

普通高中

WULI  
物理

教学参考资料



选择性必修

第三册

上海科学技术出版社

普通高中

物 理  
教学参考资料

选择性必修 第三册

上海科学技术出版社

主 编：蒋最敏 高 景

本册主编：朱 璀

编写人员：(以姓氏笔画为序)

朱 璀 李希凡 杨鸣华 杨 炯 徐建军 廖 灿 谭一宁

图书在版编目(CIP)数据

普通高中物理教学参考资料：选择性必修. 第三册 /  
上海市中小学(幼儿园)课程改革委员会组织编写；蒋最  
敏，高景主编。-- 上海：上海科学技术出版社，2023.8(2025.8重印)  
ISBN 978-7-5478-6254-4

I. ①普… II. ①上… ②蒋… ③高… III. ①中学物  
理课—高中—教学参考资料 IV. ①G634.73

中国国家版本馆CIP数据核字(2023)第131822号

责任编辑：徐青莲 李孟达

封面设计：房惠平

普通高中 物理教学参考资料 选择性必修 第三册

上海市中小学(幼儿园)课程改革委员会组织编写

出 版 上海世纪出版(集团)有限公司 上海科学技术出版社  
(上海市闵行区号景路159弄A座9F~10F 邮政编码201101)

发 行 上海新华书店

印 刷 上海新华印刷有限公司

版 次 2023年8月第1版

印 次 2025年8月第3次

开 本 890毫米×1240毫米 1/16

印 张 11

字 数 299千字

书 号 ISBN 978-7-5478-6254-4/G·1174

定 价 33.00元

版权所有·未经许可不得采用任何方式擅自复制或使用本产品任何部分·违者必究  
如发现印装质量问题或对内容有意见建议,请与本社联系。电话: 021-64848025

# 编写说明

本书是《普通高中教科书 物理 选择性必修 第三册》的配套教师用书,主要阐释教材编写意图,阐明相关物理概念和知识,并提供相应的资料作为知识背景,旨在帮助教师更深入地理解相关教学内容。

教材的编写坚持以立德树人为目标,注重核心素养与教学内容的内在联系。根据在“情境、探究、应用”框架下强调“从生活走进物理,从物理走向社会”,教材每章节的内容引入均注重以实际生活中的真实问题为情境,然后按“描述现象”“提出问题”“开展探究”“形成结论”“实际应用”的逻辑顺序展开。据此,本书以章为单位进行编写,内容包括整章分析、本章教材解读、本章练习部分解读、本章实验与活动部分解读四部分。

**整章分析** 由“学习目标”和“编写意图”两个栏目组成。“学习目标”部分根据课程标准的要求,明确了在本章的学习过程中涉及的基本方法、技能,以及应体现和逐步形成的学科核心素养;“编写意图”部分包括课程标准的相关要求,本章涉及的重点概念与形成核心素养的关系,本章内容与前、后章内容的关系和在形成核心素养过程中的作用,以及本章内容的学时建议。

**本章教材解读** 先在章首对该章学习内容及展开逻辑进行简单说明,再以节为单位编写,由“本节编写思路”“正文解读”“资料链接”“问题与思考解读”和“复习与巩固解读”等栏目组成。“本节编写思路”主要对该节所要解决的问题及问题解决的逻辑关系、关键支架、所涉及的知识和规律与核心素养的关系等做出分析说明。“正文解读”的内容包括:节首图的情境设置、学习内容与教材正文关系的说明;针对教师教或学生学的过程中可能产生的疑问以及一些重要概念做进一步说明和阐述;介绍相关内容的知识背景、实际应用和物理学史等;教材中栏目的说明及设置栏目的目的和作用;阐述学期活动的性质、方法和要求等。“资料链接”是对“正文解读”部分内容的补充和进一步阐述。“问题与思考解读”和“复习与巩固解读”部分设置“参考解答”“命题意图”和“主要素养与水平”,旨在改变相对固化的习题形式,适当增强习题开放性,减少死记硬背和“机械刷题”现象。其中“命题意图”阐述了编写者的出题意图,包括该题对概念的形成、方法的掌握所起的作用,以及该题应体现或解决的重点知识等。“主要素养与水平”是编写者根据自身对课程标准的理解给出习题所对应或体现的核心素养二级指标以及相应的水平(依据的标准请参见附录:物理学科核心素养的水平划分,书中的“Ⅰ”“Ⅱ”……分别对应“水平1”“水平2”……)。

**本章练习部分解读** 与《普通高中教科书 物理练习部分 选择性必修 第三册》同步,设置了“参考解答”和“习题主要素养与水平分析”。

**本章实验与活动部分解读** 与《普通高中教科书 物理实验与活动部分 选择性必修》同步,设置了

“参考解答”和“命题意图”。

应该指出,给出习题体现的“主要素养与水平”的做法是一种尝试,其目的在于引发广大教师在教学实践中对新课程、新课标和新教材所倡导的学科核心素养及其水平划分、学业质量及其水平划分进行深入的思考。教师对水平划分的描述一定会有“见仁见智”的理解。同时,教学过程如何开展、具体内容的教学怎样进行,需要教师根据学情和自身的教学特点做出考虑和安排,这是教师创造性、个性化的工作,应该予以充分的尊重。相应地,书中并未给出具体的教学指导。

对于书中存在的不足之处,我们欢迎广大教师和物理工作者提出宝贵的意见和建议。

# 目录

<b>第十章 分子动理论 .....</b>	<b>1</b>
第一部分 整章分析 .....	1
第二部分 本章教材解读 .....	2
第一节 分子的大小 .....	3
第二节 分子的运动 分子间的相互作用 .....	8
第三节 分子运动速率分布的统计规律 .....	13
第三部分 本章练习部分解读 .....	19
第四部分 本章实验与活动部分解读 .....	21
<b>第十一章 气体、液体和固体 .....</b>	<b>22</b>
第一部分 整章分析 .....	22
第二部分 本章教材解读 .....	24
第一节 气体的状态 .....	25
第二节 气体的等温变化 .....	29
第三节 气体的等容变化和等压变化 .....	34
第四节 液体的基本性质 .....	41
第五节 固体的基本性质 .....	48
第六节 材料及其应用简介 .....	53
第三部分 本章练习部分解读 .....	60
第四部分 本章实验与活动部分解读 .....	65
<b>第十二章 热力学定律.....</b>	<b>67</b>
第一部分 整章分析 .....	67
第二部分 本章教材解读 .....	68

第一节 物体的内能 .....	69
第二节 能量的转化与守恒 .....	74
第三节 能量转化的方向性 .....	79
第三部分 本章练习部分解读 .....	87
第四部分 本章实验与活动部分解读 .....	89
<b>第十三章 原子结构 .....</b>	<b>90</b>
第一部分 整章分析 .....	90
第二部分 本章教材解读 .....	91
第一节 电子的发现 .....	92
第二节 原子的核式结构模型 .....	98
第三节 玻尔的原子模型 .....	102
第三部分 本章练习部分解读 .....	112
第四部分 本章实验与活动部分解读 .....	113
<b>第十四章 微观粒子的波粒二象性 .....</b>	<b>114</b>
第一部分 整章分析 .....	114
第二部分 本章教材解读 .....	115
第一节 光电效应 光子说 .....	116
第二节 波粒二象性 .....	124
第三节 原子结构的量子力学模型 .....	129
第三部分 本章练习部分解读 .....	136
<b>第十五章 原子核 .....</b>	<b>137</b>
第一部分 整章分析 .....	137
第二部分 本章教材解读 .....	138
第一节 天然放射现象 原子核的衰变 .....	139
第二节 原子核的组成 .....	143
第三节 核能及其应用 .....	149
第四节 粒子物理简介 .....	157
第三部分 本章练习部分解读 .....	166
<b>附录 物理学科核心素养的水平划分 .....</b>	<b>168</b>

# 第十章 分子动理论

## 第一部分 整 章 分 析

### 学习目标

1. 了解分子动理论的基本观点及相关实验证据,进一步形成物质观念、运动与相互作用观念,能用分子动理论解释生活中的现象。
2. 能建构单分子油膜的模型,在估测油酸分子大小的实验中体会和掌握测量微观量的思想和方法。能恰当、合理地使用证据说明分子动理论的基本观点。在了解分子运动速率分布的统计规律过程中,初步学习运用概率统计分析热现象的方法。
3. 会做“用油膜法估测分子的大小”实验,理解用宏观手段测量微观分子大小的实验原理,能在实验中通过正确的操作减小误差,能写出完整的实验报告。
4. 在学习分子动理论的过程中,认识物理结论、物理观点的得出是基于事实并接受实践检验的。在用宏观手段测量微观物理量的实验中,感受合适、巧妙的方法对解决问题的重要性,提升学习物理的兴趣。

### 编写意图

课程标准中对本章的“内容要求”为:

3. 1. 1 通过实验,估测油酸分子的大小。了解分子动理论的基本观点及相关的实验证据。
3. 1. 2 通过实验,了解扩散现象。观察并能解释布朗运动。了解分子运动速率分布的统计规律,知道分子运动速率分布图像的物理意义。

本章主要讲述分子动理论的知识,并以此为基础讨论了热现象的本质,使学生对物质运动的认识从宏观领域深入到微观领域,从而使学生对物质世界的认识进一步深化。

学生在初中学过分子动理论的初步知识。与初中阶段相比,高中阶段的分子动理论,除了内容上有所增加,更强调了分子动理论的实验基础。针对看不见的微观物质微粒及其运动,本章从分子的大小和组成物质分子的数量两个角度出发,帮助学生建立“物体是由大量分子组成的”概念;以扩散、布朗运动、玻璃板与水相互作用等现象为证据,帮助学生认识“分子在做永不停息的无规则运动”“分子之间存在着相互作用”的基本观点;通过“伽尔顿板”实验,引导学生看到大量小球所表现出的规律,形成对统计规律的初步理解。

分子动理论是从微观角度、用统计方法研究热现象本质和规律的基础知识,是后续从微观角度理解气体性质以及气体、液体、固体微观结构的基础。

完成本章内容的学习,共需要 4 课时。其中,第一节 2 课时,第二节 1 课时,第三节 1 课时。

## 第二部分 本章教材解读

# 第十章 分子动理论

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

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

## 本节编写思路

本节通过分子大小的测量和利用阿伏加德罗常数进行的计算,形成“物体是由大量分子组成的”观点。具体分为三个层次:

- 用不断放大的叶子图片和通过扫描隧道显微镜观察到的结果,引导学生感受分子的“小”;

- 通过“学生实验”,引导学生利用宏观手段,估测出分子的直径,形成对分子大小的定量认识;

- 通过“自主活动”,引导学生理解宏观世界与微观世界间的桥梁——阿伏加德罗常数。

在“用油膜法估测油酸分子的大小”实验中,经历“估测”的过程,理解通过宏观量间接测量微观量的方法,感受“建模”在物理研究中的重要作用,养成仔细观察、认真操作的实验习惯,领略科学家利用宏观测量方法来探测微观世界的精妙思想方法。

### 第一节 分子的大小

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

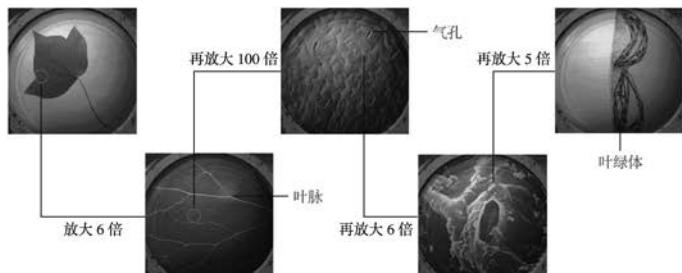


图 10-1 显微镜下不断被放大的叶子

#### ▶ 分子大小的测量

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

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

我们肉眼虽然看不见分子,但能通过实验估测分子的大小。

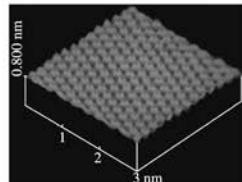


图 10-2 硅片表面原子排列图像



图 10-3 我国科学家移动硅原子“写”成的汉字

## 正文解读

[1] “用油膜法估测油酸分子的大小”是一个测量类学生实验。实验前，需要通过学生讨论、教师讲述，解决实验中的关键问题：

(1) 实验方案的形成。

可通过问题“怎样用量筒和直尺测量小钢珠(或小米、油菜籽等)的直径?”帮助学生建构单分子油膜模型，形成通过测量较大量来计算较小量的间接测量方案。

(2) 如何形成单分子油膜？

主要通过教师讲述，逐步解决以下问题：

- ① 为什么用油酸？
- ② 为什么用稀释的油酸？
- ③ 为什么用酒精稀释油酸？

(3) 物理量的测量。

可通过讨论解决以下问题：

- ① 如何测量体积？
- ② 如何测量不规则油膜的面积？

### [1] 学生实验

#### 用油膜法估测油酸分子的大小

##### 提出问题

如何估测出分子的大小？

##### 实验原理与方案

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

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

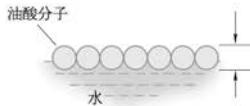


图 10-4 油酸单分子薄膜

##### 实验装置与方法

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

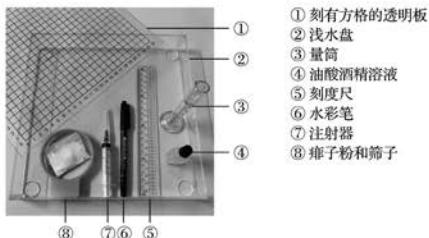


图 10-5 实验器材

#### 助一臂

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

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

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

**实验操作与数据收集**

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

**数据分析**

一滴油酸酒精溶液中含有油酸的体积：

$$V = \underline{\hspace{2cm}}$$

单分子油膜的面积：

$$S = \underline{\hspace{2cm}}$$

**实验结论**

$$\text{油酸分子的直径 } d = \frac{V}{S} = \underline{\hspace{2cm}}$$

**[1] 交流与讨论**

- (1) 各组测得的分子大小一样吗？
- (2) 如何提高测量结果的精确程度？

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

**拓展视野**

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

**▶ 物质的量 阿伏加德罗常数**

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

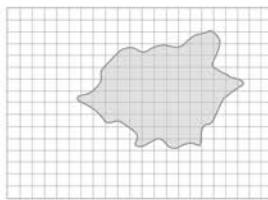


图 10-6 水面上形成的油膜

**[1] 实验后设置**

“交流与讨论”，其目的如下：

问题(1)：通过比较各组的测量值，引导学生理解用宏观手段测量得到的分子直径是一个估测值，需要关注的是它的数量级。

问题(2)：引导学生回顾实验过程，思考影响测量结果的因素和操作，通过反思，学会分析及减小误差的方法。

[1] 此处设置“自主活动”,要求学生利用宏观量(摩尔体积)与微观量(分子大小)之间的关系,估算出阿伏加德罗常数,加深对阿伏加德罗常数物理意义的理解。

### 拓展视野

1811年,意大利化学家阿伏加德罗率先提出:在等温等压的条件下,相同体积的任何气体都含有相同的分子数。后来人们就把标准状态(0℃,1个标准大气压\*)下体积为 $2.24 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 的气体所含的分子数称为“阿伏加德罗常数”。2018年国际计量大会第26次会议将摩尔的定义修改为:“1 mol 包含  $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$  个基本单元,这一常数被称为阿伏加德罗常数,单位为  $\text{mol}^{-1}$ ”。

## 问题与思考解读

### 1. 参考解答: $5 \text{ m}^2$

1滴纯油酸的体积  $V =$

$$\frac{1}{200} \text{ mL} = 5 \times 10^{-9} \text{ m}^3,$$

油膜厚度  $d = 1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$ , 油膜面积

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

**命题意图:** 进一步理解用油膜法估测分子大小实验的原理,感受物体所包含分子数量的巨大。

**主要素养与水平:**模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

### 2. 参考解答: 一个该金属原子的质量

$$m_0 = \frac{M}{N_A}, \text{ 其平均占有}$$

$$\text{的体积 } V_0 = \frac{M}{\rho N_A}$$

**命题意图:** 明确阿伏加德罗常数与宏观量、微观量之间的关系。

**主要素养与水平:** 物质观念(Ⅱ)。

**3. 参考解答:**  $2 \times 10^{25}$  个 这杯水的体积  $V$ 、水的密度  $\rho$ 、摩尔质量  $M$ 、阿伏加德罗常数  $N_A$  均为已知量。水的质量  $m = \rho V$ ,杯中水的物质的量为  $\frac{m}{M}$ ,水分子的个数即为  $\frac{\rho V}{M} N_A$

**命题意图:** 应用阿伏加德罗常数解决实际情境中的问题。

**主要素养与水平:** 物质观念(Ⅱ);模型建构(Ⅱ)。

**4. 参考解答:**  $5 \times 10^{-4} \text{ kg}, 1 \times 10^{22}$  个 已知空气的密度约为  $1.29 \text{ kg/m}^3$ ,根据  $m = \rho V$  即可求出所吸

### 自主活动

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

阿伏加德罗常数是一个基本常量,它将宏观意义上物质的量与微观意义上的粒子数联系起来,成为宏观世界与微观世界之间的重要桥梁。物理学家们提出各种方法来测定阿伏加德罗常数,一百多年以来,测量的精度不断提高,目前通常取  $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。

### 问题与思考

1. 在“用油膜法估测油酸分子的大小”实验中,用注射器在水面上滴一滴酒精油酸溶液形成单分子油酸层。如果用纯油酸来做实验,估测要形成一层单分子油膜,油膜的面积会有多大?(已知注射器滴满 1 mL 溶液的滴数为 200,油酸分子的直径约为 1 nm)
2. 设某金属的密度为  $\rho$ 、摩尔质量为  $M$ 、阿伏加德罗常数为  $N_A$ 。试问 1 个该金属原子的质量及其平均占有的体积分别是多少?
3. 试估算在常温常压下一杯体积为  $6.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  的水中约有多少个水分子。
4. 已知空气的平均摩尔质量  $M = 2.9 \times 10^{-2} \text{ kg/mol}$ 。某同学做一次深呼吸大约吸入  $4 \times 10^2 \text{ cm}^3$  的空气。那么一次深呼吸吸入空气的质量约为多少千克? 大约吸入多少个空气分子?

\*1 个标准大气压约等于  $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

入空气的质量  $m$ ; 吸入空气的分子个数为  $\frac{m}{M}N_A$

**命题意图:** 应用阿伏加德罗常数解决实际情境中的问题,感受组成物体分子的“小”与“大量”。

**主要素养与水平:** 物质观念(Ⅱ); 科学推理(Ⅱ)。

## 资料链接

### 扫描隧道显微镜

人类一直希望能“观察入微”。人眼所能分辨的最小尺度约为  $10^{-4}$  m。由于受到光的衍射影响,光学显微镜的分辨极限约为  $10^{-7}$  m, 相当于放大  $1500\sim 2000$  倍; 扫描电子显微镜的分辨率约为  $10^{-9}$  m。

扫描隧道显微镜(STM)的发明,使人类可以在纳米尺度上实时观察单个原子在物质表面的排列。在平行于样品表面方向上,它的横向分辨率可达  $0.1$  nm, 纵向分辨率可达  $0.01$  nm。它可以实现对原子和分子的移动和操作,为纳米科技的全面发展奠定了基础。

根据经典物理学,如果两个导体间有绝缘体,在导体上加一定的电压,电子是不能穿透绝缘体从而形成电流的,也就是导体间存在势垒。而按照量子力学,如果势垒厚度小到只有  $10^{-10}$  m 时,电子可以穿过,形成电流。这种现象叫做隧道效应,形成的电流称为隧道电流。

扫描隧道显微镜的基本原理是将原子线度的极细探针和被研究物质的表面作为两个电极,当样品表面与针尖的距离非常小(通常小于  $1$  nm)时,在外加电场的作用下会形成隧道电流。针尖和样品表面距离每减小  $0.1$  nm,隧道电流就会增加约 1 个数量级。因此,当针尖相对样品表面移动扫描时,根据隧道电流的变化,即可得到样品表面结构的信息。

## 本节编写思路

在了解分子大小以及物体由大量分子组成的基础上,本节主要介绍“分子在做永不停息的无规则运动”和“分子之间存在着相互作用”的观点,最终提出分子动理论。

本节以实验事实、宏观现象等为证据来提出观点。以扩散现象、布朗运动等为证据,说明分子在做无规则运动;以“粘”在一起的铅块等实验现象为证据,说明分子间存在引力和斥力。

通过本节学习,完善对物质的认识,进一步形成物质观念。经历以事实为证据形成理论的过程,知道物理理论都应接受实践的检验。

## 正文解读

[1] 通过演示实验了解扩散现象,并结合日常生活中的现象加深对扩散现象的理解。

## 第二节 分子的运动 分子间的相互作用

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

要解释这些现象,我们需要了解分子的运动以及分子间的相互作用规律。

### ▶ 分子的运动

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

[1]

#### • 扩散现象

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

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

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

#### • 布朗运动

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

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



图10-7 “粘”在一起的铅块



图10-8 扩散现象

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

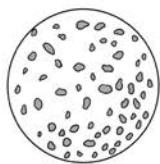


图 10-9 显微镜下的悬浮颗粒

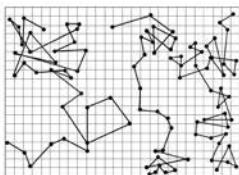


图 10-10 布朗运动

**大家谈**

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

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

悬浮在液体中的颗粒周围布满了大量的液体分子，颗粒的布朗运动应该是由液体分子的撞击造成的。图 10-11 描绘了颗粒受到周围液体分子撞击的情景。当颗粒足够小时，它受到的来自各个方向的液体分子的撞击作用是不平衡的。在周围分子无规则的撞击下，颗粒运动的方向频繁地发生变化。颗粒越小，在某一瞬间与它相撞的分子数越少，撞击作用的不平衡性就表现得越明显，因而布朗运动越明显。颗粒杂乱无章的运动，说明液体分子对颗粒的撞击是随机的。布朗运动的无规则性，反映了液体内部分子运动的无规则性。在图 10-8 所示的红墨水扩散过程中，起主要作用的就是在水分子的碰撞下墨水颗粒所做的布朗运动。

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

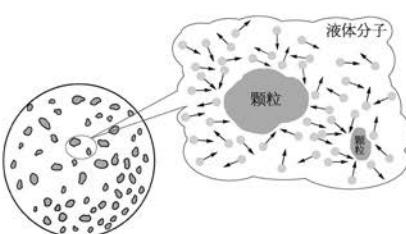


图 10-11 颗粒受到液体分子的撞击

做无规则运动。因为在组成介质的分子都做无规则运动的情况下，在任意一个很短的时间间隔内，介质分子从不同方向撞击细微颗粒的强度不同，颗粒在不同方向受到的冲击作用不同，于是向着受到作用大的方向运动。颗粒的无规则运动与介质分子的无规则运动，互为表里。

(4) 只有较小的颗粒(大约微米数量级)才能呈现布朗运动。

[1] 描绘颗粒做布朗运动的路线，得到的是不规则折线。这个折线并不是颗粒运动的实际轨迹，而是每隔一定时间，在坐标纸上记录一次某颗粒的位置，然后依据时间的先后顺序，依次连接这些位置而获得的一种实验图线。

[2] 此处设置“大家谈”旨在帮助学生明确：

(1) 观察到的做无规则运动的细微颗粒并不是分子。这些颗粒都是由大量分子组成的，要比分子大很多倍。

(2) 布朗运动并不是分子的运动，而是由大量做热运动的液体分子不均匀撞击颗粒引起的。实际上，布朗运动的速率数量级约为  $10^{-4}$  m/s，而液体分子热运动的平均速率约为  $10^2 \sim 10^3$  m/s。

(3) 细微颗粒的无规则运动——布朗运动，间接证明了分子在

## ▶ 分子间的相互作用

## 自主活动

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

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

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

分子间同时还存在着引力。如图10-12所示，用吸盘、细线将一块洗净的玻璃板水平地悬挂在弹簧测力计下端，并使玻璃板贴在水面上；然后缓慢提起弹簧测力计，在玻璃板脱离水面的一瞬间，弹簧测力计的示数明显大于玻璃板的重力。这是因为在玻璃板离开水面的瞬间，弹簧测力计对玻璃板的拉力不仅要克服玻璃板的重力，还要克服水分子对玻璃

[1] 在做两个铅块压紧后能连在一起的实验时，应事先去除准备连接的铅块表面的氧化层，如在铅块表面用锉刀沿一个方向锉，然后把这两个铅块一边沿锉纹推进，一边用力挤压，最终使它们连接成一个整体。通过实验操作还可以帮助学生丰富以下知识：分子间的作用力是一种短程力，只有在相互间隔距离很短的范围内才有作用，当分子间距离超过分子直径10倍时，它们间的相互作用力基本上减弱为零了。

[1] 板下表面分子的引力作用。图10-7中两个相互压紧的铅块之所以不会分开，甚至下面挂很重的钩码也不能把它们分开，也是因为铅分子之间的引力将两铅块“粘”在了一起。

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

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

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

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

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

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



图10-12 玻璃片脱离水面

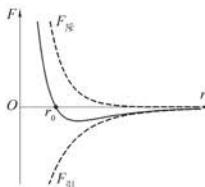


图10-13 分子间作用力

## 问题与思考解读

### 拓展视野

分子间为什么同时存在引力和斥力呢?

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

### ▶ 分子动理论的基本观点

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

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

### 问题与思考

- 滴入水中的红墨水会扩散,其原因是什么?温度越高,这种扩散越快,说明了什么?
- 判断以下现象是否由于分子间的引力所致,并简述理由。
  - 两块纯净铅柱的端面刮得十分平整后用力挤压可以“粘”在一起。
  - 经丝绸摩擦过的玻璃棒能吸引轻小物体。
  - 磁铁能吸引小铁钉。
  - 自由落体运动。
- 关于图10-10中的折线,甲同学说是花粉颗粒运动的轨迹,乙同学说是液体分子的无规则运动轨迹。试对此作出简要评述。
- 简述布朗运动的特点,并给出“液体分子的热运动导致布朗运动”的证据。
- 已知两个分子之间的距离为 $r_0$ (约 $10^{-10}$ m)时,分子间的作用力为零。两个分子从很远处逐渐靠近直到分子间距离小于 $r_0$ 的过程中,分子间的引力、斥力及其合力如何变化?

