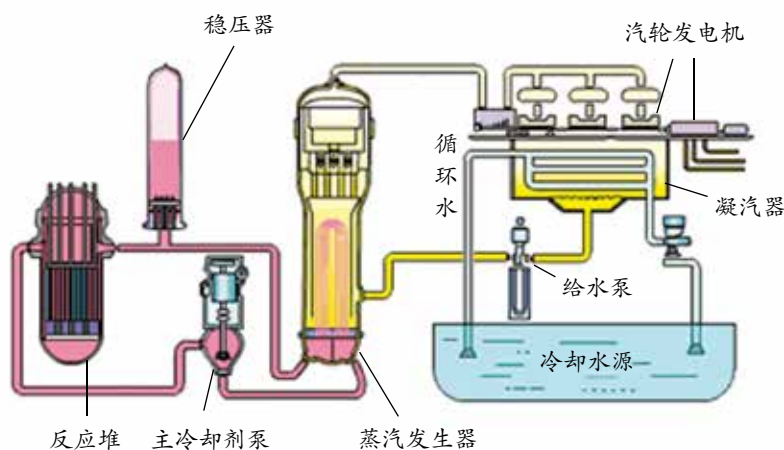


图 5-28 压水式反应堆工作原理示意图

目前核电站的反应堆以 $^{235}_{92}\text{U}$ 为燃料，发电成本低于煤电。但是 $^{235}_{92}\text{U}$ 只占天然铀的 0.72%，99.28% 的 $^{238}_{92}\text{U}$ 没有被充分利用，造成了资源的浪费和核废料处理上的困难。采用增殖反应堆可使资源得到充分利用。



增殖反应堆

反应堆分为热中子反应堆和快中子反应堆，快中子反应堆又称为增殖反应堆。

增殖反应堆以 $^{238}_{92}\text{U}$ 为原料，运行时消耗裂变燃料（ $^{235}_{92}\text{U}$ 或 $^{239}_{94}\text{Pu}$ 等），同时 $^{238}_{92}\text{U}$ 吸收中子后变成 $^{239}_{94}\text{Pu}$ 等，即在消耗核燃料过程中又能产生新的核燃料（把不可裂变的 $^{238}_{92}\text{U}$ 转化为可裂变的 $^{239}_{94}\text{Pu}$ 等），实现可裂变燃料的增殖。

增殖反应堆能将铀资源的利用率提高到 60% ~ 70%，是压水式反应堆燃料利用率的一百多倍。这样，贫铀矿也有了开采的价值，铀资源的可采量将提高上千倍。

2. 原子弹和氢弹

(1) 原子弹

原子弹是一种没有减速剂、不加控制的爆炸性链式反应装置。原子弹的链式反应是怎样形成的呢？

一种方法是将浓度为 90% 以上的 $^{235}_{92}\text{U}$ 分成两块半球形，每块都达不到临界体积。利用普通炸药引爆，使两块 $^{235}_{92}\text{U}$ 挤合到一起，使其达到临界体积，同时中子源释放中子引起链式反应，从而引发剧烈爆炸。这样设计的装置，称为“枪式”装置（图 5-29）。

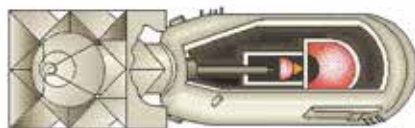


图 5-29 枪式原子弹结构示意图

另一种方法称为“内爆法”，即将炸药放在没有达到临界体积的 $^{235}_{92}\text{U}$ （或 $^{239}_{94}\text{Pu}$ ）块周围。当炸药爆炸时，很快向中心压缩，使 $^{235}_{92}\text{U}$ （或 $^{239}_{94}\text{Pu}$ ）块密度大增，发生链式反应。这种设计方法难度大，但核材料利用率较高。

(2) 氢弹

氢弹是一种不需人工控制而实现核聚变的反应装置。它利用 ^2_1H 和 ^3_1H 迅速地聚变成 ^4_2He ，产生比原子弹更为强烈的爆炸。图 5-30 是氢弹结构示意图。在弹体内装有热核材料 ^2_1H 和 ^3_1H 、铀块或钚块以及普通炸药。当普通炸药爆炸时，铀块或钚块迅速合为一体，使弹体体积超过临界体积而发生爆炸。爆炸的高温高压使 ^2_1H 、 ^3_1H 等轻核发生聚变反应，产生很高的能量直至再次发生更大规模的爆炸。

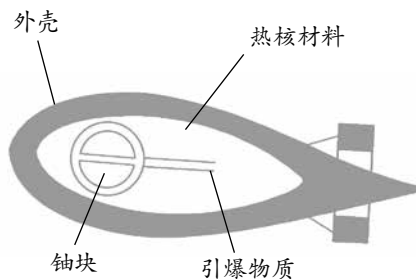


图 5-30 氢弹结构示意图



两弹元勋

中华人民共和国成立后，为了打破大国的核垄断，使中华民族真正自立于世界民族之林，中央决定集中技术攻关，研制“两弹一星”（导弹、核弹、人造卫星）。

1964年10月16日，我国第一颗原子弹爆炸成功，1967年6月17日，我国的氢弹试爆成功，使我国成为第四个掌握氢弹技术的国家。从原子弹爆炸到氢弹爆炸，我国只用了两年零八个月。原子弹、氢弹的成功爆炸，是一大批科学家艰苦奋斗的结果。“两弹元勋”于敏、王淦昌、邓稼先、周光召、钱三强、程开甲、彭桓武等科学家就是其中的代表人物，他们为我国核武器事业的发展作出了巨大贡献。

自成功掌握核武器技术以来，我国就向世界郑重宣布：决不首先使用核武器，绝对不向无核武器国家使用核武器。我国是世界上所有拥有核武器的国家中第一个发表如此郑重声明的国家。

3.核能的优势与危害

核能作为一种新能源，有很多优势。

核能发电可缓解能源危机。一座百万千瓦级压水式反应堆核电站，每年仅消耗1吨 ${}_{92}^{235}\text{U}$ ，同等规模的燃煤发电厂每年要消耗原煤 2.5×10^6 吨。在煤炭等资源越来越少的情况下，越来越多的国家利用核能发电。

在安全运行的情况下，核能发电比燃煤发电对环境带来的污染小。百万千瓦级的燃煤电站每年要排放出几万吨二氧化硫、氮氧化物等有害气体及致癌物质，而且烟尘还含有少量钍、镭等放射性物质。核电站的安全壳是顶部为半球形的钢筋混凝土建筑物，将反应堆和一回路系统密封在内，能防止其污染环境；二回路系统的废水、废气是低放射性的且经过处理后才能排放。

核能的利用也存在一些危害。

核燃料使用后，不仅存留一定量的 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 及由 ${}_{92}^{238}\text{U}$ 生成的 ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ ，还包括一些原子序数比 ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ 高的核素及裂变碎片，这些都是具有高放射性的核废料（图5-31）。

为了防止放射性物质泄漏，核能利用装置都采用了严格的防护措施。一旦在运行中发生事故，产生核泄漏，就会造成严重后果。例如，苏联切尔诺贝利核电站发生爆炸，导致反应堆崩塌，大



图5-31 运送核废料的火车



火把大量的放射性同位素抛散到空中，污染了大片地区，造成了人员伤亡，来自事故地点的放射性尘埃还散布到欧洲其他地区。

核武器的威力巨大，不仅能摧毁地球上的生命，还会使生态环境受到严重破坏。所以，核武器的使用和核武器技术的扩散始终威胁着人类自身的生存。

能体会人类对物质结构的探索是不断深入的，科学的探索没有止境；能自觉抵制违反实事求是精神的行为；能主动关注核技术应用对人类生活和社会发展带来的影响，能遵守普遍接受的与科技研究有关的道德与规范，有保护环境、理性评价科技应用的良好习惯与使命感。

——科学态度与责任



科学书屋

《不扩散核武器条约》

《不扩散核武器条约》于1968年7月1日分别在伦敦、莫斯科和华盛顿签订，它的内容主要包括：有核武器的缔约国不向任何国家转让核武器或其他核爆炸装置，无核武器的缔约国不获取或制造核武器及其他核爆炸装置，各缔约国承诺促进和平核合作等。我国于1992年3月加入《不扩散核武器条约》。截至2018年7月，《不扩散核武器条约》的缔约国共有191个。