是分子间引力所致,而是铁钉被磁化后成为磁体,受到磁铁的磁场所作用  
是地球对物体的重力所致

**命题意图:**理解分子间相互作用力的宏观证据,区分各种相互作用产生的原因,完善相互作用的观念。

**主要素养与水平:**运动与相互作用(Ⅱ)。

**3. 参考解答:**甲、乙两位同学的说法都不正确。该折线是花粉颗粒在液体分子撞击下的不同时刻所在位置的连线,所以既不是分子的运动轨迹,也不是花粉颗粒的运动轨迹。

**命题意图:**明确布朗运动并不是分子运动。

**主要素养与水平:**科学论证(Ⅱ);质疑创新(Ⅰ)。

**1. 参考解答:**因为水分子在运动,撞击墨水颗粒,导致墨水颗粒扩散。温度越高,扩散越快,说明了温度越高水分子运动得越快。

**命题意图:**理解扩散现象是分子运动的宏观证据。

**主要素养与水平:**物质观念(Ⅱ);科学论证(Ⅰ)。

**2. 参考解答:**(1)是分子间引力所致,刮干净的铅面挤压在一起,分子和分子之间距离很近,分子间的引力使两块铅柱“粘”在一起。(2)不是分子间引力所致,而是摩擦后的玻璃棒作为带电体,使轻小物体靠近玻璃棒的一端出现异种电荷,另一端出现等量的同种电荷。因为用丝绸摩擦过的玻璃棒对较近的负电荷的吸引力大于对较远的正电荷的排斥力,所以会吸引轻小物体。(3)不

(4)不是分子间引力所致,而

**4. 参考解答：**悬浮颗粒在液体中做无规则运动，长时间不会停止，颗粒越小运动越明显，温度越高运动越剧烈。依据是：① 在排除外界影响如震动、对流等因素的影响后，布朗运动依然存在，并且绝不会停止，因此布朗运动并不是由外界造成的，而是由颗粒所在的周围液体造成的。② 液体是由许多分子组成的。颗粒被大量液体分子包围着，周围液体分子对它作用力的合力使它不断改变运动状态。③ 颗粒越小，某一瞬间与它撞击的液体分子数越少，撞击的不平衡性就表现得越明显，因而布朗运动越明显

**命题意图：**理解布朗运动是分子运动的证据，完善运动与相互作用的观念，培养证据意识。

**主要素养与水平：**科学论证（Ⅱ）。

**5. 参考解答：**引力、斥力都逐渐增大。距离逐渐减小，从远大于  $r_0$  到等于  $r_0$  的过程中，相互作用力即合力先表现为引力，随着距离的减小，合力先增大后减小；小于  $r_0$  以后，合力表现为斥力，并随着距离的减小而逐渐增大

**命题意图：**巩固对分子间相互作用随间距变化这一特点的认识，完善相互作用的观念。

**主要素养与水平：**运动与相互作用（Ⅲ）。

## 本节编写思路

热现象是物质中大量分子无规则运动的集体表现。在学习了“分子动理论”之后，了解分子运动速率分布的统计规律有助于进一步研究热现象。

本节先以“伽尔顿板”的演示实验引出统计规律，然后借助氧分子速率分布的实验数据，在绘制直方图的基础上引出麦克斯韦气体分子运动速率分布规律。

通过本节学习，知道分子运动速率分布图像的物理意义，初步认识统计规律是大量偶然事件整体所遵循的规律。

## 正文解读

[1] “伽尔顿板”实验的结果表明，大量小球落下时，落入某个槽中的小球的数目具有相对确定的值，这意味着

### 第三节 分子运动速率分布的统计规律

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

#### [1] ▶ “伽尔顿板”实验的启示

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

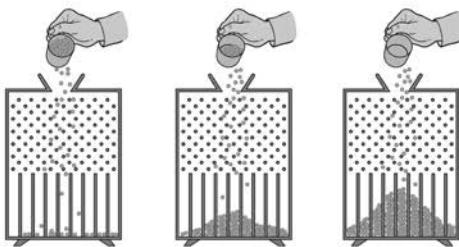


图 10-14 “伽尔顿板”实验

这种大量随机事件的整体表现所显示的规律性叫做统计规律。

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

#### ▶ 分子速率分布的统计规律

对气体的大量实验表明，所有分子速率的分布符合一定的统计规律。

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

尽管单个小球落入某个槽的概率是确定的，但具体哪个时刻落入哪个槽是不确定的，只有大量小球落入槽中稳定后，才有确定的分布。或者说，对由大量微观粒子组成的系统的宏观性质和规律而言，统计规律起主导作用。由此可知，统计规律与力学的决定性规律有着明显的差别：统计规律对大量偶然事件整体起作用，力学规律对单个事件起作用，统计规律并不是力学规律的简单叠加。另一方面，多次使很多小球一起下落时，落入下半部分各小槽中的小球数分布基本保持不变，而不是绝对相同。这说明在统计规律起主导作用的情况下，单个的偶然事件相对统计规律仍会有涨落。

表 10-1 0℃ 和 100℃ 时氧分子的速率分布

分子速率 $v / (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	各速率区间的分子数占分子总数的百分率/%	
	0℃	100℃
100 以下	1.4	0.7
100~200	8.1	5.4
200~300	17.0	11.9
300~400	21.4	17.4
400~500	20.4	18.6
500~600	15.1	16.7
600~700	9.2	12.9
700~800	4.5	7.9
800~900	2.0	4.6
900 以上	0.9	3.9

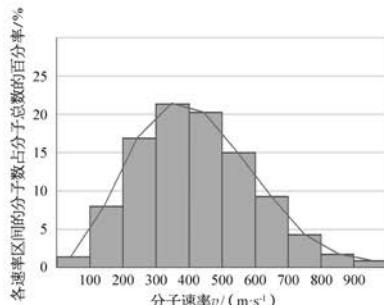


图 10-15 0℃ 时氧分子在各速率区间分布的直方图

[1] 此处设置“自主活动”，要求学生模仿绘制 100℃ 时氧分子在各速率区间速率分布的直方图，从而理解统计分布的规律，感受不同温度下速率分布的不同。

### 1 自主活动

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

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

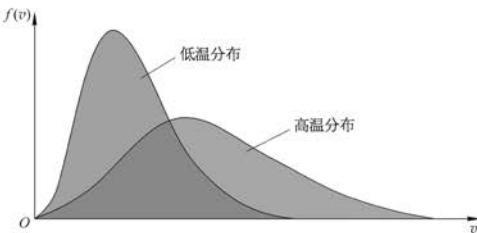


图 10-16 麦克斯韦气体分子速率分布曲线

这个规律指出：一般而言，气体分子的速率各不相同，但大多数分子的速率都在某个数值（峰值）附近，离开这个数值越远，分子数越少，呈现出“中间多，两头少”的分布。

特征；温度升高，曲线的峰值会向速率大的方向移动，速率的分布范围增大，整个曲线将变得较为平坦。

[1]

**大家谈**

图 10-16 中的高温和低温时速率分布曲线下的面积是否相等，为什么？

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

**拓展视野**

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

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

**问题与思考**

- 判断以下关于分子速率的观点是否正确，并简述理由。
  - 当温度升高时，组成物体的每个分子的速率都会增大。
  - 甲、乙两杯水，甲杯水的温度为 70℃，乙杯水的温度为 30℃，那么甲杯水内的每个水分子的速率都比乙杯水内每个水分子的速率大。
- 在温度为 25℃ 的环境中，有一个导热良好的密闭容器内封有一定量的氮气。简述容器中氮气分子的速率分布情况。若将该容器放入冰箱冷藏室后，氮气分子的速率分布如何变化？
- 在日常生活中，很多现象都遵循统计规律。根据本年级所有同学的身高数据，分别作出本班男生（或女生）和全年级男生（或女生）身高的分布曲线，观察并比较两个曲线的形状；了解人数占比最多的身高区间。

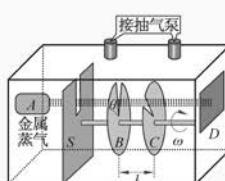


图 10-17 密勒和库士的实验装置示意图

区间内的分子数最多，离这个速率越远的速率区间内分子数越少。放入冷藏室内后，氮气分子的速率依然从小到大都有，但是速率分布会集中在较小的区域，分子数最多的区间转移到一个较小的速率附近，离这个速率越远的速率区间内分子数依然较少。

**命题意图：**在具体的情境中应用分子速率分布的统计规律描述气体及其变化。

**主要素养与水平：**运动与相互作用（Ⅱ）。

**3. 参考解答：**略

**命题意图：**研究生活现象中的统计规律，经历调查、搜集资料、处理数据等研究过程，并与同学交流。

**主要素养与水平：**证据（Ⅱ）；交流（Ⅰ）；科学态度（Ⅱ）。

[1] 此处设置“大家谈”，是为了帮助学生进一步理解麦克斯韦气体分子速率分布曲线中纵坐标的含义，即  $v \sim v + \Delta v$  间隔内的分子数占总分子数的百分率。曲线下的总面积表示整个速率间隔（ $0 \sim \infty$ ）的分子数占总分子数的百分率，所以数值等于 1。

**问题与思考解读**

**1. 参考解答：**这两种说法都是错误的。

任何温度下，组成物体的分子都有从小到大各种速率。温度升高时，占比最多的分子对应的速率更大一些。

**命题意图：**理解分子速率分布的统计规律。

**主要素养与水平：**运动与相互作用（Ⅱ）；科学论证（Ⅱ）。

**2. 参考解答：**氮气分子都在做无规则运动，速率从小到大都有，但某个速率附近的速率

## 资料链接

### 麦克斯韦分子速率分布

以气体为例,组成气体的每一个分子的运动速度的大小和方向都是偶然的、随机的,但从宏观整体的角度来看,由大量分子组成的气体都有一定的压强和温度。这表明这些大量偶然事件有一定的分布规律,这种微观上的千变万化、完全偶然,而宏观上具有一定规律的现象称为统计规律性。平衡态下热力学系统的粒子按速率分布的规律是麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1879)在1859年应用统计概念首先导出的。

#### (1) 麦克斯韦速率分布

设在平衡状态下,某气体的分子总数为 $N$ ,速率在 $v \sim v + \Delta v$ 间隔内的分子数为 $\Delta N$ ,则在速率 $v$ 附近单位速率间隔内,气体分子数与分子总数的比 $f(v) = \frac{\Delta N}{N \Delta v}$ ;对单个分子来说,它表示分子具有的速率在该单位速率间隔内的概率。麦克斯韦经过理论研究指出,在平衡状态下,气体分子速率分布函数的具体形式是:

$$f(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2$$

式中 $m$ 为一个分子的质量, $k$ 为玻尔兹曼常数, $T$ 为热力学温度。

表示速率分布函数的曲线叫做麦克斯韦速率分布曲线,如图1所示。从图1中可以看出,深色的小矩形的面积为 $f(v)\Delta v = \frac{\Delta N}{N}$ ,表示某分子的速率在间隔 $v \sim v + \Delta v$ 内的概率,也表示在该间隔内的分子数与总分子数的比。在不同的间隔内,有不同面积的小矩形,说明不同间隔内的分布不相同,面积较大表示分子具有该间隔内的速率的概率也较大。当 $\Delta v$ 足够小时,无数个矩形的面积总和将趋近于曲线下方的面积,这个面积表示分子在整个速率间隔的概率的总和,按归一化条件,应等于1。

从速率分布曲线还可以知道,具有很大速率或很小速率的分子数较少,其所占的比例较小,而具有中等速率的分子数很多,其所占的比例很大。曲线上有一个最大值,与这个最大值对应的速率 $v_p$ 叫做最概然速率。它的物理意义是:在一定温度下,速率与 $v_p$ 相近的单位速率间隔内的气体分子所占的比例最大,也就是以相同速率间隔来说,气体分子中速率在 $v_p$ 附近的概率最大。温度升高时,气体分子的速率普遍增大,最概然速率 $v_p$ 也相应增大,但因曲线下方的总面积是不变的,因此分布曲线在宽度增大的同时高度降低,整个曲线将变得“较平坦些”。

#### (2) 分子速率的三个统计值

根据麦克斯韦速率分布律,可推算出处于热平衡态的热力学系统中的微观粒子的三个统计值:

$$\text{最概然速率: } v_p = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

$$\text{平均速率: } \bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

$$\text{方均根速率: } \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

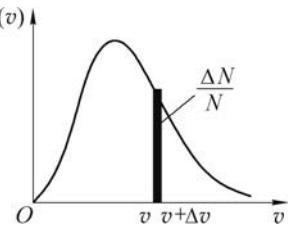


图 1

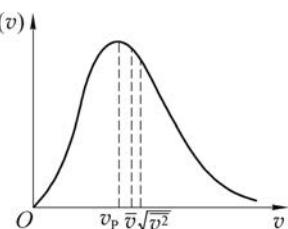


图 2

图2显示了在速率分布曲线上的三个统计值。当温度升高时,三个速率的统计值都随之增大。这三种速率在不同问题中有着各自的应用。在讨论速率分布时,要用到大量分子的最概然速率 $v_p$ ;计算分子运动的平均自由程时,要用到平均速率 $\bar{v}$ ;计算分子的平均平动动能时,就要用方均根速率 $\sqrt{\bar{v}^2}$ 。

## 小结

### · 基本概念和基本规律

**布朗运动：**悬浮颗粒在液体或气体中的无规则运动。

**分子热运动：**组成物质的分子永不停息的无规则运动，温度越高这种运动越剧烈。

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

### · 基本方法

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

在学习分子动理论的过程中，感受利用证据通过科学推理进行科学论证的方法。

在学习分子速率分布的统计规律的过程中，认识统计方法在物理学中的应用。

### · 知识结构图



## 问题与思考解读

14 第十章 分子动理论

### 1. 参考解答: (2)

(3)(4)可以作为分子热运动的证据。水的对流是因为水受热后上下密度分布不均,由重力导致的运动。墨水颗粒散开和花粉颗粒的布朗运动,都是因为它们受到周围无规则运动的水分子不断撞击而导致的运动;酒精分子也是因为受到周围无规则运动的空气分子的撞击而很快被人嗅到。

**命题意图:**认识各种运动现象的原因,加深对运动与相互作用观念的理解。

**主要素养与水平:**物质(Ⅱ);运动与相互作用(Ⅱ)。

**2. 参考解答:**不能。温度与组成物体的大量分子无规则运动的剧烈程度相关,是一个宏观量,具有统计意义。对微观角度的单个分子而言,速率时刻在变,不存在温度这个物理量。

**命题意图:**知道温度是大量分子热运动的宏观表征,理解统计的思想方法。

**主要素养与水平:**物质(Ⅱ);运动与相互作用(Ⅱ)。

**3. 参考解答:**曲线Ⅱ对应的温度相对较高。**相同点:**两个温度对应的分子速率多数都在某一个数值附近,离这个数值越远分子越少。**不同点:**温度高时峰值对应的速率较大,且峰值较小。

**命题意图:**认识麦克斯韦分子速率分布规律。

**主要素养与水平:**运动与相互作用(Ⅱ);科学推理(Ⅲ)。

**4. 参考解答:**这两种说法都是错的。相距 $r_1$ 时,分子间的斥力大于引力,作用力表现为斥力,并非只有斥力,所以甲同学说法错误。分子间的引力和斥力都随间距的增大而减小,因此相距 $r_2$ 时分子间的引力小于相距 $r_1$ 时分子间的引力,乙同学说法错误。

### 复习与巩固

1. 判断下列哪些宏观现象可以作为分子热运动的证据,简述理由。

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

2. 对于单个分子而言,能说它的温度有多高吗?为什么?

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

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

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

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

- (1) 这个实验中主要涉及哪些物理方法?  
(2) 某小组同学将最终得到的计算结果与其他小组比较,发现自己得到的数据比其他组大几百倍,他们猜测可能是由于以下原因所致,选择其中较为合理的猜测并简述理由。  
① 将油酸酒精溶液的体积直接当作油酸的体积计算。  
② 计算油膜面积时,只数了完整的方格数。  
③ 水面上痱子粉撒得太多,油膜没有充分展开。

7. 设想气体的每个分子都处在相同的一个小立方体的中心。

- (1) 试求标准状态下这些小立方体的边长。  
(2) 若取分子的直径为 $3.0 \times 10^{-10}$  m,试计算小立方体的边长与分子直径的比值。

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



图 10-18

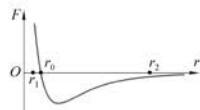


图 10-19

**命题意图：**通过辨析与评价，从不同角度理解分子间的相互作用力随距离的变化。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(Ⅱ)；论证(Ⅱ)。

**5. 参考解答：**约有  $10^{12}$  个分子。将颗粒和分子均看作立方体，边长分别为  $R$  和  $r$ ，根据  $R^3 = nr^3$  可算出  $n = 10^{12}$ ，即约有  $10^{12}$  个分子

**命题意图：**了解空气污染颗粒的本质，在真实情境中建立模型，感受分子的“小”与物质所含分子数量的“多”。

**主要素养与水平：**物质(Ⅱ)；模型建构(Ⅱ)；社会责任(Ⅱ)。

**6. 参考解答：**(1) 积累法、建立模型 (2) 较为合理的猜测是①。实验中用的油酸经酒精稀释后，一滴溶液中油酸含量只占总体积的几百分之一，将一滴溶液的体积当作其中油酸的体积进行计算，就会导致算出的油酸分子直径约为真实值的几百倍。②③两种操作也会导致计算结果偏大，但不会有几百倍的差异

**命题意图：**认识实验中用到的科学方法和思想。利用实验原理分析错误操作对实验结果的影响。

**主要素养与水平：**模型建构(Ⅱ)；证据(Ⅱ)；解释(Ⅲ)。

**7. 参考解答：**(1)  $3.34 \times 10^{-9}$  m (2) 10 标准状态下，1 mol 气体的体积为 22.4 L =  $22.4 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>，则每个分子所占立方体的体积为  $V_0 = \frac{22.4 \times 10^{-3}}{6.02 \times 10^{23}}$  m<sup>3</sup>  $\approx 3.72 \times 10^{-26}$  m<sup>3</sup>，边长为  $3.34 \times 10^{-9}$  m，约为分子直径的 10 倍

**命题意图：**在实际问题中建立分子模型，通过计算感受气体分子间较大的距离，完善对物质的认识。

**主要素养与水平：**模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

**\*8. 参考解答：**两种合理的解释：(1) 阀门打开后，速率较大的气体分子泄漏出去的可能性比速率较小的气体分子泄漏出去的可能性大一些，使容器内气体分子的平均速率减小，容器内气体分子运动剧烈程度下降，所以温度要降低一些。(2) 考虑到分子间的碰撞，在容器出口处，同时存在不同速率的分子。如果前面分子速率为  $v_1$ ，后面分子速率为  $v_2$ ，且  $v_1 < v_2$ ，分子将发生碰撞。把所有气体分子均视为刚性球，且做弹性对心正碰。碰撞的结果是两者交换速度，最后留在容器中的一定是速率较小的分子

**命题意图：**应用分子动理论解释真实问题，运用分析、推理的科学思维方法对现象做出解释。

**主要素养与水平：**模型建构(Ⅱ)；科学推理(Ⅲ)；解释(Ⅲ)。

## 第三部分 本章练习部分解读

### 第一节 分子的大小

**1.**  $4 \times 10^{-10}$   $2 \times 10^{-5}$  把油膜视为柱体，根据  $d = \frac{V}{S}$  即可求得该油剂分子直径；根据球体积的公式可求出一个分子的体积，又已知 1 mol 该油剂含  $6.02 \times 10^{23}$  个分子，即可求出总体积

**2. B** 油膜面积最大时即为单分子层油膜。已知质量和密度可求出该油剂的体积，取该油剂分子直径约为  $10^{-10}$  m，即可估算油膜最大面积

**3.** (1)  $m_0 = \frac{m}{N} = \frac{M}{N_A}$  (2) 这杯水中所含物质的量  $n = \frac{m}{M} = \frac{V}{V_m} = \frac{N}{N_A}$

**4. A** 同种物质，同一部分的质量和体积的比为该物质的密度。A 选项中  $m_0$  是一个分子的质量，而

$V_m$  是 1 mol 分子的体积, 所以错误

5. (1) 见下表

操作或要求	目的
用注射器将配置好的油酸酒精溶液一滴一滴地滴入量筒中, 记下 1 mL 油酸酒精溶液的滴数	通过测量 1 mL 溶液对应的滴数, 可以求出一滴溶液的体积
待浅水盘内的水静止后, 将痱子粉均匀地洒在水面上	清晰显示油膜的轮廓, 并使油膜汇拢成连续的一片
刻有方格的透明板放在浅水盘上, 用水彩笔描油膜形状时注意视线要与板面垂直	尽可能准确地描绘出油膜的轮廓

(2) ① 102 ②  $10^{-9}$  每格  $1 \text{ cm}^2$  的油膜所占正方形格子数约为 102 格, 可得油膜面积约为  $102 \text{ cm}^2$ ;

$$V = \frac{2}{1000} \times 1 \times 10^{-6} \times \frac{1}{200} \text{ m}^3 = 10^{-11} \text{ m}^3, d = \frac{V}{S} \approx 10^{-9} \text{ m}$$

## 第二节 分子的运动 分子间的相互作用

1. 扩散现象 布朗运动 热运动

2. BD 分子直径在  $10^{-10} \text{ m}$  左右, 在普通显微镜下看不到液体分子及其运动, 所以 A 错误。液体分子无规则运动, 使悬浮在液体中的颗粒在某时刻受到的撞击不平衡而改变运动状态。撞击的无规则导致颗粒运动的无规则, 因此颗粒的无规则运动反映了液体分子在做无规则运动。温度越高, 液体分子运动越剧烈, 对颗粒的撞击也越剧烈, 布朗运动就越显著, 所以 B、D 正确。颗粒越小, 某时刻与它撞击的液体分子数越少, 撞击作用的不平衡性就越明显, 同时, 质量越小的颗粒的运动状态越易被改变, 运动越明显, 所以 C 错误

3. C  $\text{PM}_{2.5}$  受空气分子撞击而运动, 属于布朗运动; 气温越高, 空气分子运动越剧烈, 导致  $\text{PM}_{2.5}$  运动越剧烈, 所以 A、B 正确, C 不正确。低碳生活可以减少化石燃料的燃烧, 减少  $\text{PM}_{2.5}$  的释放, 所以 D 正确

4. D 当分子间距离  $r > r_0$  时, 随着距离增大, 分子间引力、斥力都减小, 但斥力减小得更快, 它们的合力即分子间作用力先增大后减小。因此只有 D 正确

5. C 根据教材图 10-13, 在两分子间的距离由很远 ( $r > 10^{-9} \text{ m}$ ) 变到很难再靠近的过程中, 分子间作用力的大小先增大后减小, 在平衡位置时, 作用力为零, 之后随着距离减小再增大。所以 C 正确

6. C 玻璃板在水面下受到重力、拉力和浮力的作用, 弹簧测力计示数小于重力; 玻璃板完全出水面后, 受到重力和拉力作用, 弹簧测力计示数等于重力; 在玻璃板离开水面的较短时间内, 由于水分子对玻璃板下表面分子的吸引力, 使得弹簧测力计示数大于重力。所以 C 正确

7. 见下表

宏观现象	主要微观原因
水很难被压缩	分子间存在斥力
气体总是很容易充满容器	分子在做无规则运动; 分子间作用力小
用力拉铁棒的两端, 铁棒没有断	分子间存在引力

(续表)

宏观现象	主要微观原因
将光滑的铅块与铁块紧压在一起,几年后把它们分开,发现铅块中含有铁、铁块中含有铅	分子在做无规则运动
酒精和水混合后的总体积小于原来酒精和水的体积之和	分子间存在间隙
白砂糖在热水中溶解得更快	温度越高,分子热运动越剧烈

### 第三节 分子运动速率分布的统计规律

1. D “伽尔顿板”实验显示的规律是:单个小球落在哪个槽内是随机的,大量小球在槽内的分布是有规律的,越接近漏斗入口处的槽内小球聚集越多。所以 D 正确
2. BCD 大量分子组成的系统中,个别分子的运动无规律可言,每个分子的运动也都不相同,但大量分子的热运动符合一定的统计规律。因此 B、C、D 正确
3. 随机 统计 增大
4. D 由图像可看出曲线Ⅱ对应的分子速率分布广,由此可确定曲线Ⅱ对应的温度高,温度越高,分子的平均速率越大,所以 D 正确

## 第四部分 本章实验与活动部分解读

### 1. 学生实验 用油膜法估测油酸分子的大小

(1) 收集其他小组的实验结果,分析判断本小组估测结果的合理性。

**参考解答:** 学生实验的估测结果一般为  $10^{-9}$  m,与油酸分子大小的公认值接近。判断合理性的依据:一是油酸分子的实际大小,二是其他小组的实验结果

**命题意图:** 学习判断实验结果合理性的方法,体会科学测量需要大量重复实验才能得到可靠结果。

(2) 实验中哪些不当操作可能导致估测结果出现较大偏差?为本实验列出一份操作注意事项。

**参考解答:** ①油酸酒精溶液放置时间太久,酒精挥发使溶液浓度增大,导致估测结果偏小;②痱子粉撒得太厚,阻碍了油酸的扩散,油膜中的分子层数较多,导致估测结果偏大;③其他合理的说法均可,如测每滴油酸体积时,每次滴出的油酸体积不同等。

操作注意事项主要有:①实验前,应密封保存油酸酒精溶液;②测量一滴油酸酒精溶液的体积时,应使注射器处于竖直状态,缓慢稳定推动注射器活塞;③在水面上撒痱子粉时,应轻拍网筛并不断改变位置,使痱子粉均匀轻薄撒于水面;④向水面滴油酸酒精溶液时,应使注射器处于竖直状态,且针头靠近水面

**命题意图:** 反思实验操作过程,分析可能造成实验误差的原因,并设法减小误差。

### 2. 自主活动 观察酒精与水混合后的总体积变化

如何用分子间存在间隙来解释液面的变化?

**参考解答:** 酒精和水的分子间有间隙,两者混合后,乙醇分子和水分子会占据彼此的间隙,因此总体积减小,液面下降

**命题意图:** 合理运用已有证据,通过清晰严密的推理来论证观点。

# 第十一章 气体、液体和固体

## 第一部分 整 章 分 析

### 学习目标

1. 了解气体实验定律、理想气体模型,能解释气体压强和气体实验定律。了解液体表面张力和毛细现象、固体的微观结构以及晶体和非晶体的特点,并能正确识别生活中的晶体和非晶体。了解液晶、新材料的初步知识及其应用的实例。完善物质、运动与相互作用等物理观念。
2. 认识建构理想气体模型的必要性。能在一定条件下应用理想气体模型分析和研究实际气体的问题,能用等温、等压、等容的理想过程正确认识和分析现实生活中的气体状态变化。用微观结构解释宏观性质与特征,形成多视角观察和分析物理问题的能力。
3. 会做“探究等温情况下,一定质量气体压强与体积的关系”实验,能在实验中通过正确的操作减小误差,正确处理实验数据并做出解释,能写出完整的实验报告。知道研究等容、等压变化规律的实验。能通过实验观察并描述固体、液体的宏观特征。
4. 了解材料科学技术的发展对人类生活和社会进步的影响,激发学习兴趣,拓展学习视野。

### 编写意图

课程标准中对本章的内容要求为:

3. 1. 3 了解固体的微观结构。知道晶体和非晶体的特点。能列举生活中的晶体和非晶体。通过实例,了解液晶的主要性质及其在显示技术中的应用。
3. 1. 4 了解材料科学的有关知识及应用,体会它们的发展对人类生活和社会发展的影响。
3. 1. 5 观察液体的表面张力现象。了解表面张力产生的原因。知道毛细现象。
3. 1. 6 通过实验,了解气体实验定律。知道理想气体模型。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。

本章以分子动理论为基础,认识物质的宏观特征和规律,并寻求其微观机制,使学生能够从不同层次认识物质的存在形式、变化规律等。

本章第一节、第二节、第三节主要介绍气体的状态参量——压强、体积、温度,以及通过实验获得的气体状态变化时所遵循的规律,同时还介绍这些物理概念及规律的微观解释。第四节介绍了液体的表面张力、浸润和不浸润及毛细现象。第五节讲述晶体、非晶体和晶体的空间点阵,最后简单介绍了液晶。第六节主要介绍了半导体和纳米材料。本章的学习强调在微观结构与宏观特性之间建立联系,帮助学生领会到:由于分子组合或存在方式不同,会呈现丰富多彩的物理规律和现象,需用不同的方法和物理量来探究和描述这些规律和现象。

本章教材中前三节有简单的定量计算,后三节主要为定性的讲述。各节内容都是从实验入手,通过观察、思考得出结论,再用分子动理论的观点进行解释。因此,在教学中应注意培养学生的实验观察能力和抽象思维能力。此外,本章内容与生产生活实际联系紧密,教学中也应该注意培养学生应用知识研究实际问题的能力。

完成本章内容的学习共需要 8 课时。其中,第一节 1 课时,第二节 2 课时,第三节 2 课时,第四节 1 课时,第五节 1 课时,第六节 1 课时。

## 第二部分 本章教材解读

# 第十一章 气体、液体和固体

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

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

## 本节编写思路

本节内容通过与力学中建立相关物理量来描述物体机械运动的状态相类比，引出描述气体宏观状态也需要建立相应的物理量。

在学生已有认知的基础上，主要通过教师讲述的方式介绍体积和温度。用演示实验来模拟气体压强，帮助学生从分子动理论的角度来理解压强。最后明确相关概念：状态参量、平衡状态、状态变化。

通过本节课的学习，学生可以体会到研究视角的变化：上一章学习是从微观的角度研究物质、运动和相互作用；这一章学习将主要从宏观的角度研究气体、液体、固体的性质，同时从微观角度用分子动理论来解释这些宏观现象。

关于研究热学的宏观与微观两种方法，请见本节“资料链接”。

### 第一节 气体的状态

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

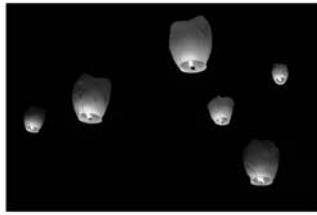


图 11-1 孔明灯



图 11-2 热气球

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

#### ▶ 气体宏观状态的描述

#### 大家谈

对于一瓶封闭的气体，应该如何描述它的状态？

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

[1]

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

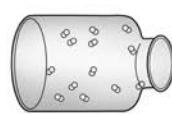


图 11-3 气体的体积

## 正文解读

[1] 要求学生理解气体的体积与固体、液体的体积有不同的特点。当温度一定时，固体所占空间的大小是不变的，但是一定量的气体所占的空间大小随容器容积的大小而改变，即无论容器有多大，在平衡时气体总是均匀地布满整个容器，所以气体的体积一般是指盛放气体的容器的容积。根据分子动理论可知，通常情况下，气体分子本身的体积与它所占空间体积相比不足  $\frac{1}{1000}$ ，因此认为气体分子本身的体积可忽略不计。

要使学生理解：气体的体积是指气体分子所能够到达的空间区域，而不是气体分子自身的体积。

[1] 在学生已有认知中,温度是反映物体冷热程度的物理量。这里要从分子动理论的观点来进一步理解温度概念:温度表示物体内部分子无规则运动的剧烈程度,这种无规则运动越剧烈则温度越高;温度是一个宏观量,对由大量分子构成的物体来说才存在温度这一概念,对单个分子、原子来说无温度可言。物体的温度可以用测温仪器来测定。

[2] 以表格的形式列举一些典型温度值,旨在帮助学生了解温度的尺度。

[3] 与体积、温度一样,气体的压强也是宏观量,也可用仪器直接测定。大量气体分子不断撞击器壁,使器壁受到了冲力,垂直作用在器壁单位面积上的平均冲击力,就是气体的压强。因此,气体压强的大小由气体分子的质量、单位体积内的分子数和分子的平均速率决定。对气体压强的微观解释是基于一些微观假设,如:把分子看成是弹性小球,分子与器壁间的相互作用是弹性碰撞,分子的无规则运动沿各个方向的机会相等,等等。

### [1] 气体的温度

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

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

$$T = t + 273.15 \approx t + 273$$

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

### [2]

表 11-1 一些典型的温度值

宇宙大爆炸后的 $10^{-43}$ s	$10^{32}$ K	月球向阳面	$4 \times 10^5$ K
氢弹爆炸中心	$10^8$ K	月球背阴面	90 K
太阳中心	$1.5 \times 10^7$ K	氮的液化点	77 K
太阳表面	$6 \times 10^3$ K	氦的液化点	4.2 K
地球中心	$4 \times 10^3$ K	宇宙微波背景辐射	2.7 K
乙炔焰	$3 \times 10^3$ K	实验室获得的最低温度	$10^{-11}$ K

### [3] 气体的压强

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

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

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

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



图 11-4 气体压强的模拟

强计来测量轮胎气压。实验室中，常用压强传感器来测量气体的压强。

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



图 11-5 指针式压强计测轮胎气压

### 问题与思考

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

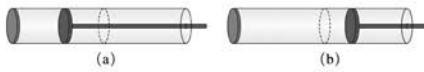


图 11-6

2. 一定质量的气体封闭在容器内，试比较以下两组物理量的大小。  
 (1) 气体的体积  $V_1$  与组成这些气体的所有分子的体积之和  $V_2$ 。  
 (2) 气体的质量  $m_1$  与组成这些气体的所有分子的质量之和  $m_2$ 。
3. 某气体的温度由  $-20^{\circ}\text{C}$  升高到  $27^{\circ}\text{C}$ 。试用热力学温度表示该气体的初、末温度和温度的变化量。
4. 用分子动理论、动量定理和统计观点解释气体压强。
5. 测气体压强时，汞压强计竖直放置，三次测量分别如图 11-7 (a)、(b)、(c) 所示。设汞的密度为  $\rho$ ，图中  $p_0$  为大气压强， $h$  为两臂汞面的高度差，则容器中气体的压强  $p$  分别为多少？