节练习

1. 在核电站发电过程中，从核能到电能，其能量转化的顺序是怎样的？
2. 秦山核电站第一期工程于1984年开工，1991年建成并投入运行。工程装机容量为300 MW，如果1 g的 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 完全裂变时产生的能量为 $8.2 \times 10^{10} \text{ J}$ ，并且假定产生的能量都变成了电能，那么每年要消耗多少 ${}_{92}^{235}\text{U}$ ？（一年按365天计算）
3. 查阅资料，了解核废料的处理方法以及核废料处理的最新研究进展。
4. 查阅资料，了解历史上曾经发生的核电站事故及其造成的影响。
5. 查阅资料，了解我国“华龙一号”的技术优势及建造情况。



请提问



章末练习

科学认知

- 某原子核 ${}_Z^AX$ 吸收 1 个中子后放出 1 个电子，分裂为 2 个 α 粒子。请问 A 和 Z 分别为多大？
- 关于质子与中子，下列说法正确的是
 - 原子核由质子和中子构成
 - 质子和中子统称为核子
 - 卢瑟福发现了质子，并预言了中子的存在
 - 卢瑟福发现了中子，并预言了质子的存在
- 下列说法正确的是
 - α 粒子散射实验表明了原子核具有复杂结构
 - 石墨在反应堆中起到降低核反应速度的作用
 - 燃料铀在反应堆中发生裂变反应
 - 将控制棒插入得更深些，反应堆的核反应速度将降低
- 下列有关结合能和平均结合能的说法正确的是
 - 核子结合成原子核吸收的能量或原子核分解成核子释放的能量称为结合能
 - 平均结合能越大的原子核越稳定，因此它的结合能也一定越大
 - 重核与中等质量的原子核相比较，重核的结合能和平均结合能都大
 - 中等质量的原子核的结合能和平均结合能均比轻核大
- 某核反应方程为 ${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + X$ 。已知 ${}_1^2\text{H}$ 的质量为 2.014 1 u， ${}_1^3\text{H}$ 的质量为 3.016 0 u， ${}_2^4\text{He}$ 的质量为 4.002 6 u， X 的质量为 1.008 7 u。下列说法正确的是
 - X 是质子，该反应释放能量
 - X 是中子，该反应释放能量
 - X 是质子，该反应吸收能量
 - X 是中子，该反应吸收能量
- 一静止的铀核放出 1 个 α 粒子衰变成钍核，衰变方程为 ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$ 。下列说法正确的是
 - 衰变后钍核的动能等于 α 粒子的动能
 - 衰变后钍核的动量大小等于 α 粒子的动量大小
 - 铀核的半衰期等于其放出 1 个 α 粒子所经历的时间
 - 衰变后 α 粒子与钍核的质量之和等于衰变前铀核的质量
- 在下列描述核反应的方程中，属于 α 衰变的是 _____，属于裂变的是 _____，属于聚变的是 _____。
 - ${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$
 - ${}_2^4\text{He} + {}_7^{14}\text{N} \rightarrow {}_8^{17}\text{O} + {}_1^1\text{H}$
 - ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$
 - ${}_0^1\text{n} + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{54}^{140}\text{Xe} + {}_{38}^{94}\text{Sr} + {}_0^1\text{n}$
- A、B 两种放射性元素，它们的半衰期分别为 $t_A = 10$ 天， $t_B = 30$ 天，经 60 天后，测得两种放射性元素的质量相等，那么它们原来的质量之比是多少？
- 医学影像诊断设备 PET/CT 堪称“现代医学高科技之冠”。它在医疗诊断中，常用能放射正电子的同位素 ${}_{6}^{11}\text{C}$ 作为示踪原子。 ${}_{6}^{11}\text{C}$ 是由小型回旋加速器输出的高速质子轰击 ${}_{7}^{14}\text{N}$ 获得的，同时还产生另一粒子，试写出该核反应的方程。若 ${}_{6}^{11}\text{C}$ 的半衰期为 20 min，经 2.0 h 剩余 ${}_{6}^{11}\text{C}$ 的质量占原来的百分之几？（结果保留 2 位有效数字）
- 在一核反应堆中，用石墨作为减速剂使快中子减速。已知 ${}_{12}^{12}\text{C}$ 的质量是中子的 12 倍，中子与碳原子核的每次碰撞都视为弹性正碰，并且假定碰撞前 ${}_{12}^{12}\text{C}$ 是静止的。
 - 设碰撞前中子的动能是 E_0 ，经过一次碰撞后，中子损失的能量是多少？
 - 至少经过多少次碰撞，中子的动能才能小于 $10^{-6} E_0$ ？

科技交流

11. 调查市场中哪些食物是经过辐射保鲜的。以“食物辐射保鲜”为题，撰写一篇调研报告，与同学交流或发表。

温故知新

12. 氢原子第 n 能级的能量为 $E_n = \frac{E_1}{n^2}$ ，其中 E_1 是基态能量， $n = 1, 2, 3, \dots$ 若一氢原子发射能量为 $-\frac{3}{16}E_1$ 的光子后处于比基态高出 $-\frac{3}{4}E_1$ 的激发态，则氢原子发射光子前后分别处于第几能级？



我的学习总结



第6章

波粒二象性

导 入 奇异的微观世界

第1节 光电效应及其解释

第2节 实物粒子的波粒二象性

►►本章学业要求

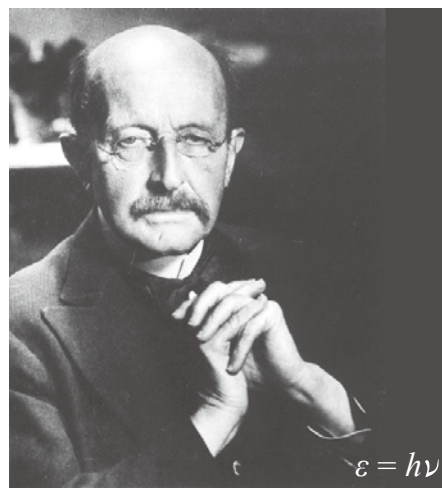
- 能了解光电效应现象和爱因斯坦光电效应方程的内涵，了解光和实物粒子的波粒二象性，了解微观世界的量子化特征；能解释光电效应在生产生活中的应用。具有与波粒二象性相关的物质观念、相互作用观念和能量观念。——物理观念
- 知道描述微观世界需要不断建构物理模型；能根据实验结论分析光的波粒二象性；能通过证据说明实物粒子具有波动性；能对已有结论提出质疑。——科学思维
- 能根据光电效应实验现象提出问题；能观察光电效应实验，收集数据；能分析数据，发现规律，形成合理的结论；能完成与波粒二象性有关的科技论文，有提交给有关科技杂志的意识。——科学探究
- 能体会量子论的建立对人们认识物质世界的影响，了解人类认识自然的局限性与不断探索自然的必要性；具有认识自然、理解自然的热情与探索精神；能站在更高层面理解科学·技术·社会·环境的相互联系，具有尊重自然、爱护自然，与自然协调发展的责任心和使命感。

——科学态度与责任

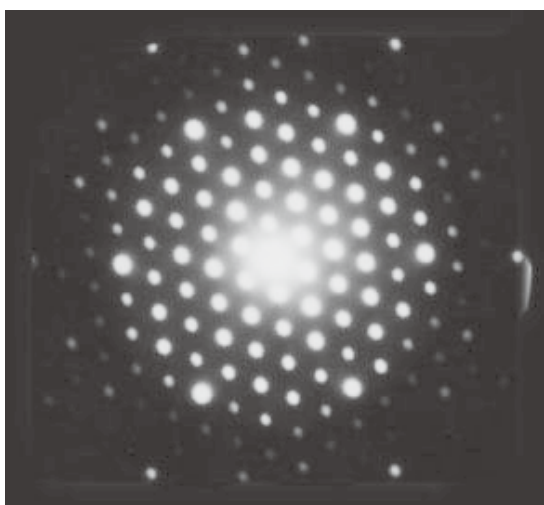
导 人

奇异的微观世界

19 世纪末至 20 世纪初，在人们为物理学理论大厦几乎完美的结构感到自豪的时候，普朗克，一位年轻的物理学家，为了解释当时困惑人们的黑体辐射问题，将不连续性引入了物理学，提出了“能量子”的概念。这是一个连普朗克自己都不愿完全接受的概念。



普朗克



电子衍射图像

正是这样一个“离经叛道”的概念，打开了禁锢人们思想的枷锁。人们发现，正如光具有波粒二象性一样，电子、质子、中子……这些人们心目中的粒子，在法国物理学家德布罗意（L. de Broglie, 1892—1987）的眼中却具有了波动性。