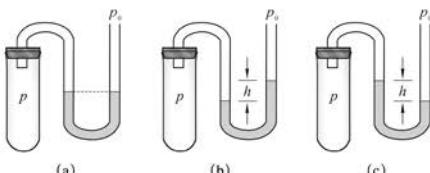


图 11-7

(b) 中，左端橡皮膜向玻璃管外部凸起，管内气体体积变小、压强增大

**命题意图：**巩固对气体状态参量的理解。从橡皮膜的形变推理分析封闭气体压强的变化。

**主要素养与水平：**科学推理(Ⅱ)。

2. 参考解答：(1)  $V_1 > V_2$  (2)  $m_1 = m_2$

**命题意图：**知道气体体积与组成气体的分子总体积、气体质量与组成气体的分子总质量的关系。

**主要素养与水平：**物质(Ⅱ)。

3. 参考解答：初温度  $T_1 = 253\text{ K}$ ，末温度  $T_2 = 300\text{ K}$ ，温度变化量  $\Delta T = 47\text{ K}$

**命题意图：**巩固对热力学温标和摄氏温标关系的认识。

**主要素养与水平：**科学推理(Ⅰ)。

[1] 在没有外界影响的情况下，热力学系统的宏观性质不随时间变化的状态叫做平衡态。处于平衡态时的热力学系统内部分子仍在不停地运动，所以这是一个热动平衡。对于实际的热力学系统而言，不受外界影响，宏观性质保持不变是不可能的，所以平衡态是一个理想化的概念，是在一定条件下对实际情况的一种抽象。在外界条件变化很缓慢，对系统的影响十分微弱时，许多实际情况可以近似作为平衡态处理。系统处于平衡态时，宏观性质不随时间改变，描述这些性质的物理量(体积、压强、温度)称为状态参量。

### 问题与思考解读

#### 1. 参考解答：

图(a)中，左端橡皮膜向玻璃管内部凹陷，管内气体体积变大、压强减小；图

**4. 参考解答：**组成气体的大量分子在不停地做无规则运动，单位时间内大量的分子与容器壁发生弹性碰撞，分子的动量发生变化，宏观上表现为容器壁受到连续的压力，容器壁单位面积受到的压力就是气体的压强

**命题意图：**用分子动理论解释压强产生的原因，养成从微观与宏观两种不同视角研究问题的习惯。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(Ⅱ)。

**5. 参考解答：**图(a)  $p = p_0$  图(b)  $p = p_0 + \rho gh$  图(c)  $p = p_0 - \rho gh$  平衡状态下，封闭在容器内的气体压强可以用外加的压强来量度

**命题意图：**利用液柱的受力平衡，来推算被封闭气体的压强。体会间接测量或计算被封闭气体压强的方法。

**主要素养与水平：**运动与相互作用(Ⅱ)；科学推理(Ⅱ)。

## 资料链接

### 热学——微观世界和宏观世界的一座桥梁

热学中常用的研究方法有宏观和微观两种。

对于一定质量的某种气体，我们可以用体积、压强、温度来描述它的状态。这些物理量可以用仪器直接测量，也可以被我们的感官所觉察，称为宏观量。所谓宏观方法，就是基于系统热现象的大量实验观测事实，得出表征系统状态及属性的宏观量所遵从的规律，并以此为基础，通过逻辑推理和演绎的方法，进一步得出关于系统各种宏观性质之间的关系，以及宏观过程进行的方向、限度的规律。这种方法又称为热力学方法。这种方法完全以客观的实验结果为依据，没有对热现象的微观过程做任何假设，因此用这种方法得出的结论具有普遍性和可靠性。然而，这种方法不能揭示宏观规律的微观本质。

另一方面，由于物质都是由分子、原子等微观粒子组成的，如果能确定某个时刻系统内所有微观粒子的状态，那么系统在该时刻的状态也就能确定了。描述微观粒子的物理量（如位置、速度、能量等）称为微观量。微观量不能被我们的感官感知，一般也不能直接用仪器测量。所谓微观方法，也称分子动理论方法或统计物理方法，是从系统由大量微观粒子组成的前提出发，根据一些物质微观结构的知识，对粒子间相互作用的性质和规律，以及热现象的微观过程，提出某种模型或假设，把系统的宏观性质视为微观粒子热运动的统计平均效果，运用统计的方法找出宏观量与微观量的关系，确定系统的宏观性质和微观量遵从的规律。用这种方法所得出的结论必须接受实验的检验，如果结论与实验相符，表明其模型或假设是合理的，能够揭示其宏观规律的微观本质。

宏观方法和微观方法分别从两个不同的角度研究物质的热现象及其规律，它们彼此密切联系、相辅相成，使热学成为联系微观世界和宏观世界的一座桥梁。

## 第二节 气体的等温变化

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

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

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

### ▶ 气体的等温变化

[1]

#### 自主活动

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



图 11-8 浮沉子



图 11-9 推、拉注射器活塞

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

#### 学生实验

##### 探究等温情况下一定质量气体压强与体积的关系

###### 提出问题

注射器内的封闭气体体积减小时压强增大，体积增大时压强减小。等温情况下，一定

旨在提升科学探究能力，培养严谨的科学态度与实事求是的科学精神。

## 正文解读

[1] 通过“自主活动”，引导学生基于感觉和现象提出猜想，为后续的定量探究实验确立方向。教学中要提示学生，注意体会用手推、拉活塞时手指上不同的感觉，进而说明密闭气体体积大小不同对应的压强不同。明确探究实验的研究对象为封闭在针筒内的气体，探究的是密闭气体状态发生变化时压强随体积变化的规律。

## 本节编写思路

本节基于上一节课的学习内容，在用体积、温度、压强描述气体状态的基础上，提出采用控制变量的方法，通过实验手段来研究一定质量的气体等温变化时所遵循的规律。

本节内容主要分为三部分：一是通过实验探究气体等温变化规律，二是玻意耳定律，三是玻意耳定律的微观解释。其中探究实验是重点。

探究实验分为定性与定量两部分。首先在自主活动体验的基础上，对一定质量气体等温过程中压强与体积的关系提出猜想，然后通过学生实验从定量的角度予以验证。

在探究实验中，学生先基于直观感受提出猜想，然后经过收集、分析、处理数据等一系列过程，最终得出结论并相互交流。该实验过程

[1] 建议在介绍“实验装置与方法”时，组织学生对下列问题展开讨论，确保学生操作正确，有利于实验结论的得出。

实验过程中：

- (1) 如何确保气体质量一定？
- (2) 如何控制气体的温度保持不变？
- (3) 如何确保每次读数时气体处于平衡状态？

[2] 利用教材图 11-10 所示装置进行实验时，需要注意：在针筒和压强传感器的连接管内有一定气体，因此封闭气体的体积应该等于由针筒刻度读出的体积值与软管容积的和。教学中可以根据学生的水平，选择采取以下两种教学方式：

(1) 直接告知学生软管容积的数值，记录的封闭气体体积应该为：针筒刻度读出的体积值+软管容积值。

(2) 先不告知软管内存在气体这一事实，学生将由针筒刻度读出的体积值当作封闭气体的体积。在用图像处理数据时发现每组作出的  $V - \frac{1}{p}$  图线在 V 轴上都有一段截距，再引导学生观察实验装置，寻找问题所在。发现问题之后，再告知软管的容积，请学生重新处理数据，观察图线的变化，最终经分析得出规律。

[3] 交流与讨论中的问题(2)的用意：①多组同学的实验结论都证明：一定质量的气体等温变化时， $p$  与  $V$  乘积是个常量，帮助学生明确科学规律是通过大量实验得出来的，是可重复的，不能通过一次实验就轻易下结论；②发现不同小组的  $p$  与  $V$  乘积不同，可帮助学生明确  $p$  与  $V$  乘积所对应的常数与封闭气体的质量有关，实验所得的结论是有适用条件的。

质量气体的压强是否与体积成反比？

#### 实验原理与方案

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

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

#### [1] 实验装置与方法

如图 11-10 所示的实验装置可供选用。

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

本实验采用作图的方法分析数据，得出  $p$ 、 $V$  之间的函数关系。

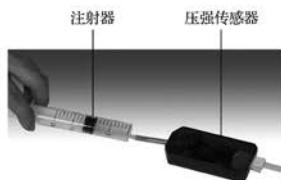


图 11-10 探究等温情况下气体压强与体积的变化关系

#### 实验操作与数据收集

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

表 11-2 实验数据记录表

实验序号	1	2	3	4	5
$V/\text{mL}$					
$p/\text{Pa}$					

#### 数据分析

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

#### 实验结论

#### 交流与讨论

- (1) 在实验中，怎样确保封闭气体的温度不变？
- (2) 各组得到的  $p$  与  $V$  乘积的平均值一致吗？若不一致，分析可能的原因。

### [1] ▶ 玻意耳定律

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

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

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

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

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

[2] **示例** 一个体积为  $V$  的气泡自池塘底浮起, 如图 11-13 所示。若水深为 3 m, 气泡从池底上升到水面时体积将变为原来的多少倍? (设水底和水面温度相同, 大气压强  $p_0 = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 水的密度  $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )

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

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

$$p_1 V_1 = p_2 V_2$$

所以,

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{p_1 V_1}{p_2} = \frac{(p_0 + \rho gh)V}{p_0} \\ &= \frac{(1.0 \times 10^5 + 1.0 \times 10^3 \times 9.8 \times 3)}{1.0 \times 10^5} V \\ &\approx 1.29V \end{aligned}$$

因此, 气泡从池底上升到水面时体积将变为原来的 1.29 倍。

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



图 11-11 玻意耳 (R. Boyle, 1627—1691)

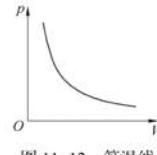


图 11-12 等温线



图 11-13

[1] 在学习玻意耳定律的过程中, 可让学生练习用文字叙述、数学表达式和图像三种方式来描述物理规律, 从而加深对等温变化过程的理解, 为后续学习查理定律和盖·吕萨克定律奠定基础。要帮助学生明确: 在  $p$ - $V$  图线上任意一点与一组  $(p, V)$  数据对应, 表示一定质量气体的一个状态。

[2] 通过此示例帮助学生学会从真实情境中抽象出物理模型——一定质量的气体发生等温变化, 进而确定初、末状态的体积和压强, 运用玻意耳定律解决基于真实情境所提出的问题。运用气体实验定律解决实际问题的策略与解决力学、电学问题有所不同, 教学中要注意示范。

[1] 一定质量的气体，其分子总数是一定的。在一定的温度下，气体分子运动的平均速率是不变的，所以压强只与单位体积中的分子数有关。当气体的体积缩小时，单位体积内的分子数增加，在单位时间内分子对单位面积器壁的碰撞次数将增加，所以压强就增大。同理，当体积增大时，单位体积中的分子数减少，压强也减小，所以在温度恒定时，一定质量的气体的压强与体积成反比。

## 问题与思考解读

**1. 参考解答：**这种说法是错误的。向下推活塞导致气体体积减小，分子间距离减小，但由于物质还是气体状态，分子间距离仍然大到可以忽略分子间的相互作用力。推活塞感觉费劲是因为气体密度增大，单位时间内撞击单位面积器壁的分子数增多，导致气体压强增大

**命题意图：**解释宏观现象背后的微观原因，运用理论依据说明自己的观点。

**主要素养与水平：**科学论证(Ⅱ)。

**2. 参考解答：**把滴管的玻璃嘴放入水中，在橡胶球和滴管内封闭了一定质量的空气。松手后，这部分空气的体积增大，压强减小，因此滴管内外气体存在压强差，这个压强差使水进入滴管内部

**命题意图：**运用玻意耳定律解释生活中的现象。

**主要素养与水平：**科学推理(Ⅱ)。

**3. 参考解答：**用力吹气球，但气球体积略增大后便不再增大。在气球和球形瓶之间封有一定量的空气，当用力向气球内吹气时，这部分密闭气体会被压缩，压强增大，使气球很难被吹大

## STSE

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

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

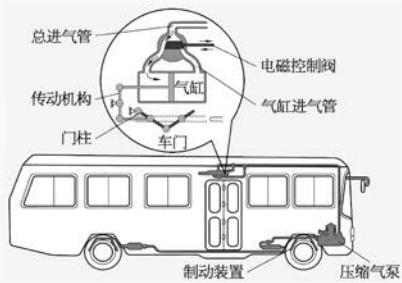


图 11-14 大客车双向气阀构造图

### ▶ 玻意耳定律的微观解释

玻意耳定律反映了气体宏观状态的变化规律，这一规律可用分子动理论的观点从微观

- [1] 角度加以解释。气体的压强取决于温度和容器内气体的分子数密度。当质量一定的气体度不变时，气体的压强仅与气体的分子数密度有关。故体积越小，气体分子数密度越大，单位时间内撞击单位面积的分子数越多，气体的压强就越大。

### 问题与思考

1. 在本节的“自主活动”中，推活塞时感觉很费劲，有人说这表明分子间有斥力。请对此作出判断并简述理由。
2. 如图 11-15 所示，滴管尾部套有弹性橡胶球。挤压橡胶球，然后把滴管的玻璃嘴放入水中，松手后，水便进入滴管内部。解释上述现象。



图 11-15

3. 如图 11-16 所示, 在球形瓶中放入一个气球, 把气球的开口端翻在球形瓶的瓶口上, 然后向气球内吹气, 简述将要发生的现象及其原因。
4. 湖底腐烂的植物释放出沼气, 当遇到严寒天气时沼气泡在水中被冰冻起来, 自下而上越来越大, 形成一道有趣的风景 (图 11-17)。  
 (1) 简述上述现象的成因。  
 (2) 若一个沼气泡从湖底升至湖面时体积加倍, 估算湖水的深度。



图 11-16

5. 如图 11-18 所示的潜水钟 (一种沉放到水下, 研究水底情况的装置, 也可作为检修大桥桥墩及其他建筑设施水下部分的潜水装置) 高 2 m, 开口端竖直向下沉到 10 m 深的水底, 求进入钟内的水深  $h$ 。(设钟内封闭气体的温度保持不变, 大气压强  $p_0 = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 水的密度  $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $g$  取  $10 \text{ m/s}^2$ )
6. 某小组同学应用玻意耳定律设计了一个测量大气压强的实验方案: 一端封闭、粗细均匀的玻璃管开口向上竖直放置, 内有一段汞柱封闭了一定质量的空气, 如图 11-19 所示。多次改变管内汞柱长度, 测量多组汞柱的长度  $h$  和空气柱的长度  $l$ ; 然后在  $h - \frac{1}{l}$  坐标系中描点作图。  
 (1) 写出所作图线的函数表达式。  
 (2) 如何利用该图线求出大气压强?



图 11-17

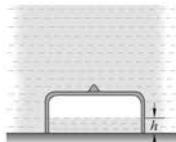


图 11-18

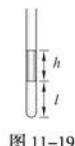


图 11-19

$$p_1 = p_0, p_2 = p_0 + \rho g(10 \text{ m} - h), V_1 = S \cdot 2 \text{ m}, V_2 = S(2 \text{ m} - h).$$

根据  $p_1 V_1 = p_2 V_2$  可解得  $h \approx 0.95 \text{ m}$

**命题意图:** 应用玻意耳定律解决实际问题, 培养物理观念。

**主要素养与水平:** 模型建构(II); 科学推理(III)。

6. 参考解答: (1)  $h = \frac{c}{\rho g S} \cdot \frac{1}{l} - \frac{p_0}{\rho g}$  ( $c$  为常数,  $\rho$  为汞的密度,  $p_0$  为大气压强,  $S$  为玻璃管横截面积)  
 (2) 图线在纵轴上的截距的绝对值为  $\frac{p_0}{\rho g}$ , 由此可求出大气压强

**命题意图:** 能基于玻意耳定律理解实验原理、解释实验图像的物理意义。

**主要素养与水平:** 科学推理(II); 解释(III)。

**命题意图:** 从真实情境中抽象出研究对象, 从定性的角度预测并解释现象。

**主要素养与水平:**

模型建构(II); 科学论证(II)。

4. 参考解答: (1) 沼气泡在湖底生成时有一定的体积和压强。在上升过程中, 温度变化不大; 随着深度变浅, 气泡内气体的压强越来越小, 气泡内外压强差变大, 所以体积越来越大  
 (2) 设大气压强为  $p_0$ , 沼气泡在湖底压强为  $p_1$ 、体积为  $V_1$ , 升至湖面时的压强为  $p_2$ 、体积为  $V_2$ , 湖水深度为  $h$ , 有  $p_1 = p_0 + \rho gh$ ,  $p_2 = p_0$ ,  $V_2 = 2V_1$ 。根据  $p_1 V_1 = p_2 V_2$  可得  $h \approx 10 \text{ m}$

**命题意图:** 应用玻意耳定律, 从定性、定量角度解决从实际情境中抽象出的问题, 培养物理观念。

**主要素养与水平:** 模型建构(II); 科学推理(II)。

5. 参考解答: 已知

## 本节编写思路

本节内容由气体的等容变化、等压变化和理想气体三部分组成。气体的等容变化、等压变化的研究方法都是控制变量法，分别控制体积、压强，通过实验研究另外两个状态参量之间的变化规律。与等温变化的教学一样，教材也从微观角度用分子动理论解释等容变化、等压变化规律，并基于对三个实验定律的适用条件的讨论，抽象出理想气体的物理模型。

在与教师互动、共同完成气体等容变化规律的实验过程中，引导学生经历实验数据采集、处理、分析并获得结论等环节；在讨论“验证盖·吕萨克定律实验”实验方案的过程中，培养学生设计实验操作步骤、数据记录与处理的方案等科学探究的能力。在建立理想气体概念的过程中，学生再次经历建构模型的科学思维过程。

## 正文解读

[1] 这个实验通常可以用水浴法来改变封闭气体的温度，而教材中采用远红外加热器来改变封闭气体的温度，效果更佳。封闭气体的压强和温度可分别通过压强传感器和温度传感器直接获得。教学中可以由老师和个别学生完成操作，其他同学记录数据，自行建立坐标系，完成描点作图。

教学中要让学生明确：本实验仅研究了在室温与100℃之间一定质量气体的压强随热力学温度改变而发生的变化，由此得到的查理定律也仅适用于温度不太低、压强不太大的气体；实验并没有测得低温段的数据，实验图线的延长线过坐标原点是合理的“外推”，“外推”并不表示查理定律的适用范围扩大；大量针对温度不太低、压强不太大的不同气体进行的等容变化的实验，所得到的图线延长线都过 $p-T$ 坐标原点，即压强为零时对应的温度为0K，所以热力学温度的0K也称为绝对零度，是物理学理论所断言的自然界的低温极限。

### 第三节 气体的等容变化和等压变化

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

#### ▶ 气体的等容变化

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

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

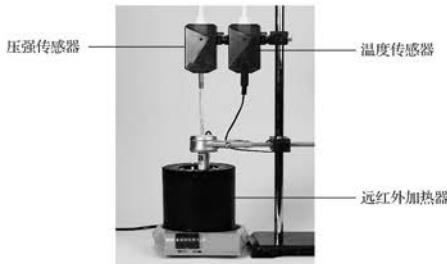


图11-20 研究等容情况下气体压强随温度的变化关系

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

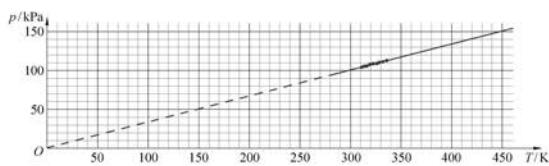


图11-21 气体压强 $p$ 与热力学温度 $T$ 的关系

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

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

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

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

#### ▶ 气体的等压变化

一定质量的气体在压强保持不变情况下发生的变化叫做等压变化。

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

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

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

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

图 11-22 和图 11-23 的原点对应  $T=0\text{ K}$ 。 $0\text{ K}$  ( $-273.15^\circ\text{C}$ ) 是一个只能无限逼近但不能达到的温度极限,称为绝对零度 (absolute zero)。

#### [2] 自主活动

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

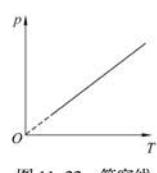


图 11-22 等容线

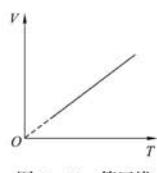


图 11-23 等压线

[1] 教学中可以引导学生模仿玻意耳定律的学习,采用文字叙述、数学表达式和图像三种方式来表达查理定律和盖·吕萨克定律。

要求学生尝试用分子动理论知识从微观角度解释查理定律和盖·吕萨克定律。

查理定律的微观解释:一定质量的气体体积不变时,单位体积中的分子数就不变,即在等容变化过程中气体的密度是不变的,此时气体的压强仅由气体分子的平均速率决定。当温度升高时,气体分子热运动的平均速率增大,碰撞器壁时对器壁的冲击力增大,且单位时间里对器壁单位面积上撞击的次数增多,因此压强就增大了。

盖·吕萨克定律的微观解释:一定质量的气体压强由温度和容器内分子数密度共同决定。在等压变化的过程中,一方面因为温度升高,分子的平均速率增大,使压强有增大的倾向;另一方面,由于体积变大,单位体积内分子数减少,使压强有减小的倾向,这两种倾向抵消,导致压强不变。

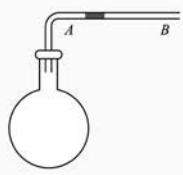


图 11-24 验证盖·吕萨克定律

高,分子的平均速率增大,使压强有增大的倾向;另一方面,由于体积变大,单位体积内分子数减少,使压强有减小的倾向,这两种倾向抵消,导致压强不变。

[2] 此处设置“自主活动”,要求学生根据所提供的等压变化情境,设计验证盖·吕萨克定律的实验方案。教学中可以引导学生关注以下几个方面:

- (1) 实验中如何控制封闭气体的压强不变?
- (2) 如何测量、改变封闭气体的温度? 测量时要注意些什么?
- (3) 如何测量封闭气体的体积?

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

[1] 示例中的气体状态先后经历了等压、等容两个过程的变化，属于多个过程的问题。教学中要从以下两个方面引导学生：

(1) 在解决这类问题时需要关注每个过程的条件，正确选用合适的气体实验定律分段处理问题，并注意过程间的联系。

(2) 结合  $p - V$ 、 $p - T$ 、 $V - T$  图像分析过程，更直观地表述气体状态变化的过程。

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

- (1) 活塞刚上升到气缸顶部时 [图 11-25 (b)]，气体的温度  $T_2$ ；
- (2) 气体的温度升高到  $T_3 = 375 \text{ K}$  时，气体的压强  $p_3$ 。

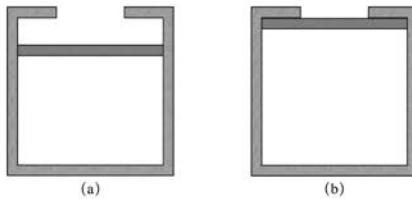


图 11-25

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

解：根据已知条件，气体在三种情况下的状态参量如下

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

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

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

(1) 从状态 I 到状态 II，气体发生等压变化，根据盖·吕萨克定律有

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

故活塞刚上升到气缸顶部时，气体的温度

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

(2) 从状态 II 到状态 III，气体发生等容变化，根据查理定律有

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3}$$

故温度为  $T_3 = 375 \text{ K}$  时，气体的压强

$$P_3 = \frac{T_3}{T_2} P_2 = \frac{375}{250} \times 1.2 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.8 \times 10^5 \text{ Pa}$$

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

### [1] ▶ 理想气体

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

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

### [2] 拓展视野

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

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

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

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

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

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

这个关系式叫做克拉珀龙方程，在解决有关气体的实际问题中有着广泛的应用。

去，这是研究物理问题常用的方法。

[2] 此处“拓展视野”中的内容可供学有余力的学生阅读，拓宽知识面。

[1] 关于理想气体的概念要使学生理解以下两点：

(1) 理想气体是实际气体的理想化模型。从宏观上讲是指在任何条件下始终遵守气体实验定律的气体。当实际气体在压强不太大、温度不太低的情况下可以看成理想气体。从微观上讲理想气体应具有如下性质：① 分子本身没有体积，即认为它所占据的全部空间都是可以被压缩的空间；② 分子间除碰撞以外没有其他相互作用；③ 分子间的碰撞为弹性碰撞。

(2) 建立理想气体的概念，是为了在研究气体性质时减少问题的复杂性。理想气体是从实际气体中突出主要因素，简化和忽略次要因素而抽象出来的理想化模型。把实际的研究对象简化为模型，研究得出其规律或结论，再对规律或结论进行修正，使之复归到实际原型中

## 问题与思考解读

28 第十一章 气体、液体和固体

**1. 参考解答:** (1) 保温杯内热水上方被封闭了一部分空气, 过了几个小时后空气的温度降低, 压强减小, 内外气体的压强差导致杯盖很难被拧开 (2) 车胎气太足, 内部气体压强较大。烈日下骑行时, 暴晒和摩擦都会导致胎内气体的温度升高, 压强变得更大, 容易使车胎爆裂

**命题意图:** 运用查理定律分析、解释生活中的现象, 形成物理观念。

**主要素养与水平:** 能量观(Ⅱ); 科学推理(Ⅱ)。

**2. 参考解答:**  $p_t = p_0 + \frac{p_0}{273}t$

**命题意图:** 了解用摄氏温标表达的查理定律, 巩固对查理定律的认识。

**主要素养与水平:** 科学推理(Ⅱ)。

**3. 参考解答:** 如图 1 所示

**命题意图:** 学会用不同的图像从不同的角度直观地描述同一个气体状态变化的过程, 提升对气体状态变化过程的表达及理解能力。

**主要素养与水平:** 科学推理(Ⅱ)。

**4. 参考解答:** 查理定理: 一定质量的气体保持体积不变时, 分子的密度也保持不变。温度升高后, 气体分子热运动的平均速率增大, 碰撞器壁时对器壁的冲击力增大, 气体的压强就会增大 盖·吕萨克定律: 一定质量的气体在等压变化的过程中, 一方面因为温度升高, 分子的平均速率增大, 使压强有增大的倾向; 另一方面, 由于体积变大,

### 问题与思考

1. 请解释下列现象。

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

2. 历史上, 查理定律被发现时尚未建立热力学温标, 因此查理定律的原始形式采用的是摄氏温标。若  $0^{\circ}\text{C}$  时的压强为  $p_0$ , 试用摄氏温度  $t$  表达查理定律。

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

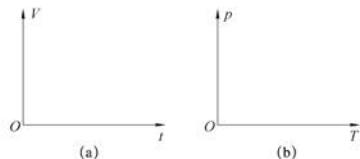


图 11–26

4. 用分子动理论、动量定理和统计观点解释查理定律和盖·吕萨克定律。

5. 如图 11–27 所示为一个土法爆米花铁质容器, 把米倒入容器后将盖盖紧, 然后一边加热一边转动容器, 同时观察容器上压强计的示数变化。当压强达到一定数值时, 便可打开容器。就在打开容器的瞬间, 米花爆成了。则:

- (1) 加热过程中, 容器中空气的密度和压强怎样变化?
- (2) 描述在打开容器的瞬间米花生成的过程。



图 11–27

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



图 11–28

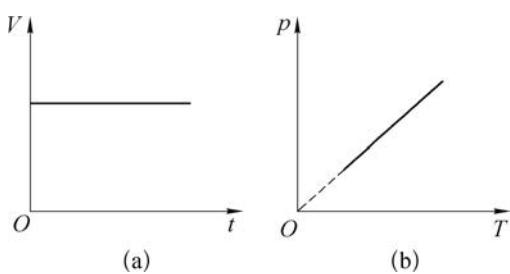


图 1

单位体积内分子数减少,使压强有减小的倾向,这两种倾向相互抵消,导致压强不变

**命题意图:**从微观角度进一步认识查理定律和盖·吕萨克定律。

**主要素养与水平:**运动与相互作用观(II);能量观(II);科学推理(II)。

**5. 参考解答:**(1) 加热过程中,容器中空气的体积基本不变,所以密度基本不变。温度升高,根据查理定律,压强增大 (2) 打开容器瞬间,容器内压强迅速降低到大气压强,而在大米内部由于有气隙,内部气体压强仍然远大于大气压强,从而向外膨胀成了米花

**命题意图:**运用气体实验定律分析、解释生活中的现象,形成物理观念。

**主要素养与水平:**能量观(II);科学推理(II)。

**6. 参考解答:**47 °C 温度变化时汽车轮胎的压强和体积都会发生变化,但体积的变化极小,该过程可近似看成等容变化。 $p_1 = 244 \text{ kPa}$ ,  $T_1 = 300 \text{ K}$ ,  $p_2 = 260 \text{ kPa}$ , 根据  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$  即可求得  $T_2 \approx 320 \text{ K}$ ,  $t_2 \approx 47 \text{ }^{\circ}\text{C}$

**命题意图:**运用气体实验定律解决从真实情境中提出的问题,提升物理观念。

**主要素养与水平:**能量观(II);科学推理(II)。

## 资料链接

### 温度的测量与温标

温度是表征物体冷热程度的物理量。热平衡实验表明:如果两个物体都与第三个物体处于热平衡,则这两个物体彼此也必定处于热平衡。这就是由大量实验证实的热力学第零定律,一切相互处于热平衡的物体具有相同的温度。这为温度的测量提供了客观依据:人们可以用具有确定初始状态的物体C来判定物体A、B的温度是否相同或孰高孰低。

为了测量温度,人们选择某种物质(测温物质)的物理性质(测温属性)随温度变化的规律来标志温度,测温属性应该与温度之间有单值的、显著的函数关系。为标定温度的数值还需要规定标准点及相应的温度值,进而可以根据测温属性相对于其在标准点处数值的变化来标定温度的数值。测温物质、测温属性和固定标准点常被称为温标三属性。

#### 1. 华氏温标与摄氏温标

华氏温标是德国物理学家华伦海特(G. D. Fahrenheit, 1686—1736)利用汞在玻璃管内的体积变化而建立的温标,单位为“华氏度”,记作°F。它规定氯化氯及冰的混合物的熔点为0°F(相当于当地冬天的最低温度),冰与水的混合物温度为32°F,将在0°F与32°F之间一定量的汞的体积(或长度)变化量等分为32格,测温属性与温度之间呈线性关系。

摄氏温标是瑞典天文学家摄尔西斯(A. Celsius, 1701—1744)以汞为测温物质、细玻璃管中汞的体积为测温属性、测温曲线也为线性函数关系而制定的温标,单位为“摄氏度”,记作°C。它规定纯冰与纯水在1个标准大气压下达到平衡时的温度(水的冰点温度)为0°C,纯水与水蒸气在蒸气压等于1个标准大气压时达到平衡时的温度(水的汽点温度)为100°C。

华氏温标 $t_F$ 与摄氏温标 $t$ 的关系为

$$t_F = 32 + \frac{9}{5}t$$

除英、美等国仍采用华氏温标外,现在世界上绝大多数国家在日常生活中都使用摄氏温标。

## 2. 理想气体温标

实验表明,对一定量的稀薄气体,在体积固定的条件下,压强  $p$  与摄氏温度  $t$  的关系为

$$p = p_0 (1 + \alpha_p t)$$

这就是查理定律,并且当  $p_0 \rightarrow 0$  时,任何气体的  $\alpha_p$  都趋近于同一个常量  $\frac{1}{T_0}$ ,如图 2 所示。即有

$$\lim_{p_0 \rightarrow 0} \alpha_p = \alpha_0 = \frac{1}{T_0}$$

于是

$$p = p_0 \frac{T_0 + t}{T_0}$$

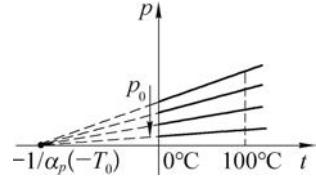


图 2

定义  $T = T_0 + t$ , 于是得到

$$T = \frac{p}{p_0} T_0$$

现规定:  $H_2O$  的冰、水和水蒸气三相共存并达到平衡态(三相点)的温度为  $T_0 = 273.16\text{ K}$ , 此温度下气体的压强为  $p_0$ , 则有

$$T = 273.16 \frac{p}{p_0}$$

如果气体的体积不变,测出某温度下气体的压强  $p$ ,即可得到此时的温度  $T$ ,由此可制作气体定容温度计。实际测量表明,所用气体的种类不同,定容温度计所测出的温度  $T$  会略有不同,但当所用气体非常稀薄时,无论充入何种气体,测出结果趋于一致,这就是定容气体温标。根据盖·吕萨克定律,还可以建立定压气体温标。当气体非常稀薄、压强趋于零时,实际气体很好地近似为理想气体,于是上述从定容和定压两种角度建立的气体温标统称为理想气体温标。

## 3. 热力学温标

1848 年,英国物理学家开尔文勋爵在热力学第二定律基础上,从理论上建立了不依赖任何物质的具体测温属性的温标,称为热力学温标或绝对温标,由它确定或标记的温度称为热力学温度或绝对温度。在热力学温标中,规定热力学温度是基本的物理量,其单位为“开尔文”,记作 K。1 K 定义为水的三相点的热力学温度的  $\frac{1}{273.16}$ ,即水的三相点温度定义为 273.16 K。

可以证明,在理想气体温度计所能测量的温度范围内,热力学温标与理想气体温标是一致的。因而我们可以用气体温度计来实现热力学温标。

有了与测温物质无关的热力学温标后,1960 年国际计量大会对摄氏温标进行了重新定义。如以  $t$  表示摄氏温度,  $T$  表示热力学温度,则有

$$t = T - 273.15$$

可见,水的三相点在摄氏温标中为 0.01 °C。

## 第四节 液体的基本性质

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



图11-29 太空舱内的大水球

### ▶ 液体的微观结构

液体没有确定的形状，具有流动性；有确定的体积，不易被压缩，其性质介于固体和气体之间。液体汽化时体积膨胀上千倍，大多数液体凝固时体积缩小，缩小一般不超过10%。

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

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

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

## 本节编写思路

本节主要介绍液体表面的性质，分为四部分：液体的微观结构、液体的表面张力、浸润现象和毛细现象。

教材的思路是让学生从分子动理论角度出发，了解液体的微观结构，在此基础上分析、解释液体在宏观上所表现出来的各种现象。

实验是本节课教学的关键。学生将通过对现象的观察和描述，建立感性认识，然后运用分子动理论知识进行理性分析，对现象做出解释。这一过程中，学生将在宏观现象和微观结构之间建立联系，进一步体会宏观与微观相结合的研究方法。

## 正文解读

[1] 通过“自主活动”中的体验实验,让学生亲手操作,观察并描述现象,体会表面张力的存在:

(1) 一侧薄膜被刺破,原来松弛的细线被拉向仍有薄膜的一侧,说明薄膜有收缩的趋势。

(2) 棉线圈内的薄膜被刺破,线圈会被圈外的薄膜拉成圆形,因为周长一定时圆形的面积最大,这样圈外的面积就收缩到最小,说明液体表面有收缩到尽可能小的趋势。

[2] 关于液体表面张力的进一步解释,详见本节“资料链接”。

### ▶ 液体的表面张力

#### [1] 自主活动

将系有松弛棉线的铁丝环浸入肥皂液中再轻轻提起来,使环上结成肥皂薄膜。

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

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

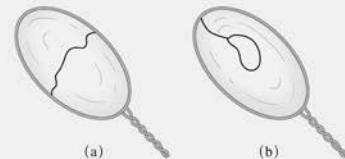


图 11-30 观察肥皂膜和棉线变化的实验

在图 11-30 (a) 的情形中,如用热针刺破棉线一侧的薄膜,棉线会向另一侧收缩,呈圆弧形;而在图 11-30 (b) 的情形中,刺破棉线圈内的薄膜,棉线圈会扩张成圆形。这些现象说明,液面对边缘有拉力作用,且拉力的方向与边缘垂直。设想在液体表面任意画一直线 MN,把液面切分为①和②两部分,如图 11-31 (a) 所示,则液面①和②之间存在一对相互作用的拉力,这对拉力垂直于直线 MN、沿液体表面均匀地分布在直线 MN 的两侧。液体表面存在的这种拉力称为表面张力 (surface tension)。可见,表面张力有使液体表面收缩的趋势。

表面张力源于液体表面层分子之间的相互作用力。表面层是指液体与空气接触的薄层,厚度约为 1 nm,如图 11-31 (b) 所示。相对于液体内部,表面层中的分子数密度变小,分子间距变大,相邻分子间的距离比液体内部的略大,根据两个分子之间的作用力随彼此间距变化的关系,此时分子间表现为引力,导致液体表面具有收缩趋势。由此可见,液体表面层可视为被拉伸的弹性膜,膜中存在张力,这就是液体表面张力产生的原因。

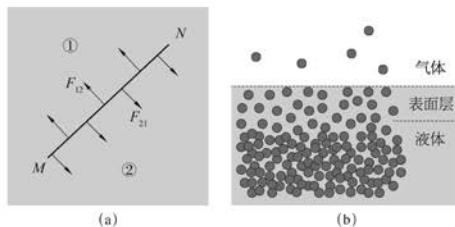


图 11-31 液体的表面张力

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

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



图 11-32 小草上的水珠

#### ► 浸润现象

### [1] 自主活动

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

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

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

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

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

(3) 如果液体分子间的相互作用大于液体和固体分子间的相互作用, 则附着层中分子分布较稀疏, 因而附着层分子间呈引力, 附着层中液体有向内收缩聚集的趋势, 表现为不浸润现象。

(4) 浸润、不浸润现象和液体表面收缩趋势一样, 也是分子力的一种表现。

[1] 通过“自主活动”, 引导学生通过观察来认识浸润现象和不浸润现象。还可以让学生回忆生活中看到过的一些浸润现象和不浸润现象的实例。

[2] 对浸润和不浸润现象的定性解释可按下列层次进行:

(1) 在固体和液体接触处形成附着层, 附着层分子既受液体内部分子的作用, 又受固体分子的作用。

(2) 如果固体分子对附着层内液体分子的吸引力大于液体内部分子间的吸引力, 附着层内液体分子的分布密度会变大, 分子间距变小, 导致附着层内液体分子间呈斥力, 附着层内的液体就有向外扩展沿着固体蔓延生长的趋势, 从而形成浸润现象。

[1] 通过“自主活动”,引导学生观察并描述现象,归纳出以下几点:

(1) 不同材质的毛细管插入液体中,若液体浸润管壁,则细管中液面上升;若液体不浸润管壁,则细管中液面下降。

(2) 液体在毛细管中上升或下降的高度与毛细管内径的粗细有关。管径越细,上升或下降的高度越大。

[2] 根据学生的学习水平,可对浸润情形下液体在毛细管内上升一定高度作出适当的解释:

(1) 浸润使附着层内的液体上升,管内液面弯曲,表面积变大,表面张力的收缩作用要使液面趋向水平,于是管内液柱上升以减小液面的表面积。

(2) 液面不断上升,直到表面张力向上的拉引作用和管内升高的液柱所受重力达到平衡时,液面才停止上升,稳定在一定高度。

关于不浸润情形下液体在毛细管内下降一定高度的原因,可让学生通过讨论自行分析。

[3] 通过“大家谈”,引导学生用毛细现象来解释生产中保湿排涝的做法,感受毛细现象在农业生产上的重要意义,完善物理观念。

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

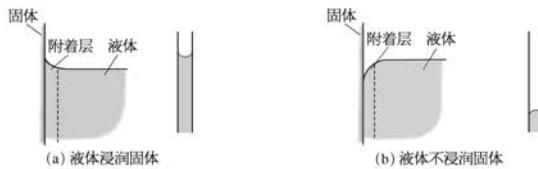


图 11-33 浸润和不浸润

#### ▶ 毛细现象

### [1] 自主活动

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

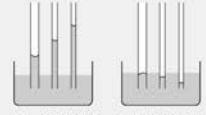


图 11-34 水对玻璃浸润、  
对塑料不浸润

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

浸润液体在细管中上升和不浸润液体在细管中下降的现象叫做毛细现象 (capillarity)。

[2] 内径小到足以发生明显毛细现象的管道叫毛细管。

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

### [3]

#### 大家谈

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

## 问题与思考解读

### 问题与思考

- 布伞伞面的孔隙肉眼可见，但雨水却不会从孔隙漏下，简要解释这个现象。
- 如图 11-35 所示，经常可以看到小昆虫水黾在池塘的水面上跳来跳去，为什么它不会沉入水里？
- 从液体性质的角度解释下列常见现象：
  - 将食用油灌入小口瓶时，常在瓶口插一根竹筷或玻璃棒，油就可以沿着竹筷或玻璃棒流入瓶中，而不会流到瓶子外面。
  - 医生处理患者伤口时，要用消毒后的脱脂棉，而不用消毒后的天然棉。
  - 钢笔在油性纸上写不出字来，在棉质纤维构成的滤纸上写字却会化开。
- 如图 11-36 所示，在几个花盆的中间放一盆水，用吸水较好的粗纱带或粗布条，一头浸在盆内的水中，另一头埋在盆土中。这样盆中的水就会慢慢渗入花盆的土中，花盆中的泥土可以长期保持湿润，简述理由。



图 11-35



图 11-36

**1. 参考解答：**下雨时，雨伞的伞面织物的小孔里形成水膜，由于存在表面张力，雨水就被托住了，而不会从小孔里漏下

**命题意图：**用液体表面张力知识解释生活中的现象，培养物理观念。

**主要素养与水平：**物质观(Ⅱ)；运动与相互作用观(Ⅱ)。

**2. 参考解答：**昆虫的质量很小，当它在水面上跳动时，水的表面张力足以提供它所需要的弹力，所以它不会沉入水中

**命题意图：**能解释日常生活中的表面张力现象。

**主要素养与水平：**物质观(Ⅱ)；运动与相互作用观(Ⅱ)。

**3. 参考解答：**(1) 油对竹筷和玻璃是浸润液体，会在竹筷或玻璃表面形成薄层，加上重力的作用，油便顺着竹筷或玻璃流下 (2) 天然

棉花未脱脂前有油脂，它与病人伤口处的血水是不浸润的。脱脂后的棉花与血水是浸润的，能将伤口处的血水吸干净，所以必须用消毒后的脱脂棉 (3) 墨水与油纸是不浸润的，墨水与滤纸是浸润的，且滤纸有许多细小的毛细管，所以钢笔在油性纸上写不出字来，在滤纸上写字却会化开

**命题意图：**了解浸润与不浸润在日常生活中的应用。

**主要素养与水平：**物质观(Ⅱ)；运动与相互作用观(Ⅱ)。

**4. 参考解答：**吸水较好的粗纱或粗布条与水是浸润的，且中间有很多毛细管，由于毛细现象，盆中的水会顺着毛细管上升，到达布条的另一端，渗入土中，保持泥土湿润

**命题意图：**观察日常生活中的现象，了解毛细现象在生活中的应用。

**主要素养与水平：**物质观(Ⅱ)；运动与相互作用观(Ⅱ)。

## 资料链接

### 液体表面张力

表面张力源于液体表面的分子受到的分子间引力作用。两个中性分子间的作用力、彼此间因相互作用而具有的势能与两个分子间距离的关系分别如图 3(a)和图 3(b)所示。

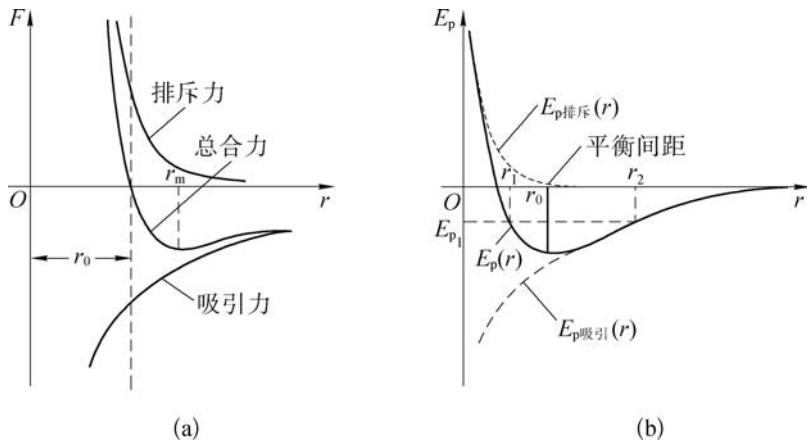


图 3

如图 3(b)所示,两分子间相互作用势能在相距  $r_0$  时最小,对应于极低温即绝对零度附近的情形。相对于低温,常温时两分子的能量增加,设增加到  $E_{p_1}$ ,与此对应的分子间的最小距离和最大距离分别为  $r_1$  和  $r_2$ ,这表示由于热运动,分子间距离在  $r_1$  和  $r_2$  之间不断变化。由于势能曲线相对于  $r_0$  并不对称,分子间的平均距离比  $r_0$  略大。由图 3(a)可知此时分子间存在引力,即在常温时,液体内部任意两个相邻分子间的平均距离大于  $r_0$ ,相互作用表现为引力。正是这一引力使液体分子凝聚在一起。这种分子间的引力是短程力,其作用范围和近邻分子间的距离在同一数量级。在液体内部,由于每个分子四面八方都有相邻分子,平均而言每个分子受到相邻分子间的吸引力的合力为零。

处于液体表面的分子情形略有不同。表面层分子数密度比液体内部略低,相邻分子间距离比内部略大,因而表面相邻分子间的引力也就比内部略大,如图 3(a)所示。从能量观点看这是因为表面分子间的相互作用势能要比内部高。一个分子如从内部运动到表层,一定要克服内部分子对其的吸引做功,这个功转化为表面分子间的相互作用势能而使势能增加。根据经典的玻尔兹曼统计理论,势能高处数密度低,如同空气分子数密度随高度而下降一样。

设在液体表面任意画一直线,在直线左侧的分子受到直线右侧分子的引力,同时也吸引右侧的分子;右侧的分子受到左侧分子的引力,同时也吸引左侧的分子。直线左右两边的分子相互吸引,如同左右两边有张力作用而使液体表面积有收缩的趋势,这就是液体表面的表面张力。以上说明表面张力的微观机理正是表面层分子间的分子引力,据此可以很清楚地解释一些常见的现象。例如教材图 11-29,在失重条件下水体呈球状,这就是由于水表面张力的作用使表面积收缩,而对同样的体积,球形的表面积最小。又如教材图 11-30(a),对棉线上的皂液分子而言,由于同时受到棉线两边分子的吸引,合力为零,棉线可呈任意形状;但如果戳破一侧的肥皂膜,该侧皂液消失,不再对棉线有吸引作用,棉线就在另一侧液面的表面张力作用下收缩,使棉线绷紧成向有皂液一方弯曲的弧线;如考虑棉线上任意一段长度极短的线元,作用在线元上并垂直于线元的表面张力和棉线内部作用在线元两端的张力的合力(垂直于线元指向液面外部)相平衡而使棉线静止。

以上分析同样可解释表面张力随温度的变化。随着温度上升,分子热运动加剧,热运动能量增加,有更多的分子能从内部向表面转移而使表面层分子数密度增加,于是相邻分子间距离相应下降。由图 3(a)可知,此时相邻分子间吸引力减小,从而导致表面张力减小。表面张力随温度上升而减小已由实验证明,例如,对外部为空气的水,表面张力系数(以  $10^{-3}$  N/m 为单位)在 10 °C 时为 74.22,30 °C 时为 71.18,而到 50 °C 时则减小至 69.71。正因为如此,烧热的针很容易刺破皂液膜,而冷的针则不容易刺破皂液膜。

## 本节编写思路

本节内容主要分为三部分：晶体和非晶体、晶体的微观结构、液晶。

教材首先从宏观角度，通过几何外形将固体分为晶体和非晶体两大类，然后主要介绍晶体在物理性质上表现出的各向异性，最后介绍晶体的微观结构，并以此解释晶体的宏观性质。

学生通过观察实验现象、图片、视频等，形成对晶体的感性认知，并基于晶体的空间点阵解释晶体的宏观外形和物理性质的差异。学会宏观与微观相结合、观察和理性思考相结合的全面认识事物的思维方式。

## 正文解读

[1] 可组织学生对食盐颗粒进行观察：先观察较大的颗粒，然后将大颗粒研磨成粉末，通过显微镜再次观察，确认食盐确实有规则的几何外形。对于其他晶体则可以通过播放视频、呈现图片的方式，帮助学生观察各种晶体所具有的规则形状。

### 第五节 固体的基本性质

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

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



图 11-37 雪花

#### ► 晶体和非晶体

自然界中大量物质都以固体形式存在。固体是物质的一种凝聚形态。从结构上说，一般可以把固体分成晶体（crystal）和非晶体（amorphous matter）两大类。晶体中的原子或分子在空间的排列是周期有序的，而非晶体中的原子或分子在空间的排列是无序的，没有周期性。常见的晶体有食盐、石英、云母等，常见的非晶体有玻璃、松香、橡胶等。

#### 拓展视野

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

[1] 晶体又可分为单晶体和多晶体。单晶体（single crystal）指整个晶体的原子或分子在空间周期排列的取向是一致的；多晶体（polycrystal）的相应取向是不一致的。单晶体具有规则的几何形状。图 11-38 所示是三种常见的单晶体，作为半导体工业重要材料的单晶硅和单晶锗都是单晶体。

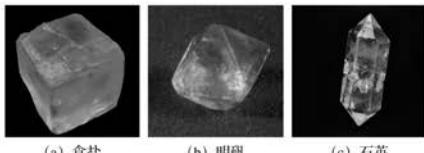


图 11-38 三种常见的单晶体

多晶体没有规则的几何外形。常见的金属材料大多是多晶体。

另外，许多物理性质上的差异也可以用于区分晶体和非晶体。

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

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

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

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

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

除了常见的晶体以外，自然界中的大多数固体都是晶体，甚至构成生命的物质基础——蛋白质、核酸，以及许多病毒，在适当的条件下也可以形成晶体。

### [3] 拓展视野

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

#### ► 晶体的微观结构

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

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

异性；方解石晶体对光的折射表现出各向异性。

- [3] 通过“拓展视野”栏目，引导学生认识到物质是晶体还是非晶体，取决于物质的微观结构。如果组成物质的分子或原子在空间按一定规律周期重复地排列，则该物质就是晶体，如果在一定条件下这种有规律的排列被破坏，则晶体就会变成非晶体。



(a) 石蜡在云母片上熔化



(b) 石蜡在玻璃片上熔化

图 11-39 石蜡熔化区域的形状

[1] 通过晶体导热的各向异性实验，让学生体会各向异性。实验时，在云母薄片和玻璃片上涂的石蜡层一定要尽可能地薄且均匀。可用回形针代替钢针，将回形针的外圈拉直，然后手持环圈的一端，把拉直的一端用酒精灯烧红后分别垂直接触云母片和玻璃片未涂石蜡的一面，让热量通过云母或玻璃传给石蜡。可通过投影仪让学生观察两薄片上石蜡的熔化情况，有条件的学校，可将这个实验改为学生随堂实验，以增加学生动手的机会，有利于更清楚地观察现象。

[2] 对于每一种晶体来说可能只是一种或几种物理性质表现为各向异性。例如，云母、石膏、锡等晶体在导热性上表现出各向异性；方铅矿和石墨在导电性上表现出各向异性，云母的机械强度表现出各向

[1] 晶体的空间点阵最初是人们根据晶体具有规则的外形这一特点提出的假说,现已被X衍射等实验所证实。组成晶体的不同微粒,以不同的化学结合力相互作用,构成晶体。

不同元素或化合物的晶体可以有相同的空间点阵,如碳(C)中的金刚石、硅(Si)和锗(Ge)都有金刚石型结构,而同一元素或化合物也可以有几种不同的空间点阵的晶体。晶体的这些特性反映了自然界的多样性和复杂性。空间点阵的形状和结构的不同,使物质呈现出不同的外形和特性。典型的例子是金刚石和石墨,它们都是由碳生成的晶体,金刚石能用来划玻璃,而用手摸一下石墨,手就会沾上石墨而变黑。

在晶体物质中,微粒的空间点阵,即结构的有序性是占主要地位的,但其中也常会有一些缺陷,例如空隙、位错、杂质等无序的情况存在。这种情况会大大影响晶体的性质,却也可被人类利用,例如半导体材料就是人为地在某些晶体材料中掺入杂质以改变其特性,来达到某种需求。自然界中规则、有序、纯粹总是相对的,往往会朝不规则、无序、不纯的方向演变。

空间点阵模型是一种理想化的抽象模型,主要用来说明晶体具有规则的几何形状和一定的空间对称性,但模型中微粒的大小和它们之间的距离与真实晶体的情形完全不成比例。实际上,微粒可能是彼此相接触、重叠,甚至相互渗透在一起,模型根本无法表示出原子、分子中电子的分布和运动等情况。

对于这部分内容的学习,课标并没有很高的要求,教学的重点在于让学生体会到晶体外形的规则性和物理性质各向异性与物质的结构有关,可以用微观的晶体结构解释宏观外形与物理性质的差异。

[2] 通过“大家谈”栏目,引导学生了解某种物质是否具有一定的熔点是宏观上区分晶体与非晶体的重要依据。

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

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

## 大家谈

了解了晶体和非晶体的微观结构,你有什么办法可以区分多晶体和非晶体吗?

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

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

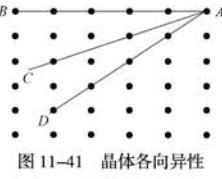
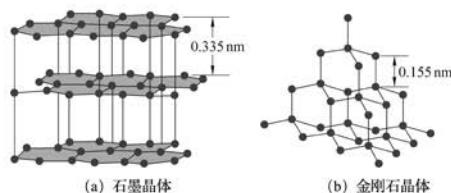


图11-41 晶体各向异性  
的缘由

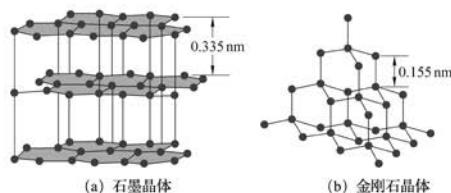


图11-42 石墨和金刚石的空间点阵

## [1] STSE

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

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

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

图 11-43 石墨烯的原子排列

图 11-44 柔性显示屏

[1] 此处设置“STSE”，

目的是让学生了解石墨烯作为一种新材料的发现经过、特性与应用，体会材料科学的发展对人类生活和社会发展的影响。

## ▶ 液晶

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

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

图 11-45 固态、液晶态和液态分子的排列示意图

51

## 问题与思考解读

38 第十一章 气体、液体和固体

**1. 参考解答:** 不一定。例如多晶体的铜、铁也是各向同性的。

**命题意图:** 认识晶体、多晶体、非晶体的各向异性和各向同性。

**主要素养与水平:** 物质观(Ⅱ)。

**2. 参考解答:** (第一行)无规则的几何外形,无规则的几何外形; (第二行)有确定的熔点,有确定的熔点; (第三行)物理性质各向异性,物理性质各向同性。

**命题意图:** 通过表格对晶体、多晶体、非晶体的性质进行比较、分类,建立全面的知识结构。

**主要素养与水平:** 物质观(Ⅱ)。

**3. 参考解答:** 通过这样的实验过程得出这个结论是不妥的。该同学的实验只对A、B两个点的温度变化做了记录,只能得出“该薄片在OA、OB沿线方向的导热性能是相同的”的结论,而不能确定该薄片在各个方向的导热性能都相同。

**命题意图:** 基于对各向异性的认识,设计实验方案来判断物质是否为晶体。

**主要素养与水平:** 证据(Ⅲ)。

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

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

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

### 问题与思考

1. 各向同性的材料一定是非晶体吗? 举例说明。
2. 根据晶体、非晶体、多晶体的基本性质完成表11-3。

表11-3

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

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

是否可以由这样的过程得出上述结论? 简述理由。

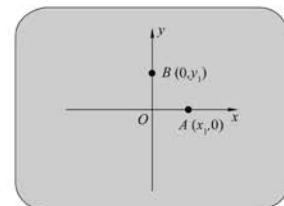


图11-46

## 第六节 材料及其应用简介

人类历史经历了石器时代、青铜器时代、铁器时代等，这种对时代的划分以当时人类[1] 用来制作有用物件的主要材料作为标准。可见，材料是人类赖以生存和生产的物质基础。

### ▶ 新材料

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

新型金属材料密度小、强度高，广泛地应用于航空航天行业。

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

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

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

### ▶ 半导体

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

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

## 本节编写思路

本节内容第一部分主要介绍了新材料的种类和用途，后面的部分主要介绍了半导体和纳米材料这两种典型新材料的特性及其应用。

本节的学习要求学生紧密联系生产、生活实际，通过网络、图书馆或走访相关科研单位调查、收集资料，了解材料科学技术的发展对人类生活和社会进步的影响，拓展学习视野，培养收集信息的能力，激发学习兴趣和创新意识。

## 正文解读

[1] 对于本节课的教学，教师可以提供一些研究课题。例如：固体材料分类、半导体、纳米技术及其应用、等离子体、超导材料、我国在固体材料研究方面的成果等。组织学生分小组，选择一项研究内容，在课前做好相关资料的查找、整理，做好交流文稿，在课堂上以汇报交流的方式完成教学。

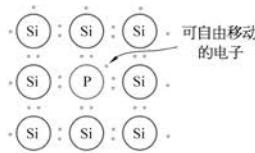


图 11-47 N 型半导体的共价键结构

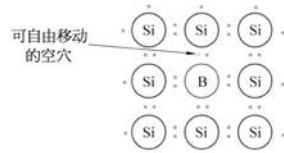


图 11-48 P 型半导体的共价键结构

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

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

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

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

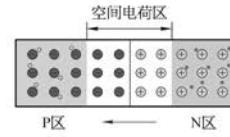


图 11-49 PN 结

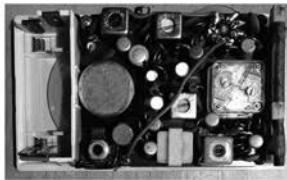


图 11-50 晶体管收音机的内部

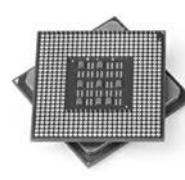


图 11-51 计算机主板的中央处理器 (CPU)

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

**拓展视野**

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

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

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

**▶ 纳米材料**

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

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

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

**STSE**

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

## 问题与思考解读

42 第十一章 气体、液体和固体

**1. 参考解答：**液晶并不是晶体熔化形成的。其结构介于液体和固体之间，既像液体具有流动性和连续性，而其分子又保持着固态晶体特有的规则排列方式，具有光学性质各向异性等晶体特有的物理性质

**命题意图：**认识液晶，纠正日常生活中的错误认知。

**主要素养与水平：**物质观（Ⅱ）。

**2. 参考解答：**乒乓球的直径约为 4 cm，地球的半径约为  $6.4 \times 10^3$  km，根据比例可算出相当于把直径为 3.2 m 的球放在地球上

**命题意图：**通过计算，形成对纳米尺度的形象认识

**主要素养与水平：**物质观（Ⅱ）；科学推理（Ⅱ）。

**3. 参考解答：**手机、数码相机、LED 照明、太阳能电池等 略

**命题意图：**了解半导体材料在生活生产中的应用，激发学习物理的兴趣。

**主要素养与水平：**物质观（Ⅱ）；科学态度（Ⅱ）。

**4. 参考解答：**用纳米材料制作汽车表面，使汽车清洁变得更加方便，将会节约大量的水资源

**命题意图：**了解纳米材料的性能以及目前在衣食住行方面的初步应用，激发创新意识。

**主要素养与水平：**物质观（Ⅱ）；科学态度（Ⅱ）。

模仿荷叶自洁的功能，可以应用表面纳米结构的技术开发出自洁、抗污的纳米涂料。这项技术普及后，不会脏的地板、墙壁和不受灰尘影响的电子产品将会不断地出现，人类的生活也会更加方便、舒适。