本章我们将再次走进微观世界，进一步了解光及其他粒子的波动性与粒子性特征。

第1节

光电效应及其解释

当你用红外遥控器切换电视频道时，当你用 CD、DVD 欣赏音乐、电影时，当你用手机“扫一扫”物理教材封底上的黑色条码时，你可知道，这些应用都与光电效应有关。什么是光电效应？如何解释光电效应？光电效应有怎样的应用？本节我们将一起探讨相关问题。

1. 光电效应

下面，我们通过实验了解光电效应。



演示光电效应

如图 6-1 所示，把一块擦亮的锌板安装在静电计上。用紫外光照射锌板，观察静电计指针的偏角有什么变化；停止紫外光照，静电计指针的偏角又会怎样变化？这说明了什么？把用毛皮摩擦过的橡胶棒接触锌板，静电计指针的偏角将会怎样变化？请解释以上现象。

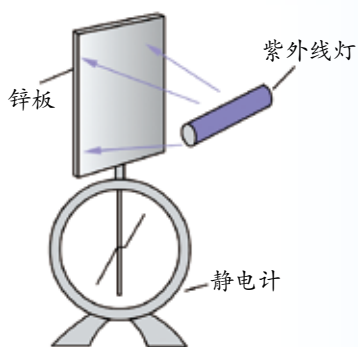


图 6-1 光电效应演示实验示意图

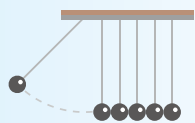


安全警示

实验中
注意安全。
避免紫外线
灯长时间照
射人体！

由上面的实验可看出，原来不带电的锌板被紫外光照射后带了正电，这表明电子在紫外光照射下逸出了锌板表面。物理学中，在光的照射下电子从物体表面逸出现象，称为**光电效应**（photoelectric effect），这种逸出的电子称为光电子。

光电子逸出与哪些因素有关？有着怎样的规律？下面我们通过实验进行探究。



实验与探究

研究光电效应

此实验中需用到光电管。图 6-2 为一种典型的光电管结构示意图，抽成真空的玻璃管内密封有阴极和阳极，在阴极表面涂有某种金属材料，当受到光照射时产生光电子。

在如图 6-3 所示的电路图中，光束可由玻璃窗口进入，投射到阴极 K 上。阴极 K 与阳极 A 之间的电压可通过滑动变阻器进行调节，电源的正负极也可对调。当发生光电效应时，阴极 K 发射的光电子被阳极 A 吸收后，形成光电流。因此，我们可通过该电路来探究光电效应的规律。

(1) 用不同频率的光照射阴极，并调节光的强度，观察到什么现象？

(2) 保持光照条件不变，调节滑动变阻器，逐渐提高电压，观察光电流是否随电压变化而发生变化。

(3) 把电源的正负极对调，重复上述实验，观察实验现象。

记录上述实验数据、观察实验结果并进行分析，看一看有哪些规律。

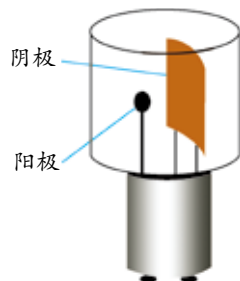


图 6-2 一种典型的光电管结构示意图

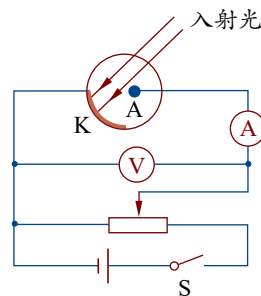


图 6-3 研究光电效应的电路图

大量实验研究表明：

(1) 当入射光的频率低于某一频率时，光电流消失，不会产生光电效应，这一频率称为极限频率。极限频率与金属的种类有关。只有当入射光的频率大于或等于极限频率，才会产生光电效应；若入射光的频率小于极限频率，即使增加光的强度或照射时间，也不能产生光电效应。

(2) 从光照射到金属表面至产生光电效应间隔的时间很短，通常在 10^{-9} s 内。

(3) 产生光电效应时，在光照强度不变的情况下，光电流随电压的增大而增大，当电流增大到一定值后，即使电压再增大，电流也不再增加，达到一个饱和值，即为饱和电流。在光频率不变的情况下，入射光越强，单位时间内逸出的电子数也越多，饱和电流越大。

(4) 阴极逸出的光电子具有初动能，因此在外加电压调到零时仍有光电流。如果施加反向电压，在电压较低时也还有光电流，只有当反向电压大于某一值时，光电流才为零，这一电压值称为遏止电压。遏止电压 U_c 与光电子最大初动能满足的关系为

$$eU_c = \frac{1}{2}mv_m^2$$



光电子最大初动能与入射光的频率有关，与入射光的强度无关。入射光的频率越高，光电子的最大初动能越大。光电流与电压的关系曲线如图 6-4 所示。

表 6-1 列出的是几种金属的极限频率及对应的波长。

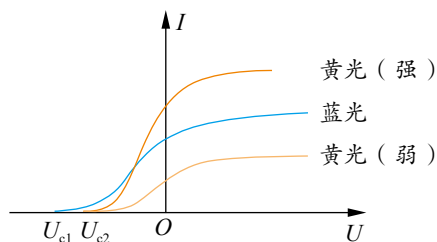


图 6-4 光电流与电压的关系曲线

表6-1

几种金属的极限频率及对应的波长

金属	铯	钾	锌	银	铂
$\nu_0 / \times 10^{14} \text{ Hz}$	4.55	5.44	8.07	11.5	15.3
λ_0 / nm	660	558	372	260	196

2. 光电效应的解释

按照经典电磁理论，光的能量由光的强度决定，无论光的频率如何，只要光的强度足够大，电子就能获得足够的能量，逸出金属表面。另外，电子能量的增加应有一个积累过程，有人曾用经典电磁理论估计过，电子需要几分钟时间才能逸出金属表面。然而事实并非如此，用经典电磁理论无法解释光电效应。

为了解释光电效应，爱因斯坦发展了普朗克的能量不连续思想，提出了光量子的概念。他认为，看似连续的光实际上是由数量有限的、分立的光子组成的，每一个光子的能量为 $h\nu$ (h 是普朗克常量，其值为 $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ， ν 是光的频率)。光照射到金属板时，光子将能量传递给电子，一个光子传递给一个电子的能量为 $h\nu$ ，并满足关系式

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

上式称为**爱因斯坦光电效应方程**。式中， $h\nu$ 为一个光子的能量； W 为一个电子从金属表面逸出而必须做的功，称为逸出功； $\frac{1}{2} m v^2$ 为电子离开金属表面的最大初动能。

根据爱因斯坦光电效应方程，电子最大初动能与光的频率 ν 的关系曲线如图 6-5 所示。

用爱因斯坦光子理论可很好地解释光电效应。光照射到金属表面时，只有一部分电子吸收光子的能量。从光电效应方程可看出，电子吸收了光子的能量后，如果光子能量 $h\nu$ 大于逸出功 W ，电子就可逸出金属表面；如果光子能量 $h\nu$ 小于逸出功 W ，电子则不能逸出金属表面，即使增加光的强度或照射时间，也不能使电子逸出金属表面。这是因为增大光的强度，只是增加了吸收光子能量的电子数，单个电子吸收的光子能量仍为 $h\nu$ ，所以电子仍不能逸出金属表面；若增加

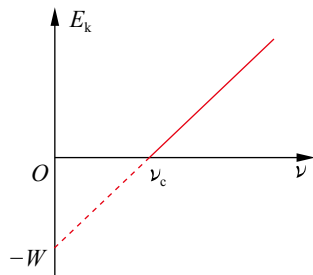


图 6-5 电子最大初动能与光的频率 ν 的关系曲线

光照射的时间, 因为一个电子吸收一个光子后, 在极短的时间内就可把能量传递给其他粒子, 所以电子不可能通过能量积累逸出金属表面。

只要光的频率大于或等于极限频率, 电子吸收一个光子的能量就可逸出金属表面, 所以光照射到金属表面就可立即产生光电效应。光的强度增加, 单位时间内到达金属表面的光子数增多, 单位时间内吸收光子的电子数增多, 逸出金属表面的电子数也增多。

尽管每种金属的逸出功是确定的, 但电子吸收光子的能量后, 向金属表面运动经过的路径不同, 中途损失的能量也不同, 所以电子逸出金属表面时的动能不同, 直接从金属表面逸出的电子动能最大。

爱因斯坦的光子说能解释光电效应现象, 但并没有立即得到人们的承认。一方面, 这是由于当时光的波动说占主导地位; 另一方面, 也是由于光电效应方程未得到全面验证。1916年, 密立根用实验证明了电子的最大初动能与光的频率成严格的线性函数关系, 证实了爱因斯坦的光电效应方程。



拓展一步

用光电效应测量普朗克常量 h

根据遏止电压与光电子最大初动能的关系 $eU_c = \frac{1}{2}mv^2$ 和光电效应方程 $h\nu = W + \frac{1}{2}mv^2$, 可知 $U_c = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e}$ 。所以, 通过用不同频率的入射光照射某种金属, 测量每种频率下的遏止电压, 可得到 $U_c - \nu$ 曲线, 该曲线是一条斜率 $k = \frac{h}{e}$ 的直线, 通过两点求出直线的斜率 k , ke 的值即为普朗克常量 h 。



例题

在研究光电效应实验中, 光电管的阴极材料为铯 (Cs), 用某一频率的光照射, 实验测得光电流随电压变化的图像如图 6-6 所示。已知铯的逸出功为 $3.0 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。

- (1) 铯发生光电效应的极限频率是多少?
- (2) 本次实验的入射光频率是多少?