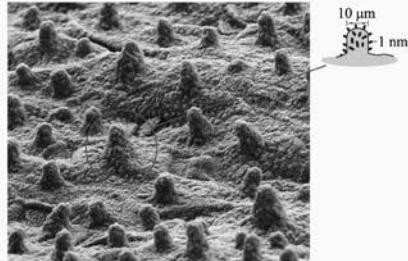


图 11-52 荷叶表面的放大结构

### 问题与思考

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

## 小结

### · 基本概念和基本规律

玻意耳定律：一定质量的气体在温度不变时，压强与体积成反比。

查理定律：一定质量的气体在体积不变时，压强与热力学温度成正比。

盖·吕萨克定律：一定质量的气体在压强不变时，体积与热力学温度成正比。

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

表面张力：使液体表面具有收缩趋势的作用力。

毛细现象：浸润液体在细管中上升和不浸润液体在细管中下降的现象。

### · 基本方法

通过建立气体状态参量的过程，感受类比联想的方法。

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

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

### · 知识结构图



## 复习与巩固解读

44 第十一章 气体、液体和固体

1. 参考解答：与表面张力有关的现象是：

(1)(2)(3) 船舶能漂浮在水面上，此现象是因为船舶排开一定量的水，受到了水的浮力，而不是水的表面张力托起了船。

**命题意图：**用液体表面张力知识解释生活中的现象，培养物理观念。

**主要素养与水平：**物质观(Ⅱ)；运动与相互作用观(Ⅱ)。

2. 参考解答：(1) 错  
(2) 错 (3) 错 (4) 对

提示：铜、冰块尽管没有规则的形状，但它们有固定的熔点，所以都是晶体；石英玻璃没有固定的熔点，所以不是晶体。

**命题意图：**巩固对晶体、多晶体、非晶体的认识。

**主要素养与水平：**物质观(Ⅱ)；科学论证(Ⅱ)。

3. 参考解答：从微观角度看，气体的压强是由分子撞击器壁的速率和单位时间内撞击器壁单位面积的分子数共同决定的。温度恒定、一定质量的气体体积减小时，分子撞击器壁的速率保持不变，单位时间内撞击器壁单位面积的分子数增大，从而导致压强增大。体积恒定、一定质量的气体温度升高时，分子运动的平均速率增大，撞击器壁时的速率就会增大，同时单位时间内分子来回运动的次数增多会造成单位时间内撞击器壁单位面积上的分子数增多，以上两个因素导致压强增大。

**命题意图：**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。

**主要素养与水平：**科学推理(Ⅱ)。

4. 参考解答：当火罐开口端紧压在皮肤上时，罐内封闭了一定质量较高温度的空气，随着温度的降低，罐内空气的压强减小，内外空气的压力差使火罐紧紧地被“吸”在皮肤上。

## 复习与巩固

1. 判断下列哪些现象与液体表面张力有关。

- (1) 雨滴几乎成球形。
- (2) 肥皂泡的形成。
- (3) 毛笔蘸水后，笔头聚拢。
- (4) 船舶能漂浮在水面上。

2. 关于晶体和非晶体，判断下列说法是否正确，并简述理由。

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

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

4. 中医上常用“拔火罐”来治疗某些疾病。将95%酒精棉球点燃后投入火罐内，迅速将火罐开口端紧压在皮肤上，火罐就会紧紧地被“吸”在皮肤上。简述这一现象的成因。

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



图 11-53

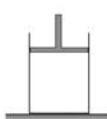


图 11-54

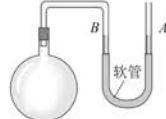


图 11-55

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

7. 如图11-55所示，在烧瓶口插入细玻璃管，管的另一端与汞压强计相连，烧瓶中

**命题意图:** 能用气体实验定律解释生活中的现象。

**主要素养与水平:**

物质观(Ⅱ);运动与相互作用观(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

**5. 参考解答:** 都增

大 初始状态时,汞柱受力平衡,有  $p_1 = p_0 - \rho gh_1$ 。将玻璃管稍向上提起一段距离,若汞柱不动,则管内空气柱长度变大;根据玻意耳定律,管内气体压强会变小,此时汞柱受力不再平衡,向上的力大于向下的力,汞柱向上运动,有更多汞进入玻璃管,所以管内外汞面高度差会增大。重新达到平衡后,有  $p_2 = p_0 - \rho gh_2$ ,因为  $h_2 > h_1$ ,所以  $p_2 < p_1$ ,根据玻意耳定律,管内空气柱长度  $l$  增大

**命题意图:** 能用玻意耳定律定性分析物理问题。

**主要素养与水平:**

运动与相互作用观

(Ⅱ);科学推理(Ⅲ)。

**6. 参考解答:**  $\frac{m_0g + mg}{\rho_0S - mg}h$  初始状态时以活塞为对象讨论其受力平衡,可写出封闭气体的压强为  $p_1 = \rho_0 + \frac{mg}{S}$ ;末状态时以气缸为对象讨论其受力平衡,可得  $p_2 = \rho_0 - \frac{mg}{S}$ ;根据  $p_1Sh = p_2Sh_2$  可求得末状态时活塞距离底部的距离  $h_2$ ,进一步可求出上提距离  $h_2 - h$

**命题意图:** 能结合共点力平衡的知识,用玻意耳定律解决物理问题。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用观(Ⅱ);科学推理(Ⅲ)。

**7. 参考解答:** 为保持气体的体积不变,应向上移动 A 管;为保持气体的压强不变,应向下移动 A 管

封闭着一定质量的气体,气压计 U 形管两臂内的汞面一样高。现将烧瓶浸入热水中,为保持气体的体积不变,应如何移动 A 管?为保持气体的压强不变,又该如何移动 A 管?

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

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

(1) 分析实验图像不经过坐标原点的原因。

(2) 根据上述分析,设计一个测量一颗绿豆体积的实验方案。

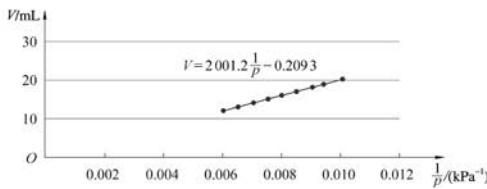


图 11-56

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

(1) 管中水柱的高度随着温度的升高如何变化?

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

(3) 这个温度计的设计有哪些不足之处?



图 11-57

(Ⅱ);科学推理(Ⅲ)。

**6. 参考解答:**  $\frac{m_0g + mg}{\rho_0S - mg}h$  初始状态时以活塞为对象讨论其受力平衡,可写出封闭气体的压强为  $p_1 =$

$\rho_0 + \frac{mg}{S}$ ;末状态时以气缸为对象讨论其受力平衡,可得  $p_2 = \rho_0 - \frac{mg}{S}$ ;根据  $p_1Sh = p_2Sh_2$  可求得末状态时

活塞距离底部的距离  $h_2$ ,进一步可求出上提距离  $h_2 - h$

**命题意图:** 能结合共点力平衡的知识,用玻意耳定律解决物理问题。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用观(Ⅱ);科学推理(Ⅲ)。

**7. 参考解答:** 为保持气体的体积不变,应向上移动 A 管;为保持气体的压强不变,应向下移动 A 管

**命题意图:**能结合共点力平衡的知识,用气体实验定律解决物理问题。

**主要素养与水平:**运动与相互作用观(II);科学推理(III)。

**8. 参考解答:**标准状态时占比为 $\frac{1}{10^5}$ ,压强增大为原来100倍时占比为 $\frac{1}{1000}$ ,此时已不适合将气体视

为理想气体 1个氢气分子的直径 $d=10^{-10}\text{ m}$ ,设分子为球形,其体积为 $\frac{1}{6}\pi d^3\approx 10^{-30}\text{ m}^3$ ,1 mol 氢气中分子的总体积为 $6.02\times 10^{23}\times 10^{-30}\text{ m}^3=6.02\times 10^{-7}\text{ m}^3$ ;标准状态下1 mol 氢气的体积为 $22.4\text{ L}=2.24\times 10^{-2}\text{ m}^3$ ,分子体积占比约为 $\frac{1}{10^5}$ ;当压强升至原来的100倍时,气体体积变为原来的 $\frac{1}{100}$ ,分子体积

占比变为约 $\frac{1}{1000}$ ,此时,气体分子间距离较近,彼此间的相互作用影响变大,且相互间的碰撞变得频繁,所以与标准状态相比,已不太适合再视作理想气体

**命题意图:**通过计算体会分子的体积与气体体积的差别。

**主要素养与水平:**物质观(II);模型建构(II);科学论证(III)。

**9. 参考解答:**(1) 实验中体积的测量是通过注射器针筒上的刻度读出来的,仔细观察教材图11-10中的装置可以发现在注射器和压强传感器之间有一段软管,管内有气体,而读出的体积不包括这部分气体,即所有的体积测量值都比真实值小了 $\Delta V$ ,V轴上负截距的绝对值即 $\Delta V$  (2) 将绿豆放入注射器,再次进行实验。按相同方法处理数据。两次图线在V轴上的截距变化量即绿豆的体积

**命题意图:**培养分析数据、发现其中特点并用已有知识做出解释的能力。

**主要素养与水平:**证据(III);解释(III)。

**10. 参考解答:**

(1) 管中水柱的高度随着温度升高而减小

(2) 温度变化时,管内水面下降会引起封闭气体的体积、压强都变化。设水面下降 $\Delta h$ ,体积的变化量为 $\Delta V=\Delta h S$ ,压强的变化量为 $\Delta p=\rho_{\text{水}} g \Delta h$ 。

因为玻璃泡的容积与鸡蛋大小接近,整根玻璃管长几十厘米, $\Delta h$  约为几厘米,与气体原来的体积相比, $\Delta V$  不能忽略,因此将气体的变化看作等容过程不合适。

大气压强可以支持约10 m高的水柱,所以密闭气体的压强比大气压强略小,几厘米的水面下降引起的气体压强变化与密闭气体的压强相比完全可以忽略,所以可以将气体的变化视为等压过程。

因此甲同学的观点错误,乙同学的观点正确

(3) 这个温度计测量温度范围小,0℃以下就不能测量了;温度读数受大气压影响

**命题意图:**让学生能从实际情境中抽象出合理的物理过程模型,能基于分析、推理获得结论,能对已有的装置提出问题或建议。

**主要素养与水平:**模型建构(IV);科学思维(IV);科学论证(IV);质疑创新(II)。

## 第三部分 本章练习部分解读

### 第一节 气体的状态

1. 见下页表

说 法	判 断	若不正确请说明理由
气体的体积与气体的质量成正比	错误	根据 $\rho = \frac{m}{V}$ , 只有当密度一定时, 气体的体积与质量成正比
气体的体积与气体的密度成反比	错误	根据 $\rho = \frac{m}{V}$ , 只有当质量一定时, 气体的体积与密度成反比
气体的体积就是所有气体分子体积的总和	错误	气体的体积包括所有气体分子的体积总和以及所有分子之间的空间的体积
气体的体积是指气体分子所能达到的空间的大小	正确	

2. B 组成气体的每个分子的运动剧烈程度是不同的, 气体的温度越高, 分子运动的平均速率越大, 所以 A、C 错误, B 正确。在国际单位制中, 温度的单位是开尔文, 摄氏度是常用单位, 所以 D 错误

3. 见下表

说 法	判 断	若不正确请说明理由
气体压强是由于气体分子受到重力产生的	错误	密闭容器内的气体压强是由于大量分子做无规则运动导致频繁碰撞容器壁而产生的, 并非重力所致
气体压强是由于气体分子间的相互作用力(吸引和排斥)产生的	错误	组成气体的分子间距离很大, 分子间的相互作用力可以忽略, 压强不可能因此而产生
气体压强是大量气体分子频繁碰撞容器壁产生的	正确	
当密闭容器自由下落时, 内部气体压强将减小为零	错误	容器自由下落时, 内部分子仍在做无规则运动, 仍频繁碰撞容器壁, 所以压强依然存在

4. C 气体压强是由大量分子无规则运动造成的, 从单个分子角度讨论压强无意义, A、B 错误; 1 Pa 表示瓶内  $1 \text{ cm}^2$  面积上气体产生的压力是  $1 \times 10^{-4} \text{ N}$ , D 错误; 气体处于平衡态时各处压强相等, 故 C 正确

5.  $-273$   $546$   $0$   $20$

6.  $p_1 = p_0$ ,  $p_2 = p_0 + \frac{(M+m)g}{S}$ ,  $p_3 = p_0 + \frac{F-mg}{S}$  根据各种情况下活塞的受力平衡列出等式,

即可求出封闭气体的压强

7.  $p_0$   $p_0 - \rho gl$   $p_0 - \frac{1}{2}\rho gl$   $p_0 - \rho gl$   $p_0 + \rho gl$  各种情况下液体柱受力平衡, 列出等式, 即可求

出封闭气体的压强

## 第二节 气体的等温变化

1. 见下页表

物理量	是否变化	说明理由或举例
分子的平均速率	不变	一定质量的气体在等温变化过程中温度不变,分子的平均速率就不变
单位体积内的分子数	变化	一定质量的气体在等温变化过程中,体积变化导致单位体积内分子数变化
单位时间内撞击容器壁的分子数	变化	单位体积内分子数变化引起单位时间内撞击容器壁的分子数发生变化
容器壁单位面积上受到的压力	变化	单位时间内撞击容器壁的分子数发生变化,导致容器壁单位面积上受到的压力(即压强)变化

2. (1)  $1.25 \times 10^5 \text{ Pa}$  (2)  $25 \text{ N}$  封闭气体的初状态  $p_1 = p_0$ ,  $V_1 = Sl_1$ ; 末状态  $p_2$  未知,  $V_2 = Sl_2$ , 其中  $l_1 = 20 \text{ cm}$ ,  $l_2 = 16 \text{ cm}$ 。根据玻意耳定律即可求出  $p_2$ , 再根据活塞受力平衡  $p_2 S = p_0 S + F$  即可求出  $F$

3. 封闭气体的初状态:  $p_1 = p_0$ ,  $V_1 = SL_0$ ; 末状态: 气缸受力平衡, 故  $p_2 S + Mg = p_0 S$ , 可求出  $p_2 = p_0 - \frac{Mg}{S}$ , 另有  $V_2 = SL$ 。根据玻意耳定律即可求出  $L = \frac{p_0 SL_0}{p_0 S - Mg}$

4.  $p_0 - \frac{\rho gh V}{p_0 + \rho gh}$  封闭气体的初状态:  $p_1 = p_0$ ,  $V_1 = V$ ; 末状态:  $p_2 = p_0 + \rho gh$ ,  $V_2 = V - \Delta V$ 。根据玻意耳定律即可求出  $\Delta V = \frac{\rho gh V}{p_0 + \rho gh}$

5. 增大 初始状态时封闭气体压强  $p$  与外界大气压  $p_0$  间的关系为  $p = p_0 + \rho gh$ 。若试管插入水中深度增大, 可先假设内外水面高度差保持不变, 则封闭气体体积会减小, 根据玻意耳定律可以推断封闭气体的压强会增大, 导致  $p' > p_0 + \rho gh$ , 这个压强关系的变化会导致试管内的水面下降, 重新达到平衡时管内外的水面高度差将会比初始状态大

6. (1)  $p_A < p_0 < p_B$   $a$  管管口处的压强即  $p_0$ , 根据气室  $A$ 、 $B$  以及  $a$  管管口的高度位置即可确定三处的压强大小关系 (2) 保持不变 在其他条件不变的情况下, 药液滴注的速度取决于气室  $B$  内的压强, 而气室  $B$  内的压强  $p_B = p_0 + \rho gh$ ,  $h$  为  $a$  管管口与  $B$  气室的高度差, 保持不变

### 第三节 气体的等容变化和等压变化

1. (a) (c) 气体的等容变化 图(a)中压强与热力学温度成正比, 是等容变化过程, 图(c)可直观看出是一个等容变化过程, 而图(b)可能是等温变化过程, 图(d)是等压变化过程

2. D 半瓶热水上方封闭有一定气体, 气体压强随温度降低而减小, 内外气体产生压力差导致软木塞不易拔出

3.  $t_B = -73^\circ\text{C}$ ,  $t_C = 327^\circ\text{C}$  由图可知  $p_A = 2 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $p_B = p_C = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V_A = V_B = 1 \text{ L}$ ,  $V_C = 3 \text{ L}$ , 另已知  $T_A = 400 \text{ K}$ 。气体从状态  $A$  变化到状态  $B$  为等容过程, 由  $\frac{p_A}{T_A} = \frac{p_B}{T_B}$  可求出  $T_B = 200 \text{ K}$ ; 从状态  $B$  变化到状态  $C$  为等压过程, 由  $\frac{V_B}{T_B} = \frac{V_C}{T_C}$  可求出  $T_C = 600 \text{ K}$

4. 不漏气 瓶内气体初状态时  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{1.5 \times 10^7 \text{ Pa}}{300 \text{ K}}$ , 末状态时  $\frac{p_2}{T_2} = \frac{1.35 \times 10^7 \text{ Pa}}{270 \text{ K}}$ , 经计算可得  $\frac{p_1}{T_1} =$

$\frac{P_2}{T_2}$ , 瓶内气体在体积不变的情况下, 压强与热力学温度的比保持不变, 符合查理定律, 由此可确定气体的质量不变, 即没有漏气

5. 27 °C 将原来室内的空气作为一定质量的气体, 升温的过程可视为等压过程。设初始状态的体积为  $V_0$ , 温度为  $T_0$ , 则末状态的体积为  $V_0 + 1\%V_0 = 1.01V_0$ , 温度为  $T_0 + 3$  K, 由  $\frac{V_0}{T_0} = \frac{1.01V_0}{T_0 + 3}$  可求出  $T_0 = 300$  K

6. 假设两边汞面均不动, 则两边气体各自经历等容过程

$$\frac{P_{左}}{T_{左}} = \frac{P'_{左}}{T'_{左}} = \frac{\Delta P_{左}}{\Delta T_{左}}, \frac{P_{右}}{T_{右}} = \frac{P'_{右}}{T'_{右}} = \frac{\Delta P_{右}}{\Delta T_{右}}$$

另有  $P_{左} < P_{右}, T_{左} = T_{右}, \Delta T_{左} = \Delta T_{右}$

故  $\Delta P_{左} < \Delta P_{右}$ , 右边汞面下降, 左边汞面上升, 重新平衡后两边汞面的高度差增大

7. 封闭气体的状态变化可近似看作等压过程。

- (1) 刻度是均匀的 由  $\frac{V}{T} = \frac{\Delta V}{\Delta T}$  可得  $\Delta V = \frac{V}{T} \Delta T$ , 所以  $\Delta V \propto \Delta T$ , 又因为吸管内部粗细均匀, 所以  $\Delta l \propto \Delta T$  ( $\Delta l$  为吸管上的刻度间距), 因此刻度是均匀的
- (2) 测量范围为 23.35~26.35 °C 测量最小值时, 油柱在吸管最左端; 测量最大值时, 油柱在吸管最右端。根据  $\frac{V_0}{T_0} = \frac{V_{max}}{T_{max}} = \frac{V_{min}}{T_{min}}$ , 将  $V_0 = 360 \text{ cm}^3 + 0.2 \times 10 \text{ cm}^3 = 362 \text{ cm}^3, V_{max} = 360 \text{ cm}^3 + 0.2 \times 20 \text{ cm}^3 = 364 \text{ cm}^3, V_{min} = 360 \text{ cm}^3, T_0 = 298 \text{ K}$  代入, 即可求出  $T_{max} = 299.65 \text{ K}, T_{min} = 296.35 \text{ K}$ , 即测量范围为 23.35 ~ 26.65 °C

## 第四节 液体的基本性质

1. 表面张力 浮力

2. A 雨滴自由下落时处于完全失重状态, 在表面张力作用下表面积趋于最小, 呈球形

3. 见下表

现 象	是否与毛细现象有关	若与毛细现象无关, 说明此现象产生的原因
温度升高时, 酒精温度计中的酒精能沿着玻璃管上升	无关	玻璃泡中的酒精体积随温度升高而变大
煤油灯中油能沿着灯芯上升	有关	
水能顺着树干上升	有关	
托里拆利实验中管内的汞面高于管外的汞面	无关	管外大气压强大于管内气体压强

4. AD 与 P 管壁接触的液面有扩展的趋势, 与 Q 管壁接触的液面有收缩的趋势, 所以液体对 P 管壁浸润、对 Q 管壁不浸润; 浸润液体在细管中上升和不浸润液体在细管中下降的现象都是毛细现象

## 第五节 固体的基本性质

1. D 薄片 P 上的图样说明 P 在各个方向上的导热性能是不同的, 具有各向异性, 所以 P 一定

是晶体。而 Q 显现出各向同性，非晶体和多晶体都表现为各向同性，所以 Q 可能是非晶体，也可能是多晶体

2. 见下表

说 法	判断	说明理由或举例
玻璃块具有规则的几何外形，所以玻璃是晶体	错误	玻璃的几何外形是人工切割出来的，并不是天然形成的，而晶体的几何外形是天然形成的
石蜡没有固定的熔点，所以不是晶体	正确	是否具有固定的熔点是判断晶体和非晶体的依据
熔化的锡可以凝固成任意形状，所以不是晶体	错误	凝固的锡是多晶体，不能用是否具有规则的几何外形来区分多晶体和非晶体

3. 见下表

说 法	判断	说明理由或举例
凡是晶体，其物理性质一定表现为各向异性	错误	多晶体是晶体，但其物理性质表现为各向同性
凡是非晶体，其物理性质一定表现为各向同性	正确	所有非晶体都表现为各向同性
物理性质表现出各向异性的物体，一定是晶体	正确	只有单晶体才会表现出各向异性，所以表现出各向异性的物体一定是晶体
物理性质表现出各向同性的物体，一定是非晶体	错误	物理性质表现出各向同性的物体，可能是非晶体，也可能是多晶体

4. 见下表

说 法	判断	说明理由或举例
同种元素组成的物质，其空间点阵是唯一的	错误	石墨、金刚石都是由碳原子组成的，但具有不同的空间点阵
晶体有规则的外形是由晶体的空间点阵决定的	正确	组成晶体的微粒规则排列，使晶体具有规则的外形
晶体的各向异性是由晶体的空间点阵决定的	正确	空间点阵中沿不同方向物质微粒的数目、间距不同，导致晶体各向异性
组成空间点阵的物质微粒是电子	错误	组成空间点阵的微粒应该是分子、原子、粒子或它们的团簇，而不是电子

5. D

## 第六节 材料及其应用简介

1. BCD

2. 答案供参考，合理即可。

① 超轻质蜂窝增强烧蚀防热材料。密度约为  $0.36 \text{ g/cm}^3$ ，防热效率为每平方米可承受  $1.5 \text{ MW}$  的热流环境，可以通过变厚度优化设计，保证探测器拐角部位能够耐受更严苛的气动载荷，能承受高低温

交变。

② 连续纤维增强中密度防热材料。密度略高,但强度更大,用于探测器大底及背罩防热结构的舱盖、封边环、埋件、螺塞等零部件。

③ 超轻质烧蚀防热涂层材料。密度仅为  $0.28 \text{ g/cm}^3$ ,热导率低至约  $0.06 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ,用于着陆器侧面,热性能优良,也能给着陆器减重。

④ 新型 SiC 增强铝基复合材料。结构材料质量轻、强度高、刚性好、宽温度范围内尺寸稳定。

⑤ 基于形状记忆聚合物智能复合材料。用于太阳能电池系统。该系统基于复合材料力学理论、结构精细化设计和形状记忆聚合物复合材料结构,可以实现柔性太阳能电池的锁紧、释放和展开,以及展开后高刚度可承载等功能

### 3. 略

## 第四部分 本章实验与活动部分解读

### 1. 自主活动 定性探究气体压强与体积的关系

(1) 缓慢推、拉活塞时,手所用的力如何变化?这一变化如何反映气体压强的变化?

**参考解答:** 缓慢推(拉)活塞时,随着气体体积的不断减小(增大),需要的推(拉)力不断增大。以活塞为对象,活塞受到外部的大气压力、内部气体压力、手对活塞的推力和活塞与侧壁间的阻力。缓慢推动活塞时,可近似认为活塞处于平衡状态,所受合力为零。大气压力和阻力可视为不变,手对活塞的推力增大表明内部气体压力增大,即气体压强增大。同理可分析拉动活塞时的情况

**命题意图:** 活动中学生直观感受到的是手用力的变化,在观察并描述实验现象的基础上,通过理论分析,将其与气体压强的变化建立联系。

(2) 推、拉活塞至某一位置后松手,活塞将如何运动?活塞的运动情况如何反映气体压强的变化?

**参考解答:** 推、拉活塞至某一位置后松手,活塞都将向初始位置运动。以活塞为研究对象,松开手后,若不计活塞与注射器之间的摩擦,则活塞受到注射器内封闭气体对活塞的压力和外界大气对活塞的压力方向相反,若封闭气体对活塞的压力大于大气对活塞的压力方向,活塞向外运动,反之向内运动

**命题意图:** 分析活塞的运动和受力情况,进一步体会气体压强与体积的关系。

### 2. 学生实验 探究等温情况下一定质量气体压强与体积的关系

(1) 各组就实验数据进行交流,比较实验结果的异同并分析其原因。

**参考解答:** 各组得到的压强与体积的关系大致相同,但  $pV$  的乘积可能不同。主要原因是各组实验时活塞的初始位置不同,使得气体的质量不同

**命题意图:** 比较多组实验,了解  $pV$  乘积与气体的质量有关。

(2) 压强传感器和注射器连接处的软管内存在气体,若实验时这部分气体的体积未被计入,分析体积的偏差对实验结果可能产生的影响,并提出减小误差的方法。

**参考解答:** 未将连接处气体体积计入,会导致测量的体积偏小,且气体体积越小,偏差越大。减小误差的方法有:① 实验时不要使气体的体积过小;② 可画出  $V - \frac{1}{p}$  图像,纵轴截距的绝对值即为连接处的气体体积大小  $V_0$ ,将实验测量的各组气体体积  $V$  加上  $V_0$  即为封闭气体的总体积

**命题意图:** 分析实验中存在的误差,并设法减小误差。

(3) 交流讨论实验中还有哪些产生误差的原因,并提出减小误差的方法。

**参考解答：**注射器与压强传感器连接处可能漏气或进气，因此实验开始前应尽量插紧。实验时手可能接触注射器有气体的部分，导致气体温度发生变化，因此实验时应避免握在注射器有气体的部分。若推、拉活塞速度太快，封闭气体可能未达到平衡状态，因此操作时应等传感器示数稳定后再记录

**命题意图：**经历实验操作过程后，体会实验步骤中注意事项的意义。

3. 自主活动 观察肥皂膜和棉线的变化

两次实验中，肥皂膜和棉线的变化有什么共同点？根据实验现象能得出什么结论？

**参考解答：**两次实验中剩余部分的肥皂膜均立即收缩，使松弛的棉线绷紧，且始终向着肥皂膜一侧收缩 液体的表面具有收缩趋势。进一步可以推测，在液体和气体的界面上有一种力使液体趋向于收缩

**命题意图：**观察现象，并作出归纳；猜想现象背后的原因。

4. 自主活动 观察浸润和不浸润现象

(1) 根据实验现象，尝试界定“浸润”和“不浸润”。

**参考解答：**液体能附着在固体上的称为“浸润”，不能附着在固体上的称为“不浸润”

**命题意图：**对观察到的现象进行分类。

(2) 某同学根据上述实验现象得出结论“液体与固体接触时，是否发生浸润由固体的性质决定”，评价这位同学所作的论证。

**参考解答：**这位同学的论证不够完整，是否发生浸润由液体和固体的性质共同决定。可运用控制变量法继续实验，用不同液体与同一固体接触，观察是否会发生浸润

**命题意图：**就逻辑严密性对论证过程作出评价。

5. 自主活动 观察毛细现象

根据观察到的现象，可以得出哪些结论？

**参考解答：**玻璃管内的液面高于外部液面，塑料吸管内的液面低于外部液面。无论是玻璃管还是塑料吸管，管内径越小，内外液面高度差越大

**命题意图：**观察并记录现象，并作出归纳。

## 第十二章 热力学定律

### 第一部分 整 章 分 析

#### 学习目标

1. 了解物体的内能以及做功和热传递是改变物体内能的两条途径,了解热力学第一定律和热力学第二定律,理解并运用能量守恒定律和能量转化方向性解释自然现象,加深对能量观念的理解。
2. 通过人类发现热力学第一定律和能量守恒定律的史实,体会实践、挫折和失败对科学发现的意义以及人类探索真理的艰辛。
3. 在运用能量守恒定律和热力学第一定律研究问题的过程中,领悟守恒思想的价值。在能量转化的方向性、热力学第二定律的认识中,体会节约能源、开发新能源的重要意义,培养严谨的科学态度与社会责任等素养。

#### 编写意图

课程标准中对本章内容的要求为:

3. 2. 1 知道热力学第一定律。通过有关史实,了解热力学第一定律和能量守恒定律的发现过程,体会科学探索中的挫折和失败对科学发现的意义。
3. 2. 2 理解能量守恒定律,能用能量守恒的观点解释自然现象。体会能量守恒定律是最基本、最普遍的自然规律之一。
3. 2. 3 通过自然界中宏观过程的方向性,了解热力学第二定律。

本章内容帮助学生在掌握分子动理论和物质三态规律、了解能源和可持续发展内容基础上,进一步学习内能及其变化、热力学第一定律和能量守恒定律,以及热力学第二定律的内容,深化对能量守恒、能量转化方向性的认识,比较系统地了解热力学规律。

本章通过“自主活动”等学生活动栏目,应用分析、推演和类比的方法,引出物体内能的概念,帮助学生了解内能与其他形式能量之间的转化;让学生在学习焦耳研究热和功关系的过程时,了解科学家提出猜想、实验验证、总结归纳得出结论的科学研究方法,同时体会在实验探究过程中控制变量的方法。在“永动机是不可能制成的”这一相关历史探索过程的阐述中,体会人类科学探索的艰辛,体会科学探索中的挫折和失败对科学发展的意义。通过了解热力学第一定律和能量守恒定律及其发现过程,进一步形成能量观念和守恒思想,并运用相关规律解释生产生活中的现象。从能量转化具有方向性的事实,了解热力学第二定律,从而形成节约能源、可持续发展等社会责任感。

本章内容的学习要注重对能量观念的进一步提升,注重在认识科学、技术、社会、环境之间关系的基础上,形成严谨认真、实事求是的科学态度,树立可持续发展的社会责任感。

完成本章内容的学习共需要 3 课时。其中,第一节 1 课时,第二节 1 课时,第三节 1 课时。

## 第二部分 本章教材解读

# 第十二章 热力学定律

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

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

## 本节编写思路

本节以瓦特的高效蒸汽机介绍、“自主活动”“大家谈”等学生活动内容为引导,讨论本节的主题,建立内能的概念,阐释做功和热传递是改变内能的两条途径。

通过回顾分子动理论的基本观点,介绍分子平均动能和分子势能的概念,引出物体内能的概念,明确任何物体都具有内能,而且内能可以与其他形式的能量相互转化。通过压缩气体做功、日常生活中热传递等具体事例,得出物体内能变化的两条途径。

在学习中学生所经历的观察、思辨、解释等过程有助于其掌握研究方法、理解物体的内能及内能改变的两条途径,并解释生活中常见的热现象。

### 第一节 物体的内能

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

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

#### ▶ 物体的内能

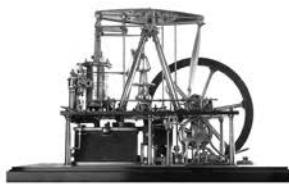


图12-1 瓦特发明的高效率蒸汽机模型

#### [1] 自主活动

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

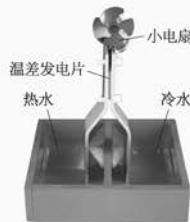


图12-2 温差发电

小电扇为什么能运转呢?使它运转的能量来自哪里?