分析

光子的能量 $E = h\nu$, 如果电子吸收一个光子刚好克服逸出功, 那么该光的频率为极限频率。当用某种频率的光照射时, 测得遏止电压, 也就知道了光电子的最大初动能, 再根据爱因斯坦光电效应方程便可计算入射光的频率。

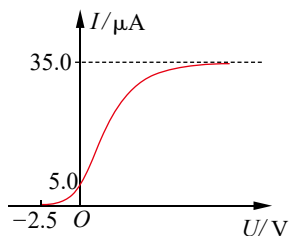


图 6-6 光电流随电压变化的图像



解

已知铯的逸出功 $W = 3.0 \times 10^{-19} \text{ J}$, 从图像可知遏止电压 $U_c = 2.5 \text{ V}$ 。

(1) 设铯材料的极限频率为 ν_c , 有 $W = h\nu_c$ 。

$$\text{解得 } \nu_c = \frac{W}{h} = 4.52 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

(2) 当光电管加反向遏止电压时, 光电流为零, 有

$$eU_c = \frac{1}{2} m v_m^2$$

设入射光频率为 ν , 根据爱因斯坦光电效应方程, 有

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

$$\text{解得 } \nu = \frac{W + eU_c}{h} = 1.06 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

策略提炼

只要测得某材料产生光电效应的极限频率, 便可计算该材料的逸出功。测得光电流为零时的遏止电压, 就可知道光电子的最大初动能。再根据爱因斯坦光电效应方程, 就能求解相关物理量。

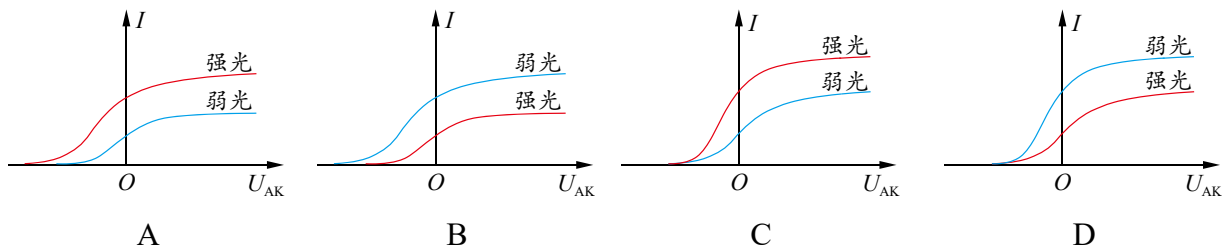
讨论

计算得到的铯的极限频率在红光范围内。在某一电压下电子被加速所获得的能量, 有时用 eV 为单位更为方便。例如, 上述遏止电压为 2.5 V, 就可知电子的最大初动能为 2.5 eV。



迁移

上述实验中, 若用频率相同、强度不同的光分别照射光电管的阴极形成光电流, 那么在下列光电流与电压的关系图像中, 正确的是



科学书屋

多光子光电效应与内光电效应

在光电效应的早期实验中, 所用光的强度不是很高, 电子几乎没有同时吸收两个光子的机会。激光的强度较高, 有极好的方向性和相干性, 用激光照射金属板, 电子有同时吸收两个或多个光子的可能性。这种一个电子吸收多个光子发生的光电效应称为多光子光电效应。

当光照射在某些半导体材料上时, 光子被吸收, 在其内部激发出导电的载流子, 从而使其电导率显著增加, 或者光照使材料两面产生一定的电势差 (光伏电压), 这些现象称为内光电效应。

拓展一步

康普顿效应

光的散射是常见的光现象。夜晚，人们看到的探照灯或激光的光柱是空气中的微粒对光散射形成的（图 6-7）。光的波动理论认为，散射光的频率与入射光的频率相等。美国物理学家康普顿（A. Compton, 1892—1962）研究了 X 射线通过石墨等较轻物质产生的散射现象，发现散射谱线中除了有波长与原波长相同的成分外，还有波长较长的成分，这种现象称为康普顿效应。

为了解释波长变长的现象，康普顿假设电子是自由电子，当光子与电子相互作用时，其过程可视为弹性碰撞，既遵守能量守恒定律，又遵守动量守恒定律。在碰撞中光子将能量 $h\nu$ 的一部分传递给了电子，光子的能量减少，波长变长，如图 6-8 所示。康普顿提出的理论与实验结果相符，从而进一步说明光具有粒子性。



图 6-7 光的散射形成了光柱

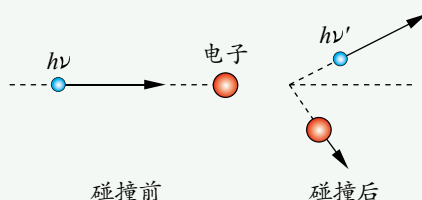


图 6-8 光子与电子相互作用的示意图

3. 光电效应的应用

光电效应在自动化控制和光电成像等领域有着广泛的应用。

（1）光电开关

光电管是利用光电效应使光信号转换成电信号的基本光电转换器件，应用光电管可控制电路接通或断开。图 6-9 是光电控制报警电路，正常情况下，光束照射到光电管，光电管产生光电效应，与光电管连接的电路有电流，电磁铁产生磁场，吸引报警电路中的开关，使报警电路断开；当有物体从光源和光电管间通过时，挡住光束，光电管不再产生光电效应，与光电管连接的电路没有电流，电磁铁对报警电路的开关没有吸引力，在弹簧弹力作用下，开关闭合，警铃发出警报。

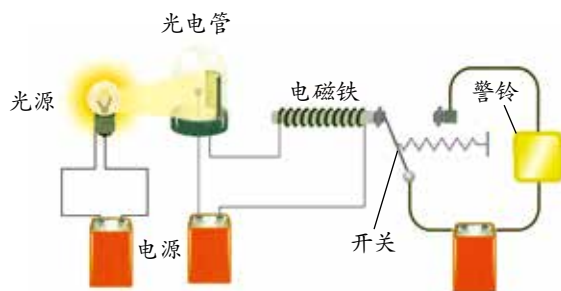


图 6-9 光电控制报警电路示意图



(2) 光电成像

光电成像的原理是利用光电效应先将光信号转换成电信号，然后将电信号转换成光信号。

电荷耦合器件 (charge-coupled device, 简称 CCD) 是光电成像系统中将光信号转换为电信号的器件, 由众多的微小光敏元件、电荷转移电路、电荷读取电路组成。CCD 广泛应用于数码相机、扫描仪、数字摄像机等设备中。例如, 红外成像的原理: 物体发出的红外光使红外光电管产生光电效应, 红外光转换成电信号, 经放大后, 再把电信号转换成可见光, 使人在漆黑的夜晚也能观察到物体 (图 6-10)。



图 6-10 红外照片



迷你实验室

巧用手机照相功能检测遥控器

现代家庭中, 各种电器的遥控设备时常会出现无法遥控的现象, 究竟是遥控器坏了, 还是电器出问题了?

人眼看不见遥控器发射的红外线, 无法判定遥控器能否正常工作。有一种简单的方法可快速判定问题所在。只要打开手机的照相机, 用手机摄像头对准遥控器, 按遥控器的任意键, 若能看见遥控器发光, 说明遥控器能发出控制信号。因为手机摄像头的感光频率范围比人眼的视觉频率范围宽, 所以手机能“看见”红外线。

请你动手试一试, 上面说的是真的吗?

4. 光的波粒二象性

荷兰物理学家惠更斯是光的波动说的代表, 他认为光是某种振动, 以波的形式向周围传播。英国科学家托马斯·杨用光的波动理论解释了光的干涉现象, 并成功地通过实验实现了两束光的干涉, 为光的波动理论提供了实验证据。法国科学家菲涅耳进一步发展了光的波动理论, 定量计算了光通过狭窄物体和小缝隙所产生的衍射光强分布, 结论与实验结果一致。麦克斯韦提出的光是一种电磁波的学说, 将光的波动说发展到了相当完美的地步。光电效应并没有否定光的波动性。爱因斯坦提出光子能量与光的频率有关, 光子仍有波的特征。

光的波动说或光的粒子说都只能解释光的部分现象，单独应用时均不能解释光的所有现象。事实上，光子既有粒子的特征，又有波的特征，即光具有**波粒二象性**（wave-particle dualism）。

玻恩（M. Born, 1882—1970）用概率波很好地解释了光的波粒二象性。通过双缝实验可理解概率波。图 6-11 是用很弱的光做双缝干涉实验得到的图片，图片上的一个一个无规律分布的光点，体现了光的粒子性；图 6-12 是用很弱的光做双缝干涉实验并进行较长时间曝光的图片，出现了比较明显的明暗条纹，体现了较明显的波动性。



图 6-11 少量光子形成的图像

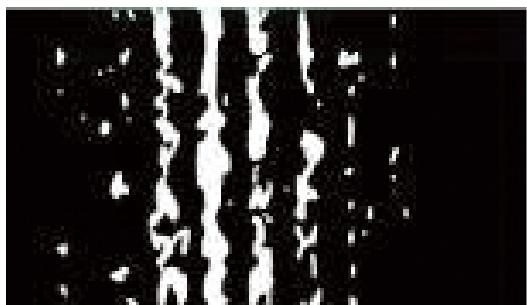


图 6-12 少量光子长时间曝光形成的图像

上述现象可这样解释：光波是一种概率波，光子出现在哪个位置，受概率支配。单个光子出现在哪个位置是随机的，因此少量光子形成的光点是无规律的。当有大量光子时，概率大的位置出现的光子多，形成亮条纹；概率小的位置出现的光子少，形成暗条纹。

光的波动性和粒子性不是均衡表现的，有时波动性表现得比较明显，有时粒子性表现得比较明显。当光的波长较长时，光子的能量和动量很小，个别光子难以显示出可观测效应，人们观察到的是大量光子的集体行为，因此波动性比较明显，波长越长，波动性越明显。光在与电子等物质相互作用时更多地表现为粒子性，在传播过程中更多地表现为波动性。

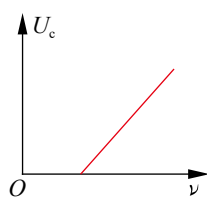


节 练 习

1. 某种金属在绿光照射下恰能产生光电效应。现用紫光或红光照射，能否产生光电效应？为什么？
2. 某种单色光的频率为 ν ，用它照射某种金属时，逸出的光电子中动能最大值为 E_k 。这种金属的逸出功和极限频率分别是多少？
3. 在光电效应实验中，分别用频率为 ν_a 、 ν_b 的单色光 a 、 b 照射到同种金属上，测得相应的遏止电压分别为 U_a 和 U_b ，光电子的最大初动能分别为 E_{ka} 和 E_{kb} ， h 为普朗克常量。下列说法正确的是
 - A. 若 $\nu_a > \nu_b$ ，则一定有 $U_a < U_b$
 - B. 若 $\nu_a > \nu_b$ ，则一定有 $E_{ka} > E_{kb}$
 - C. 若 $U_a < U_b$ ，则一定有 $E_{ka} < E_{kb}$
 - D. 若 $\nu_a > \nu_b$ ，则一定有 $h\nu_a - E_{ka} > h\nu_b - E_{kb}$



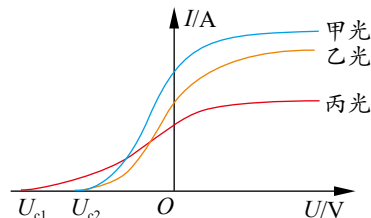
4. 在某次光电效应实验中, 得到的遏止电压 U_c 与入射光的频率 ν 的关系如图所示。若该直线的斜率和纵轴截距分别为 k 和 b , 电子电荷量的绝对值为 e , 试用上述物理量表示普朗克常量和所用材料的逸出功大小。



第4题

5. 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(甲光、乙光、丙光), 如图所示。可判断出

- A. 甲光的频率大于乙光的频率
- B. 乙光的频率小于丙光的频率
- C. 乙光对应的极限频率大于丙光的极限频率
- D. 甲光对应的光电子最大初动能大于丙光的光电子最大初动能



第5题

6. 查阅资料可知, 铁的逸出功是 4.7 eV 。求:

- (1) 铁的极限频率;
- (2) 铁在波长为 150 nm 的电磁波辐射下, 产生的光电子的最大初动能。

请提问



第2节

实物粒子的波粒二象性

光具有波粒二象性，那么作为实物粒子的原子、质子、中子和电子等是否也具有波粒二象性呢？本节我们将学习物质波的相关知识，进一步体会微观世界的量子化特征。

1. 德布罗意假说

德布罗意注意到普朗克能量子和爱因斯坦光子理论的成功，考察了对光的认识过程，意识到人们讨论光时过分地强调波动性，忽略了粒子性；同样，在讨论实物粒子时，人们只关注粒子性，忽略了波动性。于是，他大胆提出实物粒子也具有波动性，即每一个运动的粒子都有一个对应的波，而且粒子的能量 E 与相应的波的频率 ν 之间的关系为

$$E = h\nu$$

粒子的动量 p 与相应波长 λ 之间的关系为

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

上述关系称为德布罗意关系。式中的 h 为普朗克常量，通过普朗克常量把粒子性和波动性联系起来。后来，人们称这种波为物质波或德布罗意波。

例 题

电子质量 $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，普朗克常量 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ，求动能为 100 eV 的自由电子的物质波波长。

分析

先由电子的动能求出电子的速度，进而求出电子的动量 p ，最后由德布罗意关系求出电子的物质波波长。



解

由题意可知, $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $E = 100 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-17} \text{ J}$, $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 。

根据 $E = \frac{1}{2}mv^2$, $p = mv$, 可得 $p^2 = 2mE$

将 $p = \frac{h}{\lambda}$ 代入, 得

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.6 \times 10^{-17}}} \text{ m} = 1.2 \times 10^{-10} \text{ m}$$

讨论

动能为 100 eV 的自由电子的物质波波长是 $1.2 \times 10^{-10} \text{ m}$, 与可见光相比, 波长很短。

策略提炼

用德布罗意关系解决问题时, 要注意公式中物理量的单位和数量级。



迁移

我们为什么观察不到宏观物体的波动性? 请计算下题, 试着从中找到答案。

一个质量为 20 g 的子弹以 $1\,000 \text{ m/s}$ 的速度运行时, 请计算其物质波波长, 并由此分析为何无法观察到子弹的波动性。

2. 对德布罗意假说的实验探索

粒子具有波动性, 能否像光那样发生衍射现象和干涉现象呢?