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

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

式中m为分子的质量,v为分子热运动的速率,E<sub>k</sub>为分子的动能。

### 正文解读

[1] 此处设置“自主活动”是为了让学生通过观察利用水的温差可以把和热相关的能量转化为电能,进而通过电动机做功把电能转化为机械能这一实验现象,提出相关问题,引出本节讨论的主题,即与组成物体的分子的热运动有关的能量——内能,以及内能与其他形式能量之间的转化。

活动可分两步进行:①容器两侧盛放温度相同的水,观察小电扇运转情况;②容器两侧盛放温度不同的水,再次观察小电扇运转情况。

[1] 根据已有的分子动理论基本观点中分子在不停地做无规则运动的知识,得出分子具有动能。而分子热运动的速率大小不一,各分子的动能也有大有小,且在不断变化。因此,需要定义分子平均动能。阐述时须进一步解释在热现象研究时,应关心组成物体的大量分子整体表现出来的宏观热学规律,重要的是所有分子动能的平均值,而不是某个分子动能的大小。

从分子动理论的观点出发,可以把“温度是分子热运动激烈程度的标志”,深化为“温度是物体分子热运动平均动能的量度”。这样,温度这一宏观物理量的微观含义就更清晰了。

[2] 在阐述分子势能时,可用弹簧因具有弹性力而具有弹性势能为类比,通过教材图 12-3 展现出分子间的相互作用力也使分子间存在与其相对距离有关的势能——分子势能。从宏观的角度进一步阐述,当物体的体积变化时,分子间的距离就会发生变化,因而分子势能随之发生变化,从而得出物体的分子势能与物体体积有关的结论。

[3] 此处设置“拓展视野”是为了让学生初步了解物态与组成物质的分子势能与分子平均动能的关系,初步建立物质宏观与微观之间的联系,形成正确的物质和能量观念。

[4] 此处需要说明:①从微观角度看,物体的内能是所有分子动能与分子势能的总和,但不包括这个物体做机械运动时的动能和它在重力场中的势能。②原则上,物体的内能还应该包括其中所有微观粒子的化学能、电离能和原子的核能等能量的总和,但在一般热力学状态变化过程中,物质的分子、原子结构和核结构不发生变化,所以在热力学系统中研究内能时可不考虑这些能量。

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

$$\bar{E}_k = \frac{1}{2} m \bar{v}^2$$

式中  $\bar{v}^2$  是所有分子速率平方的平均值,  $\bar{E}_k$  叫做分子平均动能。

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

做热运动的分子间存在相互作用力,这种作用力仅与分子间的距离有关。当分子间的距离发生变化时,分子间相互作用力会引起由分子间相对位置

[2] 所决定的某种能量的变化,物理学中把这种能量称为分子势能。

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

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

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

综上所述,当  $r=r_0$  时,分子势能  $E_p$  最小。

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

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

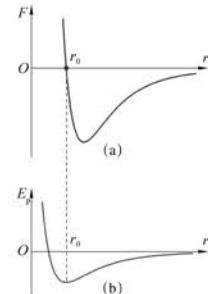


图 12-3 分子间相互作用力和分子势能与分子间距离的关系

### 拓展视野

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

- ①当  $\bar{E}_k \gg E_{pmin}$  时,物质分子将尽可能地充满能占据的空间,物质呈气态;
- ②当  $\bar{E}_k \ll E_{pmin}$  时,物质分子被束缚在尽可能小的空间,物质呈固态;
- ③当  $\bar{E}_k \approx E_{pmin}$  时,物质呈液态。

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

### ▶ 物体内能的变化

[1]

#### 大家谈

将一杯水加热至沸腾，从微观角度分析这杯水内能的变化。

[2]

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

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

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

[3]

#### 自主活动

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



图12-4 压缩气体做功，气体内能增加

从上述活动可以看到，通过压缩气体的方式对气体做功也可以改变气体的内能。

[4]

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

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

快速压下活塞压缩气体，此过程时间很短，可视为绝热变化。外界对气体做功，使气体的内能增大，气体温度迅速升高，达到硝化棉的燃点，出现闪燃。

该活动在教学中起到发现问题、引发学生思考的作用，通过学生对这个问题的解释，可以发现学生对哪些方面的认识是模糊的，以便有针对性地进行后续教学。

[4] 通过回顾初中学过的四冲程柴油机工作过程，了解做功使物体内能变化在生产生活中有普遍的应用，起到承上启下的作用。

[1] 此处设置“大家谈”是为了让学生运用之前所学的分子平均动能、分子势能和内能等概念解释生活中的物理现象，引出内能变化途径的学习。

参考答案：将水加热至沸腾的过程中，水的温度升高，水分子热运动的平均动能和势能均增大，水的内能增加。

[2] 在讨论完上述“大家谈”后，回顾初中已学过的热传递、做功改变内能的实例，使学生在原有知识的基础上进一步学习，提升能量观念。

[3] 此处的“自主活动”内容初中做过类似的，这里再次引用是为了让学生进行更深层次的思考。教师可以通过问题“为何硝化棉在筒内空气被压缩后会被点燃呢？”引导学生从本质上进行解释。

活动时要指导学生

[1] 综上所述，改变物体内能有两条途径：① 做功；② 热传递。同时，通过分析讲解进一步说明，虽然这两条途径都可以改变物体的内能，但本质是不同的，热传递是内能的转移，而做功是其他形式的能量转化为内能。

[2] 此处设置“拓展视野”是通过介绍科学史研究发展历史，让学生从本质上理解“热”，对用分子动理论解释相关热学现象有坚定的信念。同时让学生了解科学家探索自然规律的挫折和艰辛，体会一个正确的物理原理是在实验事实基础上得到论证并建立的。

## 问题与思考解读

**1. 参考解答：**(1) 温度相同说明物体的分子平均动能相同，物体的内能不一定相同 (2) 分子平均动能与物体的温度有关；分子势能与物体的体积有关 (3) 物体内能是物体内所有分子平均动能和分子势能的总和。因分子平均动能与物体温度有关，分子势能与物体体积有关，所以物体内能与物体的温度和体积有关

**命题意图：**通过问题分析，巩固对物体内能、分子平均动能、分子势能等物理概念的理解。

**主要素养与水平：**能量观念(I)。

**2. 参考解答：**(1) 在火炉上烧水是通过热传递增加水的内能 (2) 汽车紧急刹车时轮胎发热是地面与轮胎的摩擦力做功使轮胎的内能增大 (3) 气缸内的气体升温是活塞对气缸内的气体做功使气体内能增大

**命题意图：**运用改变内能的两条途径来判断实际问题。

**主要素养与水平：**能量观念(I)。

[1] 大量事实表明，做功和热传递都可以改变物体的内能。要使一根铁丝温度升高，可以采用加热的方式，也可以用摩擦生热等方式。  
做功过程中，其他形式的能（如机械能）转化为内能；热传递过程中，物体间或物体各部分间的内能相互转移。

### [2] 拓展视野

历史上，为了解释热现象，物理学家曾提出“热动说”和“热质说”两种理论。

热动说认为热是粒子运动的表现，物体由于粒子的剧烈运动而发热。

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

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

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

### 问题与思考

1. 简要回答下列问题：

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

2. 简述下列例子中改变物体内能的方式。

- (1) 在火炉上烧开一壶水。
- (2) 汽车紧急刹车时轮胎发热。
- (3) 柴油机的压缩冲程使气缸内气体升温。

3. 你认为一条瀑布顶端与底端的水温存在差异吗？简述理由。

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

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

**3. 参考解答:** 瀑布顶端与底端的水温存在差异。主要原因是水在下落过程中受到空气阻力的作用，水流与空气摩擦，水的一部分重力势能会转化为水的内能，故水到达底端温度会略有升高

**命题意图:** 在实际情境中运用内能变化规律分析相关物理问题。

**主要素养与水平:** 科学推理(Ⅱ)。

**4. 参考解答:** 由图(a)可知,  $r < r_0$  时, 分子间相互作用力表现为斥力, 当两个分子远离时, 分子间相互作用力做正功, 分子势能  $E_p$  减小, 分子动能  $E_k$  增大;  $r > r_0$  时, 分子间相互作用力表现为引力, 当两个分子继续远离时, 分子间相互作用力做负功, 分子势能  $E_p$  增大, 分子动能  $E_k$  减小

**命题意图:** 根据图像中的信息对分子动能、分子势能变化进行讨论, 巩固对教材图 12-3 的理解。

**主要素养与水平:** 模型建构(Ⅱ); 科学推理(Ⅱ)。

**5. 参考解答:** 这一说法错误。分子动能是分子热运动的表现, 与空气的宏观运动无关; 分子势能是由于分子间存在相互作用力的结果, 是由分子间相对位置决定的, 与空气相对于地面的高度无关

**命题意图:** 通过对问题的判断和分析, 巩固对分子动能、分子势能概念的理解。

**主要素养与水平:** 模型建构(Ⅱ); 科学论证(Ⅱ)。

## 本节编写思路

本节通过焦耳的代表性实验引出本节讨论的主题,建立热力学第一定律和能量守恒定律。

通过对焦耳“热与功”实验的阐述,得出在绝热过程中系统内能的变化与外界对系统做功的等量关系,并强调控制变量是实验探究的重要方法;再根据热传递与物体内能变化的定量关系,总结归纳出热力学第一定律。通过焦耳的另一个实验和第一类永动机的不可制成的介绍,总结归纳得出能量守恒定律。在热力学研究中进一步提升能量观念和守恒思想。

在学习过程中,要了解焦耳在实验中运用了控制变量的思想方法,即绝热条件下有 $\Delta U=W$ ,不做功条件下有 $\Delta U=Q$ 。学生通过学习过程,体会科学家在科学探究过程中实事求是、坚持真理的科学态度,以及不畏艰辛、勇于探索的科学精神。

## 正文解读

[1] 焦耳的实验是热力学定律的奠基性实验,在物理学史上占有重要的地位。本实验的核心是研究做功与内能的关系,要求在绝热环境中是为了减少其他因素的影响。实验是通过重物下落带动叶片搅动水,叶片与水之间的摩擦做功而使水温升高,最终得出它们的等量关系。

焦耳在近40年的时间里共进行了400多次实验,把毕生的精力献给了科学研究事业,焦耳以精确的实验数据说明了热运动与机械运动的等价性,为热力学第一定律和能量守恒定律奠定了实验基础。

## 第二节 能量的转化与守恒

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

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

### ▶ 热力学第一定律

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

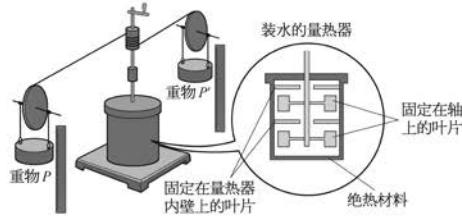


图12-5 焦耳的实验装置

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

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

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

$$\Delta U = W$$

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

$$\Delta U = Q$$

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

## [2] 拓展视野

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

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

$$\Delta U = W + Q$$

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

## [4] 自主活动

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

## [5] 拓展视野

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

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

[1] 研究热与内能的关系时需满足的条件是热力学过程不做功。热量反映物体在状态变化过程中所转移的能量，是在热传递过程中量度系统内能变化的物理量。

[2] 此处设置“拓展视野”是为了让学生了解做功和热传递虽然在本质上是不同的物理过程，但在改变物体内能上有相同的效果，是等价的。

[3] 在热力学第一定律中，要明确  $\Delta U$  是内能的变化量， $W$  是外界对系统做的功， $Q$  是系统从外界吸收的热量。对于物理量正、负号的认识，应结合实例分析引导学生自主归纳。对气体而言要明确，压缩气体是外界对气体做功，气体膨胀是气体对外做功。

“自主活动”是为了通过简单实例应用计算，让学生理解热力学第一定律中三个物理量正、负号的物理意义。

参考答案：由  $\Delta U = W + Q$ ，得  $Q = \Delta U - W = 1.6 \times 10^5 \text{ J} - 2.8 \times 10^5 \text{ J} = -1.2 \times 10^5 \text{ J}$ 。所以系统放出  $1.2 \times 10^5 \text{ J}$  的热量。

[5] 此处设置“拓展视野”是为了让学生了解在研究理想气体状态变化时，如何从微观的角度解释和理解理想气体内能的变化仅表现为气体温度的变化。

[1] 人类对能量守恒的认识经历了曲折的探索过程。人们致力于第一类永动机设计的史实介绍，使学生牢固树立能量不会凭空产生的观念，知道不可能有能够对外做功却又不消耗能量的机器，从而引出对能量守恒定律的学习。同时，体会科学探索的艰辛，体会科学家的挫折和失败对科学发展的意义。

[2] 焦耳的这个实验不同于前一个实验。这个实验是电流通过电阻丝做功发热使水温升高，是电流做功实现能量转化。由此可见，做功方式不同的功导致了相同的结果。通过介绍这个实验，引导学生理解不同的功均可使物体的内能发生改变，如之前的机械能与内能的转化、这里的电能与内能之间的转化。

在此基础上，通过分析阐述，引导学生建立比热力学第一定律更具广泛意义的能量守恒定律，了解能量转化与守恒的规律在更广阔的领域把自然界的各种物质运动与能量转化联系起来，进一步深化运动与能量观念和守恒思想。

### [1] ▶ 第一类永动机是不能制成的

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

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

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

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

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

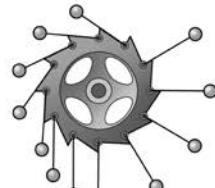


图12-6 第一类永动机  
典型设计

### ▶ 能量守恒定律

[2] 19世纪中叶，焦耳利用图12-5所示的实验装置证明，消耗一定量的机械能，总会得到等量的内能，从而首先揭示了在机械能和内能转化的过程中，总能量是守恒的。不仅如此，焦耳还通过给电阻丝通电使隔热容器中水的温度升高的实验（图12-7），进一步证明在电能和内能的转化过程中，总能量也是守恒的。

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

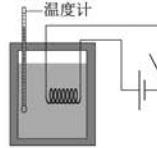


图12-7 电流通过电阻使液体升温

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

### [1] 大家谈

根据图 12-8 中箭头标出的各种能量之间的转化，列举相应的实例。



图 12-8 能量之间的转化

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

### [2] 拓展视野

19 世纪自然科学的三大发现分别是细胞学说、能量守恒定律和生物进化论。

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

#### 问题与思考

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

的总和为物体的内能；热量是热传递过程中内能转移的量度，是一种过程量；温度是分子热运动平均动能的量度，温度越高分子热运动越剧烈，分子平均动能越大。所以，这三个量的物理意义是完全不同的。

当两个物体存在温差时，热量会从高温物体传递到低温物体，两物体的内能可能发生改变。如果两个物体之间只存在热传递，并且与外界不存在能量交换，则它们之间传递的热量等于它们内能的增加或减少。

**命题意图：**巩固对内能、热量、温度这三个物理量的概念的理解。

**主要素养与水平：**能量观念(I)。

**2. 参考解答：**气体绝热膨胀，气体与外界传递的热量  $Q=0$ ，气体体积增大说明气体对外做功  $W<0$ ，根据热力学第一定律  $\Delta U=W+Q$ ，有  $\Delta U<0$ ，所以气体内能减小。

[1] 此处设置“大家谈”是通过列举生产生活中能量转化的实例，让学生直观感受各种运动对应各种能量，各种能量通过各类功实现相互转化。

参考答案：① 内能—机械能：蒸汽机、摩擦生热；② 机械能—电能：发电机、电动机；③ 内能—电能：温差发电、电热器；④ 内能—化学能：化学反应；⑤ 化学能—电能：化学电池、电解反应；⑥ 核能—内能：核反应。

[2] 此处设置“拓展视野”是为了让学生了解能量守恒定律建立的重要性和历史地位，感受其在人类文明发展中发挥的作用。

#### 问题与思考解读

**1. 参考解答：**物体是由大量分子组成的，物体内所有分子热运动的动能和分子势能

气体吸热并膨胀,  $Q > 0$ , 气体体积增大说明气体对外做功  $W < 0$ , 根据热力学第一定律  $\Delta U = W + Q$ , 当吸收的热量大于对外做的功时气体内能增大; 当吸收的热量小于对外做的功时气体内能减小。

**命题意图:** 运用热力学第一定律分析气体状态变化过程的内能变化。

**主要素养与水平:** 科学推理(Ⅱ)。

**3. 参考解答:** 木块沿斜面匀速下滑过程中, 受到重力、斜面的支持力和摩擦力的作用。其中重力做正功, 木块的重力势能减小; 木块匀速下滑说明其动能保持不变, 所以木块的机械能减小。又因木块克服摩擦力做功, 故有部分机械能转化为内能, 所以木块机械能减小、内能增加。

**命题意图:** 在实际机械运动情境中分析物体内能的变化, 巩固对能量守恒定律的理解。

**主要素养与水平:** 科学推理(Ⅱ)。

**4. 参考解答:** 在物体物态不变的前提下, 根据热力学第一定律  $\Delta U = W + Q$ , 在物体放热( $Q < 0$ )的同时, 对物体做相等的正功( $W > 0$ ), 可保持物体的内能不变, 即物体的温度保持不变。

**命题意图:** 运用热力学第一定律解决实际问题。

**主要素养与水平:** 科学推理(Ⅱ)。

**5. 参考解答:** 他摄入的能量  $E = \frac{110}{100} \times 500 \text{ kJ} = 550 \text{ kJ}$ 。设高中生所受的重力  $G = mg = 550 \text{ N}$ , 需要爬  $h$  高的楼, 才能消耗这些能量, 由  $E = mgh$ , 得  $h = \frac{E}{mg} = \frac{550 \times 10^3}{550} \text{ m} = 1000 \text{ m}$ 。设一般住宅大楼每层楼高  $h_1 = 3 \text{ m}$ , 则他需要爬  $n = \frac{h}{h_1} = \frac{1000}{3} \approx 333$  层楼才能消耗此次摄入的能量。

**命题意图:** 对实际问题的计算和解决, 体会能量守恒定律的重要意义。

**主要素养与水平:** 模型建构(Ⅱ); 科学推理(Ⅲ)。

## 本节编写思路

本节通过已学习的能量转化具有方向性这一观点，建立热力学第二定律和能量耗散与退降的观念。

通过电冰箱工作可以把热量从低温环境转移到高温环境实例的讨论，引出热力学第二定律的克劳修斯表述；再通过对热机工作原理的阐述和热机工作效率的分析，引出热力学第二定律的开尔文表述；最后通过生活中能量转化的实例分析能量转化的方向性，进而提出能量的耗散与退降的观点。

在学习过程中，要体验从物理学的视角对客观事物的本质、规律和相互关系进行分析思考、推理论证进而得出结论，并提出创造性的见解；养成保护环境、推动可持续发展的社会责任意识。

### 第三节 能量转化的方向性

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

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

#### ▶ 热力学第二定律

[1]

#### 大家谈

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

[2]

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

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

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

[3]

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

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

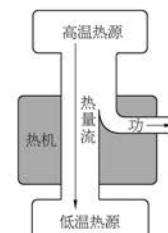


图12-9 热机中的能量流动

“大家谈”是提出问题让学生在“热传递具有方向性”和“电冰箱工作过程”的矛盾中进行思考和讨论，引出热力学第二定律的克劳修斯表述。

[2] 用电冰箱工作这一典型例子来说明热力学第二定律的克劳修斯表述是最直观的。冰箱虽然把热量从低温的冰箱内部传到了外界的空气中，但这不是自发的，而是由压缩机工作实现的，如果没有压缩机做功，冰箱就不可能制冷，即不能把热量从冰箱内的低温处传到冰箱外的高温处。

[3] 通过对热机的效率存在极限的讨论，分析蒸汽机、内燃机等热机的工作原理，引出下文。

## 正文解读

[1] 此处设置“大

家谈”是提出问题让学生在“热传递具有方向性”和“电冰箱工作过程”的矛盾中进行思考和讨论，引出热力学第二定律的克劳修斯表述。

[1] 通过对热机工作原理的分析与阐述，引导学生理解热力学第二定律的开尔文表述，进一步提升能量（转化规律）观念。热机工作时由于处于高温状态，必然向周围环境散热；另外，热机工作时的机械摩擦也会损失一部分热量；还有更重要的部分是热机工作时需要把燃烧后的废气排出，排出的废气会带走大量的热量。因此，热机工作时不可能把燃料燃烧产生的内能全部转化为机械能。

[2] 此处设置“拓展视野”是为了让学生简单了解违反热机工作原理的第二类永动机的设计及其运转的失败，从而说明热力学第二定律开尔文表述的正确性。

[3] 此处设置“大家谈”是为了让学生复习上述热力学第二定律的内容，同时为阐述能量的耗散与退降做铺垫。

参考答案：克服摩擦力做的功可以完全转化为热量。根据热力学第二定律的开尔文表述，要利用某一热源的热量对外做功，必须有部分热量流到低温热源，这部分热量是必须损失的。因此，热量不能完全转化为功。（这里阐述的是热机工作原理，是循环过程。如果有人提出“理想气体等温膨胀过程，气体吸收的热量全部用来对外做功”这一问题，则应说明这个过程不是循环过程，与热机工作过程进行比较是不合适的）

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

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

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

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

## [2] 拓展视野

从单一热源吸热使之完全变为有用功而不产生其他影响的热机称为第二类永动机。

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

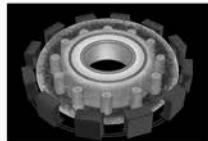


图12-10 嘎姆吉的永动机

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

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

### ▶ 能量的耗散与退降

## [3]

### 大家谈

克服摩擦力所做的功可以完全变成热量，热量能不能完全转化为功呢？

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

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

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

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

### 问题与思考

1. 有同学把热力学第二定律理解为“功可以全部转化为热量，但热量不能全部转化为功”，或“热量能从高温物体传到低温物体，但不能从低温物体传到高温物体”。这些理解对吗？为什么？
2. 根据热力学第二定律解释以下过程能否发生。
  - (1) 打开杯盖后，杯中的茶水会自动变得更热。
  - (2) 蒸汽机把蒸汽的内能全部转化成机械能。
  - (3) 空调通电后热量从温度较低的室内流向温度较高的室外。
3. 判断下列过程是否可逆。
  - (1) 密闭容器内有一隔板把容器均匀分为两半，一半充有气体，另一半被抽成真空。突然把隔板抽去，气体将均匀地充满整个容器。
  - (2) 将气缸内的活塞缓慢拉开，使缸内气体体积增大一倍。
4. 把一个被压瘪的乒乓球浸入开水中即可重新鼓起来。这一过程中，乒乓球是否从单一热源吸热对外做功？这违反热力学第二定律吗？简述理由。
5. 判断以下关于利用海水内能做功的说法是否违反热力学第二定律，并简述理由。
  - (1) 将海水温度降低时放出的热量全部用来做功。
  - (2) 利用海洋中不同深度处海水温度的差异将海水的内能变成功。

对热力学第二定律内容的理解。

**主要素养与水平：**能量观念(I)。

**2. 参考解答：**(1) 不会发生。通常环境温度比茶水温度低，打开杯盖后，根据能量转化的方向性，热量只会从茶水自发地传向周围环境。如要使茶水变得更热，必须对茶水传递热量或消耗其他能量来对它做功。(2) 不会发生。根据热力学第二定律的开尔文表述，蒸汽机做功必定有部分能量传到低温热源而不能全部用来转化为机械能。(3) 可以发生。根据热力学第二定律的克劳修斯表述，只要空调压缩机消耗电能做功，热量可以从温度较低的室内流向温度较高的室外。

**命题意图：**学会运用热力学第二定律的基本观点分析生活中的实际问题。

**主要素养与水平：**能量观念(I)；科学推理(II)。

[1] 此处要让学生明白，正是因为内能无法100%转化为机械能，所以能量转化是有方向性的，能量在转化过程中可利用的价值将减小。学生要结合必修教科书中学习的内容，搞清楚能量和能源是两个不同的概念，树立节约能源、可持续发展的社会责任意识。

### 问题与思考解读

**1. 参考解答：**① 功可以完全转化为热量，但根据热力学第二定律，热机工作（循环过程）时热量要转化为功会引起其他变化，要损失部分热量，所以第一个理解正确。② 根据热力学第二定律的克劳修斯表述，热量可以从低温热源传到高温物体，只是需要外界做功而消耗其他能量，所以第二个理解错误。

**命题意图：**通过对这两个问题的辨析巩固

**3. 参考解答:** (1) 此过程不可逆。这一过程是气体的自由膨胀,具有方向性,若要让气体回到原来的半个容器中,需要外界对其做功,但不能自发进行 (2) 此过程可逆。原来体积增大过程是气体对外做功的过程。现在缓慢压缩气体使其恢复原来的体积是活塞对气体做功的过程

**命题意图:** 通过运用热力学第二定律对问题的分析和推理,了解某些热力学过程的不可逆性。

**主要素养与水平:** 科学推理(Ⅱ)。

**4. 参考解答:** 乒乓球不是从单一热源吸收热量对外做功,故不违反热力学第二定律。因为乒乓球内部气体受热升温压强增大,对外膨胀做功,使乒乓球重新鼓起来,在这个过程中,有能量传到低温热源——乒乓球内部的气体温度升高内能增大,所以它不是把吸收的热量全部用来对外做功,此过程不违反热力学第二定律

**命题意图:** 学会运用热力学第二定律的基本观点分析生活中的实际问题。

**主要素养与水平:** 模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

**5. 参考解答:** (1) 违反热力学第二定律。根据热力学第二定律的开尔文表述,利用海水降温放出的热量对外做功必定需要低温热源,让部分热量传到低温热源处,故不能把热量全部用来做功 (2) 不违反热力学第二定律。因为“不同深度海水温度的差异”满足了有高温热源(温度较高的海水)和低温热源(温度较低的海水)。高温海水的内能一部分用来对外做功,另一部分内能传给了低温海水

**命题意图:** 学会运用热力学第二定律的基本观点分析科技生产中的实际问题。

**主要素养与水平:** 能量观念(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

## 学期 活动

**[1]** 研究“饮水鸟”的原理并制作一个“饮水鸟”玩具。

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

轻按鸟头，让它“喝”一口水，饮水鸟就会直立、抬头，并不断地自动点头喝水。

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

活动要求：

- (1) 查阅相关资料，了解饮水鸟的工作原理。
- (2) 收集器材，进行制作。
- (3) 归纳总结，撰写研究报告。
- (4) 以制作成品与研究报告的形式进行展示与交流。



图 12-11 饮水鸟

**[1]** 这是一个以制作为主的研究活动。要求学生首先根据所学知识，查阅相关资料，了解“饮水鸟”的工作原理。然后设计方案，收集制作材料，制作一个“饮水鸟”玩具。最后撰写研究、制作的报告，形成交流展示的电子演示文稿，做集体交流展示。

通过本活动，学生应了解理论研究和实验制作的一般过程，知道基于物理原理设计实验制作方案，知道如何选择合适的器材进行制作，提升探究、解释、反思、交流等科学探究能力。本活动需要小组分工协作完成。

## 小结

### · 基本概念和基本规律

温度：物体分子热运动平均动能的量度。

内能：物体内部所有分子热运动的动能和分子势能的总和。

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

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

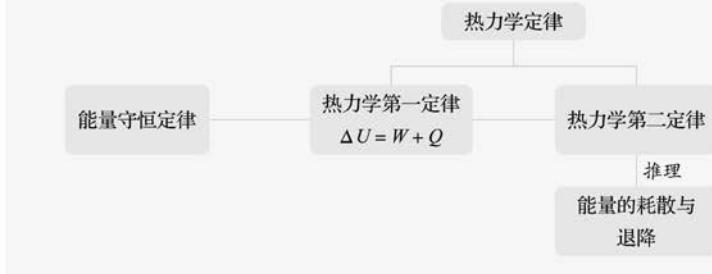
热力学第二定律的克劳修斯表述：不可能把热量从低温物体传到高温物体，而不引起其他变化。

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

### · 基本方法

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

### · 知识结构图



## 复习与巩固解读

60 第十二章 热力学定律

### 复习与巩固

- 在日常生活中，有人将热量、内能、温度等不同物理概念一概称为“热”。指出以下用语中的“热”分别指哪个概念。
  - (1) 摩擦生热；(2) 热水；(3) 热功当量。
- 判断下列过程中改变物体内能的方式。
  - (1) 用锯子锯木料时锯条温度升高。
  - (2) 阳光照在物体上，物体温度升高。
- 空气压缩机在一次压缩过程中，活塞对空气做功为  $1.2 \times 10^5 \text{ J}$ ，空气的内能增加了  $8 \times 10^4 \text{ J}$ ，求此过程中空气与外界交换的热量。
- 冬季寒风呼啸，风大表示空气分子运动的速率大，寒冷表示空气的温度低，即表示空气分子的平均动能小。两者是否矛盾？简述理由。
- 一同学说：给自行车轮胎打气时气筒变热，其原因是活塞与气筒壁摩擦产生的结果。此说法是否正确？简述理由。
- 分析说明一定质量的理想气体经历下列过程后内能的变化情况。
  - (1) 等压膨胀；(2) 绝热膨胀；(3) 吸热膨胀。
- 有人认为热机工作过程中放出的热量完全是热机机件之间的摩擦所致。试对此作出判断并简述理由。
- 一辆在高速公路上匀速行驶的汽车内部的能量流动如图 12-12 所示。