1927 年, 戴维孙 (C. Davisson, 1881—1958) 和革末 (L. Germer, 1896—1971) 通过实验发现了电子的衍射现象。如图 6-13 所示, 从灯丝 K 射出的电子经加速电压 U 加速后, 通过狭缝 D 成为很细的平行电子束, 射到单晶体 M 上, 用与探测器 B 相连的电流计 G 测量反射的电流。实验时保持 θ 角不变, 研究加速电压 U 和反射电流 I 之间的关系。结果表明, 电流 I 不随电压 U 的增大而单调增大或减小, 呈现出的规律与 X 射线在晶体上反射产生的衍射规律相似, 这表明电子具有波动性。

1927 年, 汤姆孙 (G. Thomson, 1892—1975) 用实验证明, 电子在穿过金属片后像 X 射线一样产生衍射现象, 也证实了电子的波动性 (图 6-14)。他的实验方法是, 将电子束经上万伏高压加速, 使

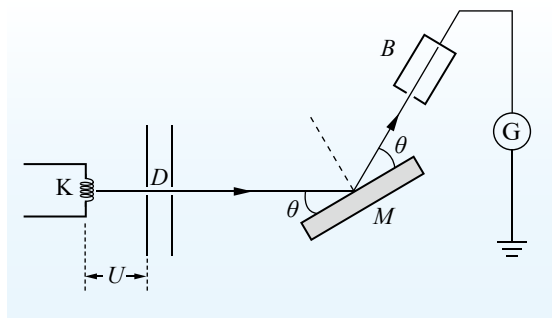


图 6-13 戴维孙和革末实验示意图

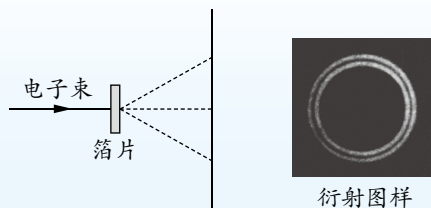


图 6-14 汤姆孙实验示意图

其能量为 $10 \sim 40 \text{ keV}$ ，电子可穿过固体薄箔，直接产生衍射图样（图 6-15）。戴维孙和汤姆孙分别独立证实了电子的波动性，并因此共同获得了诺贝尔物理学奖。1960 年，约恩孙直接做了电子双缝干涉实验，从屏上摄得了类似杨氏双缝干涉图样的照片（图 6-16）。这些结果都证明了电子具有波动性。



图 6-15 电子穿过多晶金箔的衍射图样

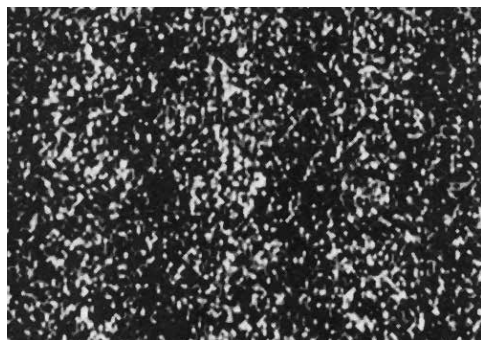


图 6-16 电子双缝干涉图样



科学书屋

扫描隧道显微镜

扫描隧道显微镜（STM）以一根非常细小的针尖和被研究物质的表面为两个导体，形成两个电极（图 6-17）。当针尖与样品表面非常接近（一般小于 1 nm ）时，由于电子存在波动性，电子就会穿过两个电极之间的绝缘层流向另一极，这种电流称为隧道电流。隧道电流的大小与针尖到样品表面的距离密切相关。测量时让针尖在样品表面扫描，控制隧道电流不变，针尖随样品表面高低起伏。针尖的三维运动信号可通过计算机系统在屏幕上直接显示，或者在记录纸上打印下来，获得样品表面的三维立体信息（图 6-18）。在低温下，利用 STM 可对原子进行直接操纵和排布；在常温下，也可对单个原子进行拾取和填充，实现了按人类意愿重新排布单个原子的梦想。

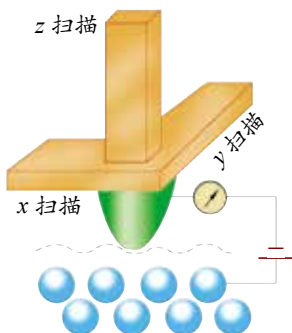


图 6-17 扫描隧道显微镜基本原理示意图

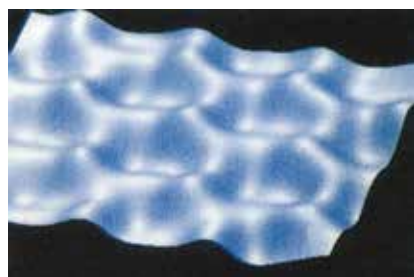


图 6-18 利用 STM 获得的样品表面的示意图



3. 不确定性关系

在宏观世界中，一个物体的位置和动量是可以同时确定的。但在微观世界中，粒子的位置和动量不能同时确定。德国物理学家海森堡（W. Heisenberg, 1901—1976）研究发现，这种不确定性存在如下关系

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

式中， Δx 为位置的不确定范围， Δp 为动量的不确定范围， h 为普朗克常量，这个关系通常称为**不确定性关系**，也称为海森堡不确定性关系。

不确定性关系表明，不能同时精确确定一个微观粒子的位置和动量，位置不确定范围与动量不确定范围的乘积大于或等于 $\frac{h}{4\pi}$ 。也就是说，我们不可能同时准确地知道粒子的位置和动量。普朗克常量是一个很小的量，对宏观物体来说，这种不确定性关系可忽略不计，故宏观物体的位置和动量是可以同时确定的。



拓展一步

能量和时间的不确定性关系

有不确定性关系的另一对物理量是能量和时间，能量 E 和时间 t 的不确定性关系为 $\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$ 。原子物理中，电子的能级实际上不是单一的能量值，能量有分布范围。电子停留在同一能级上的时间是不同的，有的停留时间短，有的停留时间长。根据能量和时间的不确定性关系，能量不确定范围越小的能级，电子停留的时间越长。

能了解光电效应现象和爱因斯坦光电效应方程的内涵，了解光和实物粒子的波粒二象性，了解微观世界的量子化特征；能解释光电效应在生产生活中的应用。具有与波粒二象性相关的物质观念、相互作用观念和能量观念。

能体会量子论的建立对人们认识物质世界的影响，了解人类认识自然的局限性与不断探索自然的必要性；具有认识自然、理解自然的热情与探索精神；能站在更高层面理解科学·技术·社会·环境的相互联系，具有尊重自然、爱护自然，与自然协调发展的责任心和使命感。

——物理观念，科学态度与责任



素养提升



节练习

1. 德布罗意提出的物质波的含义是什么？有哪些实验证实了微观粒子具有波动性？
2. 波粒二象性是微观世界的基本特征。下列说法正确的是
 - A. 光电效应现象揭示了光的粒子性
 - B. 中子束射到晶体上产生衍射图样说明中子具有波动性
 - C. 电子在穿过金属片后的衍射现象，证实了电子的粒子性
 - D. 动能相等的质子和电子，它们的物质波波长也相等

3. 利用金属晶格 (大小约 10^{-10} m) 作为障碍物观察电子的衍射图样, 对应的方法是让电子通过电场加速后, 形成电子束照射到金属晶格上, 从而得到电子的衍射图样。如果加速电压为 U , 则下列说法正确的是
- A. 该实验说明了电子具有波动性
B. 加速电压 U 越大, 物质波波长越短
C. 加速电压 U 越大, 电子的衍射现象越明显
D. 若用相同动能的质子替代电子, 衍射现象更明显
4. 已知中子质量 $m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 普朗克常量 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, 请估算物质波波长 $\lambda = 1.82 \times 10^{-10} \text{ m}$ 的热中子动能的数量级。
5. 电子质量 $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 中子质量 $m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 普朗克常量 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, 能量为 $2\,000 \text{ eV}$ 的电子和中子的波长分别是多少? 说明为什么中子衍射实验要采用能量很低的慢中子。
6. 原子核的半径为 10^{-15} m , 请估计核内质子的动量不确定范围。如果电子被限制在核内, 其动量的不确定范围又是多少?



请提问



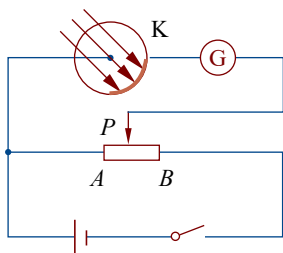
章末练习

科学认知

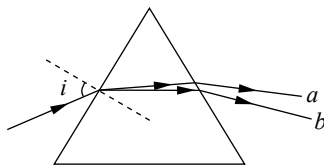
- 关于物质波，下列说法正确的是
 - 质量大的物体，其物质波波长短
 - 速度大的物体，其物质波波长短
 - 动量大的物体，其物质波波长短
 - 动能大的物体，其物质波波长短
- 下表给出了一些金属材料的逸出功。已知普朗克常量 $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，光速 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，现用波长为 400 nm 的单色光照射下述材料，能产生光电效应的材料有几种？

材料	铯	钙	镁	铍	钛
逸出功 / $\times 10^{-19} \text{ J}$	3.0	4.3	5.9	6.2	6.6

- 利用光电管研究光电效应的实验电路如图所示。用频率为 ν 的可见光照射阴极 K，电流计中有电流通过，则
 - 用紫外光照射 K，电流计中不一定有电流通过
 - 用红外光照射 K，电流计中一定没有电流通过
 - 用频率为 ν 的可见光照射 K，滑动变阻器的滑片移到 A 端，电流计中一定有电流通过
 - 用频率为 ν 的可见光照射 K，滑动变阻器的滑片向 B 端滑动时，电流计示数可能不变
- 一束复色光通过三棱镜后分解成两束单色光 a、b，如图所示。下列说法正确的是
 - 若增大入射角 i ，则 b 光先消失
 - 在该三棱镜中 a 光波长小于 b 光波长
 - a 光能发生偏振现象，b 光不能发生偏振现象
 - 若 a、b 光分别照射同一光电管都能发生光电效应，则 a 光的遏止电压低