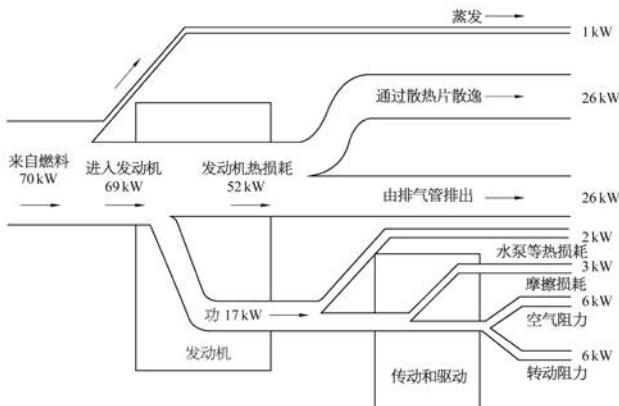


图 12-12

- 参考解答：两者不矛盾。风大时空气分子运动的速率大是机械运动的动能大，阐述的是宏观的机械运动规律；而寒冷温度低是表示空气分子热运动的平均动能小，阐述的是微观的分子运动规律。

**命题意图：**通过两个问题的辨析巩固对分子平均动能概念的理解。

**主要素养与水平：**能量观念(Ⅱ)。

- 参考解答：不完全正确。打气过程中活塞与气筒壁摩擦做功是使气筒变热的原因之一。还有一种原因是在打气过程中活塞压缩气筒内空气做功，气筒内部空气内能增大温度升高，再通过热传递使气筒壁变热。如果活塞与气筒壁间润滑良好，则以后一种原因为主。

**命题意图：**运用物理原理分析并解释生活中的实际热学过程。

**主要素养与水平：**科学推理(Ⅱ)。

- 参考解答：(1) 内能 (2) 温度 (3) 热量

**命题意图：**辨析物理学中关于“热”的不同含义。

**主要素养与水平：**能量观念(Ⅰ)。

- 参考解答：(1) 通过做功改变锯条的内能 (2) 通过热辐射(热传递方式之一)改变物体的内能

**命题意图：**了解生活中实际改变内能的方式。

**主要素养与水平：**能量观念(Ⅰ)。

- 参考解答：根据热力学第一定律  $\Delta U = W + Q$ ,  $Q = \Delta U - W = 8 \times 10^4 \text{ J} - 1.2 \times 10^5 \text{ J} = -4 \times 10^4 \text{ J}$ 。所以空气向外界释放的热量为  $4 \times 10^4 \text{ J}$

**命题意图：**运用热力学第一定律分析实际的热学过程。

**主要素养与水平：**科学推理(Ⅱ)。

**6. 参考解答:** (1) 根据理想气体气态方程  $\frac{pV}{T} = C$ , 等压膨胀过程中压强  $p$  不变、体积  $V$  增大, 则温度  $T$  升高, 即气体分子热运动平均动能增大。因为理想气体没有分子势能, 所以一定质量的理想气体在等压膨胀过程中内能增大。  
 (2) 一定质量的理想气体绝热膨胀过程,  $Q = 0; V$  增大, 所以  $W < 0$ 。根据热力学第一定律  $\Delta U = W + Q$ , 得  $\Delta U < 0$ , 气体内能减小。  
 (3) 一定质量的理想气体吸热膨胀过程,  $Q > 0; V$  增大, 所以  $W < 0$ 。根据热力学第一定律  $\Delta U = W + Q$ , 当  $Q > |W|$ , 即气体吸收的热量大于对外做的功时, 有  $\Delta U > 0$ , 气体内能增大; 当  $Q < |W|$ , 即气体吸收的热量小于对外做的功时, 有  $\Delta U < 0$ , 气体内能减小; 当  $Q = |W|$ , 即气体吸收的热量等于对外做的功时, 有  $\Delta U = 0$ , 气体内能不变。

**命题意图:** 运用热力学第一定律分析理想气体状态变化过程中的内能变化情况。

**主要素养与水平:** 模型建构(Ⅱ); 科学推理(Ⅱ)。

**7. 参考解答:** 此人的观点错误。根据热力学第二定律, 热机工作时, 高压气体推动活塞对外做功过程中必须有热量从气缸内的气体(高温热源)流向气缸外的空气(低温热源)。热机对外做功要放出的热量主要来于此, 而不是由于机件摩擦而产生的热量。

**命题意图:** 运用热力学第二定律的基本观点对错误说法进行辨析和解释。

**主要素养与水平:** 科学推理(Ⅱ); 科学论证(Ⅱ)。

**8. 参考解答:** (1) 发动机的输出功率为  $17 \text{ kW}$ 。根据图中显示的数据, 汽车行驶时发动机牵引力需

- (1) 分析汽车发动机的输出功率为多少, 并说明理由。  
 (2) 尝试提出一个关于汽车行驶时能量转化的问题, 并作出解释。

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

\*10. 一定质量的理想气体, 分别经过等压变化与等容变化过程升高相同温度。

- (1) 通过分析比较气体在上述两种过程中从外界吸收的热量。  
 (2) 根据(1)的结果, 你认为初中课程中关于物质比热容的概念应做怎样的修改或补充?

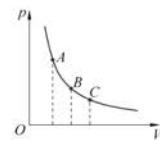


图 12-13

克服水泵等热损耗、摩擦损耗、空气阻力和转动阻力做功,所以发动机的输出功率为这四部分消耗的功率之和,为  $2 \text{ kW} + 3 \text{ kW} + 6 \text{ kW} + 6 \text{ kW} = 17 \text{ kW}$  (2) 例如:根据能量流动数据,能否计算汽车行驶的最大速度?解释:如果已知汽车行驶时受到的各类阻力之和  $F$ ,根据图中克服这些阻力消耗的功率,就可通过  $P = Fv$  求出汽车行驶的最大速度(问题合理,解释正确即可)

**命题意图:**通过对汽车能量流动数据的分析和计算,学会用热力学定律的基本观点解决实际问题。

**主要素养与水平:**科学推理(III);问题(III);解释(III)。

**9. 参考解答:**理想气体的内能只与温度有关,等温膨胀过程气体对外做功、内能不变,根据热力学第一定律  $\Delta U = W + Q$ ,有  $Q = -W$ ,即气体从外界吸收的热量等于它对外界所做的功。又因  $W = \bar{p} \Delta V$ ,气体压强  $\bar{p}_{AB} > \bar{p}_{BC}$ ,体积变化  $\Delta V$  相等,则气体对外界做功  $|W_{AB}| > |W_{BC}|$ ,所以两过程吸热  $Q_{AB} > Q_{BC}$

**命题意图:**运用热力学第一定律综合分析理想气体状态变化过程中的做功、热传递、内能变化等情况。

**主要素养与水平:**模型建构(III);科学推理(III)。

**10. 参考解答:**(1)一定质量的理想气体经历等压升温过程,压强  $p$  不变、温度  $T$  升高,根据气体气态方程  $\frac{pV}{T} = C$ ,体积  $V$  增大,气体对外做功,所以有  $\Delta U > 0, W < 0$ ;当它经历等容升温过程,体积  $V$  不变,  $W = 0$ ,温度  $T$  升高,  $\Delta U > 0$ 。当两个过程升高相同的温度,它们内能的增量  $\Delta U$  相等的情况下,等压过程气体要对外做功,等容过程不对外做功,根据热力学第一定律  $\Delta U = W + Q$ ,可得等压过程吸收更多的热量  
(2)比热容的定义为单位质量的某种物质温度升高(或降低)1℃吸收(或放出)的热量。从(1)的结论可以发现,同样1kg理想气体的温度升高1℃时,等压过程和等容过程吸收的热量不相等,说明气体等压变化和等容变化的比热容是不同的。因此,在研究气体时,应该分别定义定压比热容和定容比热容

**命题意图:**运用热力学第一定律和理想气体状态方程综合分析理想气体状态变化过程中做功、热传递、内能变化的情况,并在得出结论后能提出创造性的见解。

**主要素养与水平:**科学推理(IV);质疑创新(IV)。

## 第三部分 本章练习部分解读

### 第一节 物体的内能

- 组成物体的所有分子热运动的动能的平均值为分子平均动能。温度越高,分子热运动越剧烈,分子平均动能越大,温度是物体分子热运动平均动能的量度
- 物体内所有分子热运动的动能和分子势能的总和为物体的内能
- 见下表

说 法	判 断	说明理由或举例
只要物体的温度不变,它的内能就不变	错误	内能是物体内所有分子的动能和分子势能的总和,宏观上取决于温度和体积
热传递可以改变物体的内能,所以热量和内能本质上是相同的	错误	热量是热传递过程中内能转移的量度,是过程量;内能是物体内所有分子的动能和分子势能的总和,是状态量

(续表)

说    法	判    断	说明理由或举例
分子的内能等于这个分子的势能和动能的总和	错误	内能是物体内所有分子的动能和分子势能的总和,内能是宏观量,是针对物体的
做功和热传递在改变物体内能的效果上是等效的	正确	做功和热传递改变物体内能的实质不同,但效果上是等效的

4. (1) 对水加热使其内能增加 (2) 对铁丝做功使其内能增加 (3) 铁丝放出热量内能减少

5. 设铅弹的质量为  $m$ , 铅弹动能的 70% 转化为铅弹的内能使其温度升高, 有  $\frac{1}{2}mv^2 \times 0.7 = cm\Delta t$ , 则

$$\Delta t = \frac{0.7v^2}{2c} = \frac{0.7 \times 180^2}{2 \times 1.3 \times 10^2} \text{ } ^\circ\text{C} \approx 87.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## 第二节 能量的转化与守恒

1. D 能量守恒定律是自然界普遍遵循的规律,适用于一切能量转化和转移过程,故 D 正确,A、B、C 错误

2. 根据热力学第一定律,  $\Delta U = W + Q = 1.2 \times 10^3 \text{ J} - 200 \text{ J} = 1 \times 10^3 \text{ J}$ 。所以空气内能增加  $1 \times 10^3 \text{ J}$

3. ② 凳子下压过程中,气体体积减小,外界对气体做功,气体与外界无热交换,根据热力学第一定律可得气体内能增加,温度升高;又因气体体积减小,根据理想气体状态方程可得压强增大,故②正确

4. 因大气压强不变,越接近湖面湖水温度越高,故气泡上升过程中压强减小、温度升高,根据理想气体状态方程可得气体体积增大,所以气泡对外做功;因气泡温度升高,故内能增大;由热力学第一定律  $\Delta U = W + Q$  可知,气泡内气体必定从外界吸收热量

5. (1) 气瓶中气体经历等温过程,有  $p_1V_1 = p_2V_2$ , 其中  $V_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ,  $V_2 = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3 + 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ,  $p_2 = p_0 + \rho gh = 1.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 代入可得  $p_1 = 7.5 \times 10^5 \text{ Pa} = 7.5p_0$  (2) 气体温度保持不变,  $\Delta U = 0$ , 体积增大,  $W = -p_2\Delta V = -1.5 \times 10^5 \times 4 \times 10^{-3} \text{ J} = -600 \text{ J}$ , 由热力学第一定律  $\Delta U = W + Q$  可得  $Q = 600 \text{ J}$ , 即气体膨胀过程吸收 600 J 的热量

## 第三节 能量转化的方向性

1. ① 摩擦双手产生热量;② 当手握住冰块时感到冰凉,热量从手传递到冰块

2. 见下表

说    法	判    断	说明理由或举例
一切热机的效率都小于 1	正确	热力学第二定律的开尔文表述
气体可以自由膨胀,也能自动收缩	错误	气体自由膨胀不可逆,不能自动收缩
功可以全部转化为热量,但热量不能全部转化为功	正确	根据热力学第二定律,功可以全部转化为热,但热转化为功需要有低温热源,部分热量要损失
热量可以从高温物体传到低温物体,但不能从低温物体传到高温物体	错误	根据热力学第二定律,热也可以从低温物体传到高温物体,只是需要消耗其他能量

(续表)

说 法	判 断	说明理由或举例
机械能可以全部转化为内能,内能也可以全部转化为机械能而不引起其他变化	错误	根据热力学第二定律,内能全部转化为机械能还需要消耗其他能量

3. 能源是能够提供某种形式能量的物质。根据热力学第二定律,能量的转化具有方向性,能源被利用时虽然能量不会减少,但能量会退降,我们在利用诸如煤炭、石油、天然气等能源时其可利用的价值在减少,而地球蕴藏的这些能源又是有限的,所以我们要节约能源

4. 由图中可知,发动机输入功率为  $69 \text{ kW}$ 。汽车克服水泵等热损耗、摩擦损耗、空气阻力和转动阻力做功的功率为  $2 \text{ kW} + 3 \text{ kW} + 6 \text{ kW} + 6 \text{ kW} = 17 \text{ kW}$ , 此为发动机输出功率,则发动机的工作效率为  $\eta = \frac{P_{\text{出}}}{P_{\text{入}}} \times 100\% = \frac{17}{69} \times 100\% \approx 24.6\%$

## 第四部分 本章实验与活动部分解读

### 1. 自主活动 观察温差发电现象

尝试在两侧盛放温度相同的水,观察小电扇是否会运转。分析使小电扇运转的电能的来源。

**参考解答:** 若两侧盛放温度相同的水,小电扇不会转动 根据实验现象可知,只有当两侧的水有温度差时才能产生电能,可以猜想电能来自水的内能

**命题意图:** 进一步理解“温差发电”的原因;分析现象背后的原因。

### 2. 自主活动 做功改变气体内能

活动中观察到了哪些现象?如何解释观察到的现象?

**参考解答:** 主要的现象有:①快速压下活塞的瞬间可以观察到硝化棉(脱脂棉花)出现闪燃;②在筒壁上贴测温纸可发现筒壁发热 快速压下活塞压缩气体时,由于时间很短,可以视为绝热变化。外界对气体做功,使气体的内能增大,气体温度迅速升高。当温度升至硝化棉(脱脂棉花)的燃点就会出现闪燃。同时,气体与筒壁之间的热传递使筒壁温度升高

**命题意图:** 观察并记录现象,鼓励学生进行充分的观察;分析现象背后的原因,建立过程模型。

# 第十三章 原子结构

## 第一部分 整 章 分 析

### 学习目标

1. 通过 J. J. 汤姆孙发现电子的实验、原子的“枣糕模型”、 $\alpha$  粒子散射实验、原子核式结构模型，了解人类探索原子结构的历程。
2. 知道玻尔原子模型的主要内容；知道氢原子的能级结构和氢原子光谱，以及玻尔理论对氢原子光谱的解释；了解玻尔原子模型的局限性。
3. 感悟建立模型、实验验证的科学方法，理解物理模型在物理学研究工作中的地位和作用。

### 编写意图

课程标准中对本章的“内容要求”为：

3. 3. 1 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。

3. 3. 5 了解人类对物质结构的探索过程。

本章以课程标准规定的内容为载体，突出探索物质微观结构过程中有别于传统的物理观念和思想方法；展现科学探究中求真务实的科学精神。本章内容是学习第十四章、第十五章的基础。

本章内容为学习微观粒子波粒二象性、原子核等内容奠定知识基础，并有助于提升学生的物理观念、发展科学思维和科学探究的能力。

完成本章内容的学习，共需要 3.5 课时，其中第一节 1 课时，第二节 1 课时，第三节 1.5 课时。

## 第十三章 原子结构

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

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

## 本节编写思路

本节展现物理学家发现电子的曲折历程。

1. 通过物理学界关于阴极射线本质的争论,展现基于实验事实的质疑和探究。

2. 通过 J. J. 汤姆孙对阴极射线的研究,呈现“科学思维”“科学探究”“科学态度与责任”的综合作用。

了解和体验电子发现过程中的主要工作,有助于学生科学思维能力的提升。

## 正文解读

[1] 引入部分简述原子论在科学和哲学层面的含义。应该注意到,古今中外关于物质是否具有基本单元的问题一直就有两种截然不同的观点。

[2] 阴极射线的发现反映了科学与技术之间互为因果的关系,具体内容见本节的“资料链接”。有关阴极射线本质的研究持续了近 20 年,其中包含大量的质疑、推理、论证和创新的事例。有关内容可参考本节的“资料链接”。

[3] “自主活动”引导学生运用此前学过的知识,通过最快捷的方式体验阴极射线的电性。学生可通过改变靠近射线管的磁极和磁极与射线管的距离,观察射线管内亮迹的变化。

### 第一节 电子的发现

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

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

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



图 13-1 阴极射线

演示装置

#### ▶ 阴极射线的本质

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

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



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

#### [3] 自主活动

将条形磁体靠近阴极射线管,观察亮迹的变化,并分析原因。

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

### ► 电子的发现

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

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

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



图 13-3 静电偏转管

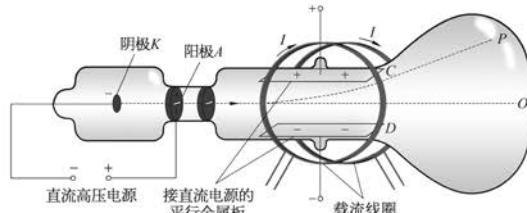


图 13-4 用静电偏转管测电子的比荷

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

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

[1] J. J. 汤姆孙的另一种方法是, 根据阳极的温度变化和比热容计算粒子的动能, 再由阴极射线在磁场中偏转的曲率半径, 推算出阴极射线的比荷与速度。两种方法所得到的比荷测量值接近。

[2] 如图 1 所示, 设粒子的电荷量绝对值为  $e$ 、质量为  $m$ 、进入偏转电场时的初速度为  $v_0$ 、离开电场时的速度为  $v$ 。粒子在偏转电场中做类平抛运动, 离开偏转电场后做匀速直线运动, 则

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{v^2 - v_0^2}}{v_0} = \frac{eUl}{mv_0^2 d} \quad (1)$$

粒子无偏转地通过 C、D 间的电场时, 粒子受到的磁场所力与电场力平衡, 则

$$ev_0 B = \frac{eU}{d} \quad (2)$$

将(1)(2)联立可得

$$\frac{e}{m} = \frac{U}{B^2 ld} \tan \theta$$

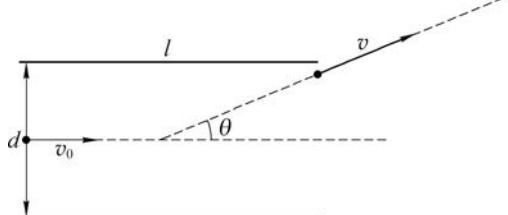


图 1

[1] “自主活动”引导学生理解利用静电偏转管测定阴极射线中粒子比荷的原理。具体过程和结论见前页。

[2] 教师可引导学生讨论,为何要改变阴极材料和偏转管中的气体重复实验。

[3] J. J. 汤姆孙通过测定电子通过云室时形成的雾珠数目和电荷的总量,算出电子电荷量的平均值约为  $1.1 \times 10^{-19}$  C。

[4] 1890 年,英国物理学家舒斯特(A. Schuster, 1851—1934)也曾利用阴极射线在磁场中的偏转,比较准确地测得阴极射线中粒子的比荷。但遗憾的是,舒斯特等人就是不愿意相信阴极射线的质量只有氢离子的千分之一,而宁可假定这种微粒是通常带电的原子或分子,其质量与氢离子的

数量级相仿,只是电荷要比氢离子大得多,于是就偏离了电子发现的正确道路。可见,原子不可分的传统观念影响是那么的根深蒂固。

发现电子的过程表明,重大的科学发现常常与此前公认的传统观念或看法不相符。科学家往往需要摆脱传统观念的束缚,提出新的思想才能对新的发现作出正确的解释和判断。

## 问题与思考解读

**1. 参考解答:** 阴极射线由阴极发射向阳极运动,由此可确定粒子运动速度的方向。可设置方向已知且可控的静电力垂直于粒子运动速度的方向,观察粒子在静电力作用下的偏转方向,若偏转方向与电场

### [1] 自主活动

根据以上对于实验的描述,推导阴极射线中带电粒子比荷的表达式。

- [2] J. J. 汤姆孙改变静电偏转管中的气体和阴极材料重复上述实验,所得到的比荷数量级都一致,即  $\frac{e}{m} \approx 10^{11}$  C/kg。阴极射线的比荷约为电解氢离子的比荷的 2 000 倍。由实验结果可以推断,阴极射线中带负电的粒子比原子、分子小得多,且是原子的组成部分。
- [3] 1898 年, J. J. 汤姆孙和他的学生们又用了几种不同的实验方法直接测得了这种粒子的电荷量大小,约为  $1.1 \times 10^{-19}$  C, 与电解氢离子的电荷量大小相近。这有力地证明阴极射线中带负电的粒子的质量约为氢离子质量的  $\frac{1}{2\ 000}$ 。J. J. 汤姆孙将这种粒子称为电子(electron)。当代科学确认电子的电荷量的大小为  $1.60 \times 10^{-19}$  C, 质量为  $9.11 \times 10^{-31}$  kg。

#### ▶ 阴极射线的研究和电子的发现所具有的重要意义

- [4] 19、20 世纪之交,许多物理学家投入对阴极射线本质的研究工作中。关于阴极射线本质的争论持续了近 20 年,这一争论引发了一系列重大的物理学研究成果。除了电子的发现以外,X 射线的发现和放射性的发现都源自阴极射线的研究。
- J. J. 汤姆孙的研究表明,相对于原子而言,电子是更基本的组成物质的粒子,它是原子的组成部分。
- 电子的发现打破了原子不可分的传统物质观,并催生了物理学崭新的研究领域——原子物理学。同时,电子的发现开辟了电子技术的新时代,发现电子的过程也对人类的科学思想和物理学的研究方法产生了极为深远的影响。

### 问题与思考

- 简述如何利用静电力或磁场判断阴极射线中粒子的电性。
- 测定阴极射线中粒子比荷的实验结果为什么还不足以说明该粒子的质量约为氢离子质量的  $\frac{1}{2\ 000}$ ?
- 在“用静电偏转管测电子的比荷”实验中,减小射线管阴、阳极之间的电压,会使阴极射线偏转程度变大。请分析原因。

方向相同则带正电,若相反则带负电。同样的,设置方向已知且可控的磁场垂直于粒子运动速度的方向,观察粒子在洛伦兹力作用下的偏转方向,根据左手定则即可判断粒子带电的正负情况

**命题意图:**通过简述判断阴极射线中粒子的带电性质的方法,感受探索未知的过程。

**主要素养与水平:**科学推理(I);交流(I)。

**2. 参考解答:**粒子比荷为电荷量与质量的比,汤姆孙测得阴极射线中粒子的比荷约为 $10^{11}$  C/kg,还无法确定粒子的质量,也就不足以比较该粒子质量与氢离子质量的大小;还需测量出该粒子的电荷量约为 $1.1 \times 10^{-19}$  C,才能得到其质量约为 $1.1 \times 10^{-30}$  kg,再与氢离子质量进行比较

**命题意图:**分析探究各环节间的逻辑联系。

**主要素养与水平:**科学推理(II);交流(I)。

**3. 参考解答:**选取射线管阴、阳极之间静电场方向为x方向,与之垂直的外加静电场方向为y方向,偏转程度变大即对应y方向位移增大。电子由阴极发射,初速度近似为零,在电场作用下向阳极加速运动。减小射线管阴、阳极间的电压,x方向的电场力、加速度就变小,所以电子进入偏转电场时的速度减小,在偏转电场中的运动时间变大;在y方向电场不变,即y方向的电场力、加速度不变,可知y方向位移增大,偏转程度变大

**命题意图:**定性分析探究实验细节。

**主要素养与水平:**模型建构(I);科学推理(II)。

## 资料链接

### 阴极射线的发现

19世纪下半叶,欧洲工业的电气化得到很大发展,但在电力生产和传输过程中,非常严重的漏电和放电损耗成了亟待解决的问题。同时,电气照明也吸引了科学家的注意。这些问题都涉及低压气体放电现象(或近似地称为真空放电现象)。1855年,德国物理学家盖斯勒(J. Geissler, 1815—1879)发明水银真空泵;1858年,他又发明了真空放电管,为真空放电的研究创造了良好的实验技术基础。

1858年,德国物理学家普吕克尔(J. Plücker, 1801—1868)发现,当真空放电管内的气压降到 $10^{-6}$  atm\*时,放电管将不发生通常的辉光放电现象(即管内停止发光),而在正对阴极的管壁上出现绿色荧光。普吕克尔认为荧光是由一种射线射向对面的管壁而产生的。1876年,另一位德国物理学家戈德斯坦(E. Goldstein, 1850—1930)用各种材料做成形状、大小不一的阴极,并在阴极与阳极之间放上小的障碍物进行实验,证实射线的性质与阴极材料无关,而且射线是沿直线传播的。戈德斯坦将这种射线命名为阴极射线,在实验中他还发现在管壁上出现的障碍物阴影的边缘较模糊。于是,他就认为阴极射线应该是某种类似于紫外线的以太波。普吕克尔发现阴极射线是19世纪中期最重要的科学成果之一。

这一段历史很好地诠释了科学与技术的相互关系。电磁学基础研究的发展将人类带入了电气时代,电气技术的发展又对真空放电的基础研究提出了需求。令人始料不及的是,由此发现的阴极射线居然直接将人类的目光引向物质的微观结构。

### 阴极射线的探究

1871年,英国物理学家在实验中发现阴极射线在磁场中的偏转现象,因而提出阴极射线由带负电的

\* atm为压强的非法定单位, $1\text{ atm} \approx 1.013 \times 10^5\text{ Pa}$ 。

粒子所组成。其中，克鲁克斯(W. Crookes, 1832—1919)对阴极射线带电的原因给出了一种典型解释。他认为由于分子的热运动，放电管中一些残余气体的分子撞到阴极上，从阴极获得了负电荷，然后在电场的驱使下运动而形成了带负电的分子流。

戈德斯坦为了说明阴极射线不是分子流，特意做了一个光谱实验，图2是他用的一支L形放电管示意图。A、B两电极可轮流作阴极。当A是阴极时，光谱仪接收到的光来自趋向光谱仪的射线。如果射线是分子流，当分子向光谱仪运动时，由于多普勒效应，光的频率应有所增大。反之，当B是阴极时，光的频率应减小。可是，改换电极极性后，并未发现谱线的频率有任何变化。于是，这一事实成为戈德斯坦驳斥阴极射线是带电分子说的有力证据。

1891年，勒纳德根据H.赫兹的建议发明了“勒纳德窗”，成功地将阴极射线引出管外。所谓“勒纳德窗”就是在正对阴极的管端用很薄的铝箔作为窗口，铝箔的厚度既可使管内保持真空，又可以使阴极射线透射出去。一系列实验发现，从“勒纳德窗”透出来的射线与放电管内射线的性质完全相同，它能使荧光物质发光，可使照相底片感光，可使空气电离等。由于把阴极射线引到了管外，便可开展一些以前根本无法做的实验。例如，他们发现这种射线在空气中的传播距离大约只有分米数量级，而在真空中可以传播数米之远。H.赫兹和勒纳德认为“勒纳德窗”的实验支持了阴极射线是波的观点，因为在他们看来只有波才能像光透过透明物质那样穿越铝箔。1895年，法国物理学家佩兰(J. B. Perrin, 1870—1942)将圆桶电极安装在阴极射线管中，用静电计测圆桶接收到的电荷，得到的结果是负电。但是他的实验无法给出判定性的结论，因为有人认为佩兰测到的不一定就是阴极射线所带的电荷。

尽管阴极射线在磁场中会发生偏转，但以H.赫兹为首的一些物理学家认为，要判定阴极射线为带电粒子流，还需要观察到阴极射线在电场中的偏转。H.赫兹也做了有关的实验，但没能观察到阴极射线在电场中的偏转。J. J. 汤姆孙发现，由于放电管的真空度不高，当给放电管加上偏转电场时，管内残余的空气分子被电离，并向偏转电场的极板运动，使电场很快消失。J. J. 汤姆孙设法提高了放电管的真空度，同时减小了电极之间的电压，成功地观察到阴极射线在电场中的偏转。此外，J. J. 汤姆孙将佩兰实验作了一些改进，他把连到静电计的电荷接收器(法拉第圆桶)安装在真空管的一侧(图3)。不加磁场时，无电荷进入接收器；加上磁场以后，射线偏折，当磁场增强至一定程度时，接收器接收到的电荷数量猛增，说明电荷确实来自阴极射线。

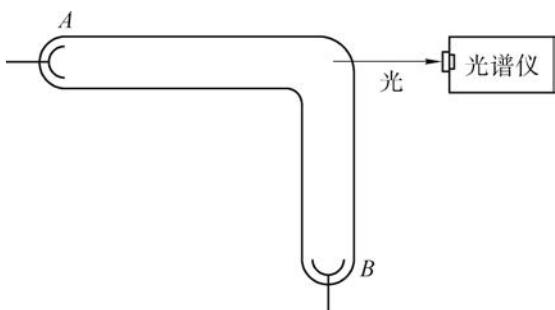


图2

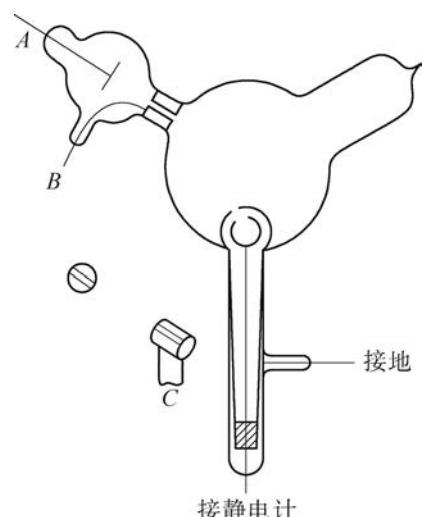


图3

## 电子发现的重要意义

电子的发现对现代科学和技术发展的深远意义可从下面四个方面来看：

- (1) 电子的发现打破了原子不可分的传统物质观。电子与微观物质的组成有最直接的关系，它是组成原子的基本成分之一。
- (2) 电子的发现开辟了原子物理学崭新的研究领域。此后，电子的性质、原子中电子的运动规律、电