第 3 题



第 4 题

- 由于电子的物质波波长比可见光的波长更短，电子显微镜在科学研究中有非常重要的作用。已知电子的质量为 $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，为了使电子具有的物质波波长为 20.0 nm ，若电子从静止开始加速，需给予它多大的加速电压？
- 分别用真空中波长为 λ 和 $\frac{3}{4}\lambda$ 的单色光照射同一金属板，发射出的光电子的最大初动能之比为 $1:2$ 。若以 h 表示普朗克常量， c 表示真空中的光速，则此金属的逸出功为多少？
- 在光电效应实验中，某金属的极限频率对应的光在真空中波长为 λ_0 。已知电子的电荷量、真空中的光速和普朗克常量分别为 e 、 c 和 h ，该金属的逸出功为多少？若用真空中波长为 λ ($\lambda < \lambda_0$) 的单色光做实验，则其遏止电压为多少？

科学辨析

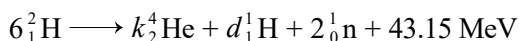
8. 有人设想在太空中利用太阳帆船进行星际旅行。利用太空中阻力很小的特点，制作一个面积足够大的帆接收太阳光，利用光压（光对被照射物体单位面积上所施加的压力）推动太阳帆船前进。假设在太空中某位置，太阳光在单位时间内垂直通过单位面积的能量为 E_0 ，太阳光波长的均值为 λ ，光速为 c ，太阳帆板的面积为 A ，太阳帆船的总质量为 M ，太阳光照射到太阳帆板上的反射率为百分之百，求太阳光的光压作用在太阳帆船上产生的最大加速度。根据上述对太阳帆船的了解及所学过的知识，请简单说明太阳帆船设想的可能性及困难（至少两条）。

科技交流

9. 查阅资料，了解光电效应在光电技术方面的应用，如光电管、光电开关、光控继电器、光电倍增管、光电传感器等，撰写一篇科学报告。

温故知新

10. 当氘等离子体被加热到适当高温时，可能发生氘核参与的几种聚变反应，并释放能量。这几种反应的总效果可表示为



该反应方程中的 k 和 d 各为多少？质量亏损为多少？

11. 请根据第4章（原子结构）、第5章（原子核与核能）和第6章（波粒二象性）的内容，结合你的理解，画出概念图。



我的学习总结



单元自我检测

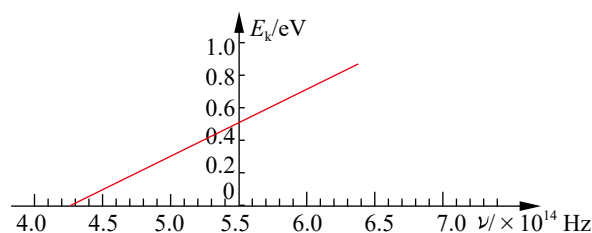
一、选择题(本题共5小题。在每小题给出的四个选项中,第1~3题只有一项符合题目要求,第4、5题有多项符合题目要求)

1. ^{131}I 的半衰期约为8天。若某药物含有质量为 m 的 ^{131}I , 经过32天后, 该药物中 ^{131}I 的含量大约还有

- A. $\frac{m}{4}$ B. $\frac{m}{8}$ C. $\frac{m}{16}$ D. $\frac{m}{32}$

2. 用光照射某种金属时逸出的光电子的最大初动能随入射光频率的变化图像如图所示。图像与横轴交点的横坐标为 $4.27 \times 10^{14} \text{ Hz}$, 与纵轴交点的纵坐标为 0.5 eV 。由图可知

- A. 该金属的极限频率为 $4.27 \times 10^{14} \text{ Hz}$
B. 该金属的极限频率为 $5.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$
C. 该图像的斜率的倒数表示普朗克常量
D. 该金属的逸出功为 0.5 eV



第2题

3. 氢原子能级的结构如图所示, 现有大量的氢原子处于 $n=4$ 的激发态, 当向低能级跃迁时辐射出若干不同频率的光。下列说法正确的是

- A. 衍射现象最明显的光来自 $n=4$ 能级到 $n=1$ 能级的跃迁
B. 频率最小的光来自 $n=2$ 能级到 $n=1$ 能级的跃迁
C. 这些氢原子总共可辐射出3种不同频率的光
D. 用 $n=2$ 能级跃迁到 $n=1$ 能级辐射出的光照射逸出功为 6.34 eV 的金属铂能发生光电效应

n	E/eV
∞	0
$\vdots$	
4	-0.85
3	-1.51
2	-3.4
1	-13.6

第3题

4. 下列释放核能的反应方程, 表述正确的有

- A. $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n}$ 是核聚变反应
B. $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n}$ 是 β 衰变
C. $^1_0\text{n} + ^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{141}_{56}\text{Ba} + ^{92}_{36}\text{Kr} + 3^1_0\text{n}$ 是核裂变反应
D. $^1_0\text{n} + ^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{140}_{54}\text{Xe} + ^{94}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$ 是 α 衰变

5. 三种不同的入射光甲、乙、丙分别射在三种不同的金属 a 、 b 、 c 表面, 均恰能使金属中逸出光电子。若三种入射光的波长 $\lambda_{\text{甲}} > \lambda_{\text{乙}} > \lambda_{\text{丙}}$, 则

- A. 用入射光甲照射金属 b 和 c , 金属 b 和 c 均可发生光电效应现象
B. 用入射光甲和乙照射金属 c , 均可使金属 c 发生光电效应现象
C. 用入射光丙照射金属 a 与 b , 金属 a 和 b 均可发生光电效应现象
D. 用入射光乙和丙照射金属 a , 均可使金属 a 发生光电效应现象

二、非选择题

6. 氘核和氚核可发生热核聚变而释放出巨大的能量, 该反应方程为 $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + x$, 式中 x 是某种粒子。已知 ^2_1H 、 ^3_1H 、 ^4_2He 和粒子 x 的质量分别为 2.0141 u 、 3.0160 u 、 4.0026 u 和 1.0087 u , 1 u 相当于 931.5 MeV 。粒子 x 是什么? 该反应释放出的能量为多少? (结果保留3位有效数字)

7. 在光电效应实验中，当用能量为 $E = 3.1 \text{ eV}$ 的光照射涂有某种金属的阴极 K 时，产生光电流。若阴极 K 的电势高于阳极 A 的电势，且电势差为 0.9 V ，光电流刚好截止。当阳极 A 的电势高于阴极 K 的电势，且电势差也为 0.9 V 时，光电子到达阳极 A 的最大动能是多少？此金属的逸出功是多少？
8. 已知某种紫光的波长是 440 nm 。若将电子加速，使它的物质波波长是这种紫光波长的 $\frac{1}{10^4}$ 。
- (1) 求电子的动量大小。
- (2) 已知电子质量 $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，电子电荷量 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，普朗克常量 $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ，试推导加速电压跟物质波波长的关系，并计算加速电压的大小。（结果保留 1 位有效数字）



单元自我评价

回顾本单元的学业要求和所学内容，结合本次单元自我检测和平时学习情况，根据下表左列的提示，进行自我评价，在表中填写学会了什么、存在什么问题、今后努力的方向等相关内容。

所学内容	我学会的	存在问题	努力方向
物理概念 规律及应用			
模型建构 科学推理 科学论证 质疑创新			
问题 证据 解释 交流			
科学本质 科学态度 社会责任			

后 记

21 世纪初我国启动基础教育课程改革，迄今已十余年。我们根据《普通高中物理课程标准（实验）》（2003 版）编写的普通高中课程标准实验教科书《物理》在实验区已使用十余年。随着基础教育课程改革的深入，修订后的《普通高中物理课程标准（2017 年版）》（以下简称《标准》）已由教育部正式颁布，因此，实验版教科书《物理》也应随之修订。根据国家大政方针和《标准》的要求，在对一线教师大规模问卷调查及深入访谈的基础上，基于多年教科书研究、编写和实践的积淀，教科书编写组对实验版教科书进行了全面修订。

本次修订后的普通高中物理课程标准修订版教科书的整体架构如图所示。

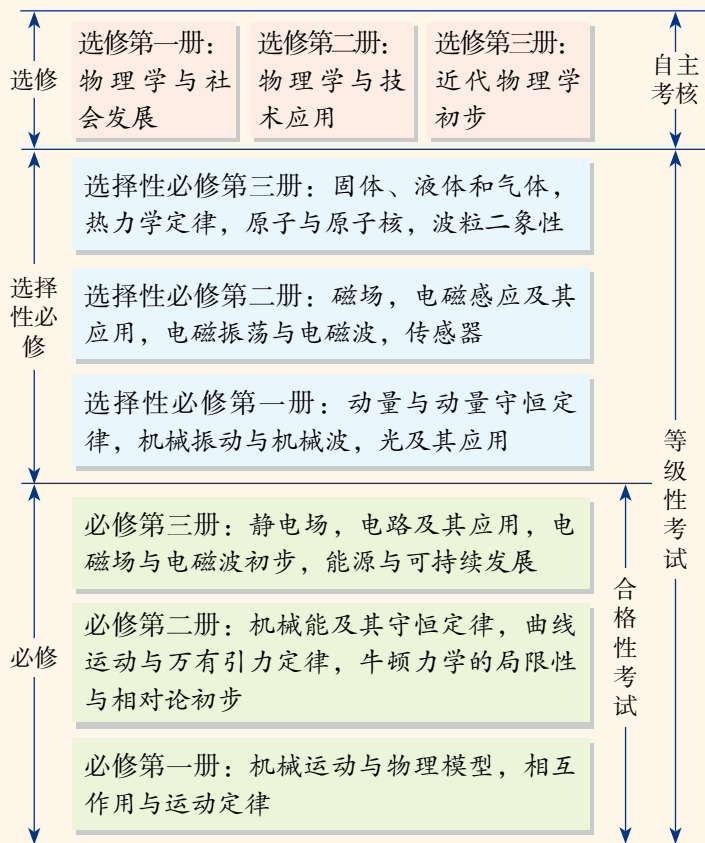
总体来看，修订版教科书具有如下特点：

1. 立意更高，促进学生物理学科核心素养的达成。不仅继承实验版教科书注重落实三维课程目标的特点，而且更加注重体现物理教科书的育人功能，以“素养提升”“本章学业要求”等栏目导向，有效促进教学方式的改进，提升学生物理学科核心素养。

2. 寓意更深，注重从情境走向物理，从物理走向社会的内涵。不仅继承实验版教科书注重联系实际的特点，而且强调问题情境与物理内容的相互呼应。通过“以惑为诱、以问促学”的内容设计，培养学生的物理自然观和建模、推理、论证及质疑能力。

3. 更重实践，强调概念构建过程，注重探究能力的培养。不仅继承实验版教科书的实验栏目，而且注重凸显物理实验的育人功能。通过“学生必做实验”“实验探究”“迷你实验室”“DIS 实验室”等实验版块，以“引导、递进、开放”的精巧设计，培养学生的问题、证据、解释及交流方面的探究能力。

4. 更富逻辑，结构更完善，更符合教育教学规律。不仅继承了实验版教科书结构上注重逻辑的特点，而且通过“方法点拨”“策略提炼”“拓展一步”等栏目，进一步升华学



修订后整套教科书的基本架构

习内容，同时注重难点分解、台阶降低、逐步到位，关注了学生的认知特点。

5. 更重评价，发挥习题功能，促进学生全面发展。改进实验版教科书在习题设计方面的不足，基于物理学科核心素养和学业质量要求，分层设计“节练习”“章末练习”“单元自我检测”，更好发挥习题的功能，促进对核心素养测试的探索。

6. 更加拓展，反映物理学对人类生活及社会发展的影响。不仅继承实验版教科书从物理走向社会的特点，而且注重通过“科学书屋”“物理聊吧”等栏目培养学生的学习兴趣、人文情怀，及节约能源、保护环境的科学态度与责任感。

7. 臻于精致，体现“以学生发展为本”的理念。不仅继承实验版教科书图文并茂的特点，而且更加美观、适用，从结构确定、内容纳入、栏目设计、图片选用到版式推敲等多方面皆精雕细琢，旨在全力打造高质量的一流物理教科书。

编写组凝聚了高校学科专家、省市物理教研员、中学教学名师、考试评价专家、国际物理教科书研究者等研究力量，具有高校研究平台与中学教学积累的综合优势。各类课题研究、理论探索、国际比较等，使教科书修订具有研究基础、国际视野，能让物理教科书的质量提升到更高的水平。中学各级教学名师丰富的实践经验、珍贵的教学心得，为教科书修订中落实以学生发展为本的教学理念搭建了接地气的脚手架、扎实的一线平台，让修订版教科书更符合教学实际。

本教科书编写组主要成员及分工如下：全套教科书主编为廖伯琴；本册核心编者有冯庆、许华忠、刘健智、廖元锡、罗基鸣、冯华、邓磊、廖伯琴；本册由廖伯琴、冯庆、邓磊统稿，由廖伯琴定稿；全套教科书编务联系工作由李富强、李洪俊负责。

教科书的修订是一系统工程，需各方力量支持。参与本次修订版教科书编写、讨论、审读、组织试教或作出前期贡献的老师还有：李勇、程力、高山、周智良、宋树杰、王宪收、陈松、林伟庆、黄晓标、杨燕鸣、梅家焯、谢德胜、林明华、杜明荣、刘林、田序海、杨学切、青春、黄国雄、蒋小平、蒋敏、李太华、张正严、翟厚岚、洪正平、梁雷、贺晓霞、张修文、梁一平、林钦、李晶晶、王文祥、董茂寅、宋协俊、邹建光、时玉义、马凤喜、吴新田、侯辰虎、郑玉峰、程美贵、冯连奎、曹国莹、岳志国、姜妮、欧剑雄、严士线、彭罡、张庆贵、吴双飞、刘新选、黄巧曦、吴寒平、李勇顺、黄惠菁、赵保钢、刘晓玲、林杰、罗国忠、朱霞、覃朝玲、张滨、黄懋恩、王崇渝等。张书迪女士为本教科书设计图标，并在版式设计方面提出若干建议。

本次修订得到众多专家、学者、教研员、教师、学生以及家长的热诚帮助，得到了山东科学技术出版社的鼎力支持。在此，我们特向提供帮助的各方人士表示由衷感谢！修订后的教科书将很快进入中学课堂，我们恳请各方人士不吝赐教。

挑战与发展共存！我们期待批评，也期待各位的支持。谢谢！

主编 廖伯琴

2019年10月于西南大学荟文楼

物理

WU LI

普通高中教科书

物 理

选择性必修 第三册

PUTONG GAOZHONG JIAOKESHU
WULI XUANZEXING BIXIU DI SAN CE

主 编 廖伯琴

主管单位：山东出版传媒股份有限公司

出 版 者：山东科学技术出版社

地址：济南市市中区英雄山路189号
邮编：250002 电话：(0531) 82098088
网址：www.lkj.com.cn
电子邮箱：sdkj@sdcbcm.com

发 行 者：山东新华书店集团有限公司

地址：济南市市中区英雄山路189号
邮编：250002 电话：(0531) 82797666

印 刷 者：山东新华印刷厂潍坊厂

地址：潍坊市潍州路738号
邮编：261031 电话：(0536) 2116806

规格：大16开 (210 mm × 297 mm) 印张：9.25 字数：213千字
版次：2019年12月第1版 2021年11月第5次印刷

ISBN 978-7-5331-9986-9 定价：10.53元

价格批准文号：鲁发改价格核(2021)609019 举报电话：12345

物理 必修 第一册
物理 必修 第二册
物理 必修 第三册
物理 选择性必修 第一册
物理 选择性必修 第二册
物理 选择性必修 第三册



绿色印刷产品





致力于用榜样的力量提升学生成绩的共享家教平台

中国家庭教育学会荣誉会员单位

985/211 大学生 1对1 上门辅导

找家教就像叫“代驾”一样简单
家长们都在偷偷用的家教预约神器

记得拍照留存哦



扫码关注 预约上门

关注送200元优惠券

小初高全科辅导

学霸云集任您挑

学历真实可担保



与优秀大学生同行，激发孩子无限潜能



微信搜索公众号：365优教网

咨询热线：4000-711-365

YOUJ 优教

既是找老师，更是找榜样

家教老师全国招募中