子通过晶体的衍射等都是物理学中重要的问题。

(3) 电子的发现开辟了电子技术的新时代。20世纪20年代开始,从电子管生产到晶体管的诞生及半导体技术的发展,再到集成电路的发明,使人类进入微电子科技时代。作为现代技术革命重要标志的微电子技术,不仅使人类的通信技术进入高速、准确和可靠的阶段,同时也大大促进了电子计算机技术的发展。微电子技术和电子计算机技术正是现代信息技术的两个重要基础,人类社会又步入了一个新的发展时期——信息时代。

(4) 电子的发现影响了人们的科学思想和研究方法。李政道先生曾说过:“1897年,汤姆孙发现了电子。这个发现对于物理学的影响非常之大,从那时起,我们遵循了这样一条原则,就是大的由小的组成,小的由更小的组成,所以我们的目的是找出所有物质的最基本的粒子。我们相信,只要把基本粒子找出来,就可以了解其他大的物质。”由于量子力学的不确定性原理,研究愈来愈小的东西,一定需要愈来愈高的能量,这就是要造愈来愈大的加速器的道理。现在已成功地归纳出所有物质是由6种轻子和6种夸克组成的。北京正负电子对撞机为 $\tau$ 轻子质量的测量作了很多重要的贡献。

在电子发现以后的百余年间,现代物理学发现越来越多的微观粒子具有内部结构,而线度小于 $10^{-19}$ m的夸克和轻子是否具有结构,仍是现代物理学需要进一步研究的重要问题。

## 本节编写思路

本节按原子核式结构模型建立过程中重要的问题链为线索展开。

1. 通过原子内部正电荷的分布以及与光谱有关的问题，呈现“枣糕模型”提出的背景和动因。

2. 通过对“ $\alpha$ 粒子散射”实验的介绍，揭示“枣糕模型”的谬误以及散射实验对探索原子结构的重要作用。

3. 通过原子核式结构对“ $\alpha$ 粒子散射”的解释反映科学探究中质疑、推理、论证、创新的过程。

4. 通过原子核式结构与经典理论、原子光谱之间存在的矛盾，为玻尔原子模型的建立提供线索。

了解从“枣糕模型”的提出到原子核式结构建立过程中出现的矛盾和问题，有助于提升学生对科学探究过程中问题、证据和解释之间相互关系的认识。

## 正文解读

### 第二节 原子的核式结构模型

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

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

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

#### [2] 拓展视野

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

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

#### [3] ▶ 原子的“枣糕模型”

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

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

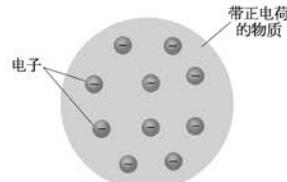


图13-5 “枣糕模型”

[1] 引入部分简述由于电子的发现所引出的有关原子结构的问题，应引导学生关注其中的逻辑关系。

[2] “拓展视野”提供了光谱学及其应用的选读材料。

[3] J. J. 汤姆孙不仅运用经典力学理论计算原子内的电子稳定分布所需满足的条件，还采用了美国物理学家迈耶(A. M. Mayer, 1836—1897)所做的“磁针漂浮实验”结论。为了解释元素周期律，J. J. 汤姆孙假设原子内部的电子分布在一些同心圆环上，每个环上最多可以容纳的电子数不同。这些电子能在各自的平衡位置上做简谐运动，原子光谱的各种频率就相当于这些振动的频率。“枣糕模型”在解释元素周期律方面确实取得了一定的成功，也能定性地解释原子的光谱，但不能解释实验观测到的氢原子光谱。

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

### ► 原子的核式结构模型

[2] 1908 年，卢瑟福（图 13-6）指导他的助手用高速飞行的  $\alpha$  粒子轰击厚度为  $0.4 \mu\text{m}$  的金箔，希望通过  $\alpha$  粒子运动路径发生偏转的程度研究靶原子（金原子）的结构。这个实验被称为  $\alpha$  粒子散射实验。

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

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

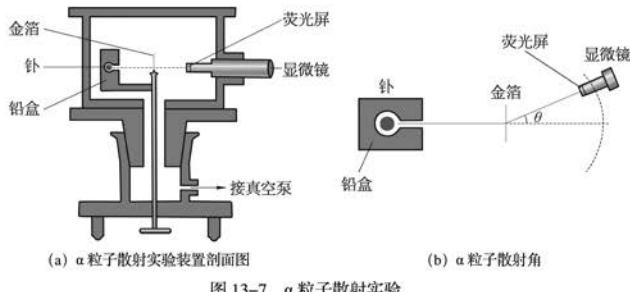


图 13-7  $\alpha$  粒子散射实验

[3]  $\alpha$  粒子散射实验的结果表明，绝大多数  $\alpha$  粒子穿过金箔后，散射角很小（平均为  $2^\circ\sim3^\circ$ ），几乎沿原方向前进。少数  $\alpha$  粒子的散射角较大，极少数  $\alpha$  粒子的散射角超过  $90^\circ$ ，个别  $\alpha$  粒子甚至被反弹回来。

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

(E. Marsden, 1889—1970) 一起通过实验研究了  $\alpha$  射线的最可几散射角与  $\alpha$  射线所通过的金属箔厚度、金属原子量的关系。同时，他们也检查了是否有  $\alpha$  粒子从金属表面直接被反弹回来。1909 年，他们用铂

箔做实验时发现，约  $\frac{1}{8000}$  的  $\alpha$  粒子散射角超过  $90^\circ$ 。

[1] 卢瑟福在确定  $\alpha$  粒子的比荷和速度时发现了  $\alpha$  粒子的散射现象。

[2] 卢瑟福和他的学生盖革 (H. Geiger, 1882—1945) 一起开创了  $\alpha$  粒子的电气计数法。为了直接观测  $\alpha$  射线通过物质时的散射程度，他们使用了闪烁法。在直径约 4 cm、长 2 m 的玻璃管的一端装上小截面的  $\alpha$  射线源，中间放上狭缝，让置于另一端的荧光屏接收  $\alpha$  射线，然后用显微镜数出屏上各点的闪光数。在狭缝后面，贴上不同金属(金、铝)箔，或者改变它们的厚度，或者什么也不贴。结果表明， $\alpha$  射线以明显可见的角度偏转了。后来，又明确金属箔越厚或者用金箔来代替铝箔， $\alpha$  射线的散射越明显。

[3] 盖革和卢瑟福的另一名学生马斯登

[1] “大家谈”引导学生从 $\alpha$ 粒子与电子的质量差异思考两者的碰撞对 $\alpha$ 粒子运动方向的影响。教师可以用铅球与乒乓球的碰撞作为类比，简要地说明 $\alpha$ 粒子与电子的碰撞对 $\alpha$ 粒子运动方向的影响几乎可以忽略。

[2]  $\alpha$ 粒子散射公式推导中包含两个假定：

(1) 金属箔中的原子核前后不互相遮挡。  
(2) 通过金属箔的 $\alpha$ 粒子只经过一次散射。假设所用金属箔的厚度为 $5 \times 10^{-7}$  m，金原子的直径约 $3 \times 10^{-10}$  m。金属箔的厚度相当于一千多个原子的厚度，但原子核与原子半径之比至多是 $10^{-4}$ ，原子核的几何截面至多是原子的 $10^{-8}$ 。这说明原子核之间的空间很大，前后遮挡的机会不大。如果金属箔厚度增加，遮挡的机会当然就大起来。由

于原子核间的空间很大， $\alpha$ 粒子接近原子核的机会仍然不大，较大的散射角可以设想是由一次大角散射和多次小角散射合成的，但多次小角散射的方向各异，合并起来会抵消一部分，合并产生的方向改变比一次大角散射要小。因此，对于很薄的金属箔，上述两个假设还是接近实际的。散射实验已经成为近代物理研究物质结构的重要手段。某个散射实验一旦表现出类似 $\alpha$ 粒子散射实验的特征，往往表明研究对象中可能存在点状的亚结构。

## [1]

## 大家谈

为什么 $\alpha$ 粒子与电子的碰撞不会明显改变 $\alpha$ 粒子的运动方向？

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

## [2]

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

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

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

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

## ▶ 原子核式结构与经典理论之间的矛盾

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



图13-8 原子的核式结构模型

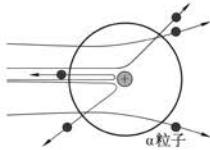


图13-9  $\alpha$ 粒子的偏转

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

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

### 问题与思考

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

[1] 原子的稳定性与原子光谱使核式结构模型面临着严峻挑战,但卢瑟福本人坚信问题能够得到解决。原子核式结构模型建立的过程可以作为现代科学研究的典范,从中可以清晰地看到“科学”会被不断证伪。

## 问题与思考解读

**1. 参考解答:** 带正电的 $\alpha$ 粒子受到带正电的金原子核的库仑斥力作用而发生散射

**命题意图:** 简单情境下应用原子的核式结构模型。

**主要素养与水平:** 模型建构(I);运动与相互作用观念(I)。

**2. 参考解答:** “枣糕模型”认为原子内部的正电荷和质量都均匀分布,电子镶嵌其中;而原子核式结构模型认为原子内部正电荷和质量集中分布在很小的原子核内,电子绕核运动

**命题意图:** 对比原子结构模型,深化理解。

**主要素养与水平:** 模型建构(I);交流(I)。

**3. 参考解答:** 若原子符合“枣糕模型”,当 $\alpha$ 粒子穿过原子时,原子内部正电荷均匀分布,因此对它的斥力大部分相互抵消,而原子内的电子也不会使 $\alpha$ 粒子发生明显偏转。这就与 $\alpha$ 粒子散射实验中部分 $\alpha$ 粒子发生大角度散射、甚至被弹回矛盾

**命题意图:** 联系事实与理论模型。

**主要素养与水平:** 模型建构(I);解释(I)。

**4. 参考解答:** 如果用半径为5 cm的苹果类比原子核,则相应原子半径为5 km。如果用边长为100 m的体育馆类比原子,则原子核相应边长为1 mm,对应一粒芝麻。其他符合比例的类比均正确

**命题意图:** 类比宏观物体,感受原子结构模型。

**主要素养与水平:** 模型建构(I);物质观念(I)。

## 本节编写思路

本节介绍玻尔理论及其对氢原子光谱和原子稳定性的解释，通过玻尔理论的意义和局限性，为原子结构的量子力学模型埋下“伏笔”。

1. 通过原子核式结构模型所面临的困难以及巴尔末公式的作用，揭示玻尔修正原子核式结构模型的背景和动因。

2. 通过对原子光谱特征的详细介绍，说明原子光谱可作为原子“指纹”的原因及其实际应用。

3. 通过对玻尔理论的内容及其对氢原子光谱的解释、玻尔理论的意义和局限的简要介绍，帮助学生理解玻尔理论并展现玻尔理论的革命性，并为原子结构的量子力学模型埋下“伏笔”。

对玻尔理论建立过程的学习，有助于学生科学思维能力的提升和科学探究方法的培养。

## 正文解读

[1] 玻尔的工作还受到以下重要事件的影响和启发：1900年，普朗克为了解释黑体辐射实验提出“能量子”假说；1905年，爱因斯坦为了解释光电效应现象提出光子假说。

[2] “大家谈”帮助学生找到同一种原子吸收光谱和发射光谱谱线之间的对应关系。在学完玻尔理论以后，还可以进一步讨论这一对应关系的成因。

[3] 有些光谱仪可以按波长展开后的光谱摄成相片，即摄谱仪。光谱相片上的谱线位置由波长决定，可以把一个已知波长的光谱和待测的光谱并排地摄在相片上，测出两光谱谱线的位置，进行比较，从而测定各谱线的波长，从相片上也可以看出光谱各成分的强度。研究光谱所用的光源，有自然光、火焰、高温炉、电弧、火花放电、气体放电、化学发光、荧光等各种类型。

### 第三节 玻尔的原子模型

- [1] 为了解决核式结构模型所遇到的困难，丹麦物理学家玻尔（图 13-10）根据量子概念对经典理论进行了修正。

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

#### ▶ 光谱

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

炽热的固体、液体以及高压气体的光谱包含一切波长的白光，这种光谱叫做连续光谱（图 13-11）。稀薄气体或金属蒸气的光谱是由一系列不连续的亮线组成的，这种光谱叫做明线光谱，光谱中的亮线称为谱线。明线光谱是游离态的原子发射的。高温物体发出的白光，通过温度较低的物质蒸汽时，某些波长的光被该物质吸收后形成的光谱叫做吸收光谱。图 13-12（a）、（b）所示分别是钠原子的明线光谱和吸收光谱。



图 13-10 玻尔



图 13-11 连续光谱

图 13-12 钠原子的明线光谱和吸收光谱

- [2]

#### 大家谈

分析图 13-12（a）、（b）中明线和暗线的关系，这种关系意味着什么？

- [3]

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

## [1] STSE

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

### ▶ 氢原子光谱

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

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

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

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

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

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

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

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

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

[3] 1913年2月，玻尔正沉浸在关于核式结构模型与经典理论之间矛盾的思考之中，他偶然从朋友处了解到已经问世近30年的巴尔末公式，这一际遇顿时使一个有准备的大脑觉悟到蕴藏在那简单数学形式之中的原子结构的“密码”。于是，新的原子结构模型假设诞生了！

子假说。玻尔受到巴尔末公式、能量量子化和光子假说的启发，运用量子物理的观念对原子核式结构模型进行了一番彻底的改造。玻尔的有关思考详见本节的“资料链接”。

[1] “STSE”帮助学生了解原子光谱的实际应用——光谱分析，并以此感悟科学、技术和社会之间的关系。

[2] 1889年，瑞典物理学家里德伯(J. Rydberg, 1854—1919)将巴尔末公式改写成广义巴尔末公式(也称为里德伯公式)，式中的里德伯常量  $R = \frac{4}{B}$ 。

[3] 玻尔在做博士论文研究的过程中接触到量子论。1912年，他在曼彻斯特大学的卢瑟福实验室工作，当时正值卢瑟福发表有核原子理论并组织大家对这一理论进行检验。玻尔参加了 $\alpha$ 射线散射的实验工作。他很钦佩卢瑟福的工作，坚信原子核式结构模型符合客观事实。玻尔也很了解卢瑟福的理论所面临的困难，认为要解决原子的稳定性问题，唯有靠量

[1] “拓展视野”供学生选读,以便了解广义巴尔末公式对氢原子光谱的普适性,并更好地理解波尔理论中的“频率条件”。

[2] 玻尔理论中(1)(3)分别称为定态条件假设和频率条件假设。玻尔在以上两个假定的基础上,利用对应原理假定导出(2)。对应原理假定的具体内容是:“当微观范围内的规律延伸到宏观范围时,它所得到的数值结果与经典规律所得到的一致。”

[3] 玻尔的工作在很大程度上得益于氢原子光谱的一些经验性结论,玻尔理论第一次将光谱的事实纳入一个理论体系之中。玻尔理论刻画了一个动态的原子结构轮廓,提出了微观体系特有的量子规律。

### [1] 拓展视野

利用广义巴尔末公式,氢原子各系列谱线波长经验公式分别是:

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

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

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

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

### ▶ 玻尔的原子模型

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

#### [2] 玻尔理论的主要内容有以下三个方面:

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

(2) 原子的能量状态与电子绕核运动的轨道对应。由于原子的能量状态是不连续的,电子不能在任意轨道上绕核运动。电子的动量  $mv$  与轨道半径  $r$  满足  $mvr = n \frac{h}{2\pi}$ ,  $n$  称为量子数,  $h$  为普朗克常量,  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

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

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

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

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

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

$r_n$  的轨道上运动时氢原子的能量。

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

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

[2]

### 自主活动

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



图 13-13 斜面和阶梯

[3]

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

[4]

### 大家谈

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

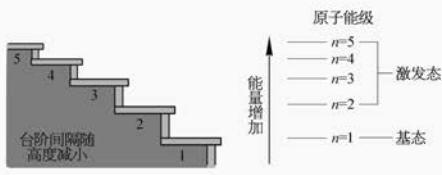


图 13-14 原子能级的“阶梯”

[1] 运用玻尔理

论, 计算氢原子的第一玻尔半径  $r_1$  和基态能量  $E_1$ 。

[2] “自主活动”帮

助学生直观地理解“连续性”和“量子化”的区别。

[3] 关于明线光谱

成因的分析, 可以再度回溯教材第 70 页的“大家谈”。可视具体情况, 请学生分析原子吸收光谱特征的成因。

[4] “大家谈”用形

象化的方法表现氢原子能级的特点, 即随着量子数增大, 相邻能级差减小。

[1] 图 13-15 中量子数很大时的情况就是对应原理的一种具体表现。

[2] 根据玻尔理论,里德伯常量可由物理学基本常数表示,即

$$R = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c}$$

式中,  $m$  为电子的质量。玻尔理论获得的里德伯常量大小与实验测量值高度符合,但两者差值超过万分之五,而当时光谱学的实验精度已达万分之一,对此玻尔作出了解释。简言之,更严格的形式应该用电子与氢原子核的约化质量代替式中的  $m$ ,因此里德伯常量会随原子核的质量变化。这一点曾被用来证实氢的同位素——氘的存在。

[3] 弗兰克-赫兹实验作为独立于原子光谱的证据,具有极其重要的意义(见章末复习与巩固第 7 题)。物理学理论当然要经得起实验的检验,而且必须是多渠道的实验检验。

[4] 玻尔理论建立以后,氢原子光谱得到了令人满意的解释,里德伯常量由经验常数“升格”为基本常数。除了氢原子光谱以外,类氢离子光谱——毕克林系的解释、斯塔克效应的发现和 X 射线标识谱的研究均是对玻尔理论有力的实验证明。

[5] 玻尔最早从量子理论的角度解释了元素周期表。他把元素的原子序数与原子的核电荷数联系起来,元素的性质取决于中性原子基态的核外电子排布,即取决于中性原子基态的电子组态。玻尔并没有一个明确的原则来确定电子的排布,而是凭经验和直觉排出了一张基本类似现代版本的元素周期表,并据此预言了 72 号元素的存在及其性质。玻尔指出它不是稀土元素,而应该是类似于锆的金属。1923 年,玻尔研究所果然在锆矿中找到了 72 号元素,为了纪念玻尔的家乡哥本哈根,将其命名为铪(Hafnium)。

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



图 13-15 氢原子的能级图

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

根据玻尔理论的频率条件,巴尔末系的谱线频率  $\nu$  满足

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

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

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

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

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

#### [4] ▶ 玻尔理论的意义和局限

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

- [5] 玻尔综合了前人的工作和量子学说,冲破了经典理论的束缚,建立了与原子结构有关的实验现象基本吻合的原子模型。从玻尔理论进行推演,电子电荷量、电子质量、普朗克

常量和里德伯常量等物理学的基本常数之间取得了定量的协调。玻尔理论还成功地解释了元素周期律。

- [1] 尽管玻尔的原子模型取得了巨大的成功，但玻尔理论在解释简单程度仅次于氢原子的氦原子光谱时却无能为力。此外，玻尔原子模型也无法回答原子是否能从高能级向任意低能级跃迁等问题。
- [2] 玻尔和其他物理学家在进一步研究之后发现，玻尔原子模型的缺陷在于依然将电子看成经典力学意义上的粒子，并且保留了过多的经典概念。

### 问题与思考

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

[1] 玻尔理论作了一些经典理论中所没有的假定，例如：原子处在定态时不发生辐射；原子的能量不能连续变化。但这些观点又是建立在经典理论基础上的，引进的量子化条件也没有理论根据。因此，玻尔理论是经典理论和量子条件相互“纠缠”的体系，缺乏逻辑的统一性。玻尔理论将原子结构按电子的轨道运动描述，从其适用范围内同实验的一致性来看，确实是对客观情况真实、简单的描述。

[2] 原子的实际情况不像玻尔理论描述的那样简单，但是玻尔理论提供了简单的原子结构图像，即使不能用来作准确的计算，也可作定性的估计。有时对于原子的复杂问题，可用玻尔理论的概念作初步的分析。用玻尔理论的术语讨论新的科学问题也是常见的。玻尔理论在原子物理中曾发挥承前启后的作用，它是原

子物理发展的一个重要标志，学习这个理论是为了按照人类认识微观世界的历史过程，由浅入深地逐步了解微观体系的情况和规律。

## 问题与思考解读

### 1. 参考解答：玻尔理论主要包含三个方面内容。

- (1) 原子只能处于一系列不连续的能量状态中，称为定态。
- (2) 定态与电子绕核运动的轨道对应，轨道参数满足方程  $mvr = n \frac{h}{2\pi}$ ，其中  $n$  为量子数。
- (3) 当原子中的电子从量子数为  $n$  的轨道跃迁到量子数为  $m$  的轨道时，发射或吸收一定频率的电磁

波,其能量为  $h\nu = |E_n - E_m|$

**命题意图:** 记忆玻尔理论。

**主要素养与水平:** 交流(I)。

**2. 参考解答:** 根据经典理论,原子核式结构模型认为电子绕核运动将不断辐射电磁波,原子应当是不稳定的,同时电子轨道可连续取值、能量状态也相应可连续取值,原子光谱应是连续的。这两点矛盾在玻尔理论中通过定态的假定(原子处在定态时不发生辐射和原子的能量不能连续变化)得到了解决

**命题意图:** 理解玻尔理论。

**主要素养与水平:** 模型建构(I);解释(I)。

**3. 参考解答:** 电子在氢原子核的库仑引力作用下绕核做匀速圆周运动,由库仑定律和匀速圆周运动规律可知

$$\frac{ke^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

故电子动能  $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{ke^2}{2r}$ , 半径越大,电子动能越小。

根据玻尔理论,电子绕核运动轨道的半径  $r_n = n^2 r_1$ , 氢原子的能量(电子动能与电子和氢原子核间电势能的代数和)  $E_n = \frac{E_1}{n^2}$ , 式中  $n$  称为量子数,  $E_1$  为电子在离原子核最近的一条可能的轨道上运动时氢原子的能量,氢原子  $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ 。量子数  $n$  越大,轨道的半径越大,氢原子的能量也越大。已知电子从一个轨道跃迁到另一个轨道时向外辐射电磁波,故电子轨道半径变小,氢原子的能量也变小。由此可知电子动能变大,而电子和氢原子核间的电势能变小

**命题意图:** 应用经典理论定量分析玻尔理论,深化理解。

**主要素养与水平:** 模型建构(II);科学推理(II)。

**4. 参考解答:** 根据玻尔理论,氢原子的能量(电子动能与电子和氢原子核间电势能的代数和)  $E_n = \frac{E_1}{n^2}$ , 式中  $n$  称为量子数。由此知  $n=2$  的激发态能量  $E_2 = -3.4 \text{ eV}$ 。从基态跃迁到  $n=2$  的激发态对应吸收能量  $E = E_2 - E_1 = -3.4 \text{ eV} - (-13.6) \text{ eV} = 10.2 \text{ eV}$  的光子。

可见光频率范围为  $3.8 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ , 光子能量  $E = h\nu$  范围为  $1.6 \sim 3.1 \text{ eV}$ , 无法满足要求

**命题意图:** 应用玻尔理论进行简单的定性判断。

**主要素养与水平:** 模型建构(I);科学推理(II)。

## 资料链接

### 玻尔理论

1913年,玻尔划时代的论文《原子构造和分子构造》I、II、III陆续发表于英国《哲学杂志》第7、9、11期上,人称玻尔“三部曲”。玻尔在《原子构造和分子构造》I的开篇中写道:“近几年来对这类问题的研究途径发生了根本的变化,由于能量辐射理论的发展和这个理论中的新假设从实验取得了一些直接证据,这些实验来自各不相同的现象,诸如比热、光电效应和伦琴射线等。这些问题的讨论结果看来一致,经典电动力学并不适于描述原子规模的系统的行为。不管电子运动定律作何变动,看来有必要引进一个大大异于经典电动力学概念的量到这些定律中来。这个量就叫普朗克常量,或者是经常所称的基本作用量子。引进这个量之后,原子中电子的稳定组态这个问题就发生了根本的变化……”

## 小结

· 基本概念和基本规律

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

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

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

能级：原子各个定态的能量。

· 基本方法

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

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

· 知识结构图



## 复习与巩固解读

复习与巩固 77

1. 参考解答：玻尔理论认为原子只能处于一系列不连续的称为定态的能量状态中。对应量子数为  $n$  的定态，氢

原子的能量  $E_n = \frac{E_1}{n^2}$ ，式

中  $E_1 = -13.6 \text{ eV}$  为氢原子处于基态时的能量。当原子从量子数为  $n$  的轨道跃迁到量子数为  $m$  的轨道时，发射或吸收一定频率的电磁波，其能量为  $h\nu = |E_n - E_m|$ 。由此可以解释氢原子光谱。例如巴尔末系中的谱线是氢原子由  $n > 2$  的高能级向低能级跃迁时向外辐射电磁波所形成的。理论和实验很好地吻合，并且成功预言了氢原子光谱在紫外区和红外区会有新的谱线。

**命题意图：**理解玻尔理论。

**主要素养与水平：**模型建构(I)；解释(I)。

### 2. 参考解答：

模型	“枣糕模型”	原子核式结构模型	玻尔原子模型
特点	原子内部正电荷和质量均匀分布，电子镶嵌其中	原子内部全部正电荷和几乎所有质量集中分布在很小的原子核内，电子在核外绕核运动	原子只能处在一系列不连续的稳定的定态中，在不同的定态间跃迁时发射或吸收相应频率的电磁波
证据	发现电子，原子稳定	$\alpha$ 粒子散射实验中少数 $\alpha$ 粒子发生大角度散射，个别甚至被弹回	原子的明线光谱和吸收光谱、氢原子光谱

**命题意图：**对比原子结构模型，深化理解。

## 复习与巩固

- 简述玻尔理论对氢原子光谱的解释。
- 以表格形式列举“枣糕模型”、原子核式结构模型和玻尔原子模型的特点以及相关的证据。
- 已知阴极射线管电极间的电压为  $3000 \text{ V}$ ，假设电子离开阴极表面时的初动能为  $0$ ，求电子到达阳极时的动能。
- 如图 13-16 (a) 所示为  $\alpha$  粒子散射实验模拟装置图，图 (b) 为“原子核模型仪”的正视图，图 (c) 为“原子核模型仪”的俯视图。为了使小钢球能平滑地从滑槽滚到原子核模型仪上，滑槽下端弧形应接近水平状态。调节滑槽相对“原子核模型仪”的方位，释放钢球，可以观察到钢球出射方向的差异。
  - 简述装置中用来模拟  $\alpha$  粒子和原子核半径的部分以及从该模拟实验中可以观察到的现象。
  - 能否将“原子核模型仪”改成圆柱状？简述你的理由。

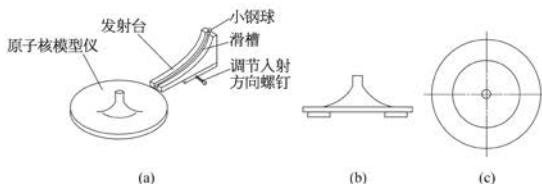


图 13-16

- 已知氢原子从  $n = 4$  的激发态直接跃迁到  $n = 2$  的能级时发出蓝光。推测氢原子从  $n = 5$  的激发态直接跃迁到  $n = 2$  的能级时所发出的可见光的颜色，并简述理由。
- 已知一定量氢原子处在量子数  $n = 3$  的激发态，分析说明它们发光光谱含有几种谱线。
- 弗兰克—赫兹实验以独立于光谱实验的形式证实了原子的量子化能级。某同学查阅了弗兰克—赫兹实验的资料，内容如下：  
弗兰克—赫兹实验原理如图 13-17 (a) 所示，玻璃管内充有汞蒸气（大量处于基态的汞原子，其能级分布与氢原子能级分布类似。通过与电子的非弹性碰撞，汞原子可以吸收电子的能量），加热阴极  $K$  附近的钨丝使其发射电子，在阴极  $K$  与栅极  $G_2$  之间的加速电压  $U_{G2K}$  作用下电子向栅极  $G_2$  加速移动同时获得动能

$E_k = eU_{G2K}$ ; 因为栅极  $G_2$  与阴极  $P$  之间反向电压的作用, 通过栅极  $G_2$  的电子必须拥有足够的动能才能够到达阴极  $P$  并产生电流  $I_p$ 。

加速电压  $U_{G2K}$  从零开始逐渐增大, 当  $U_{G2K} < 4.9$  V 时, 随着电子动能  $E_k$  的增加, 到达阴极  $P$  的电子增多, 电流  $I_p$  单调递增。当  $U_{G2K} = 4.9$  V、电子动能  $E_k = 4.9$  eV 时, 电流  $I_p$  跃降。继续增加电压  $U_{G2K}$ ,  $I_p$  又开始平稳地增加, 直到  $U_{G2K}=9.8$  V、 $E_k=2 \times 4.9$  eV 时, 又观察到  $I_p$  跃降。总之, 每当电子动能达到 4.9 eV 的整数倍时, 都能观察到  $I_p$  的跃降。 $I_p-U_{G2K}$  关系情况如图 13-17 (b) 所示。

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

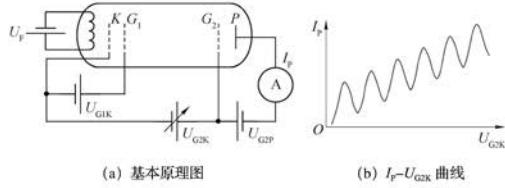


图 13-17

### 主要素养与水平:

模型建构(I); 证据(I)。

### 3. 参考解答:

电子的动能  $E_k = qU = 3000$  eV  $\approx 4.81 \times 10^{-16}$  J

**命题意图:** 简单情境下计算微观粒子能量。

### 主要素养与水平:

模型建构(I); 能量观念(I)。

### 4. 参考解答:

(1) 该装置用钢球模拟  $\alpha$  粒子, 用“原子核模型仪”模拟原子核。可以观察到钢球( $\alpha$  粒子)运动过程中受到“原子核模型仪”(原子核)影响发生偏转, 越靠近“原子核模型仪”轴心偏转的角度越大, 甚至可能被弹回

(2) 不能。此类反漏斗状的“原子核模型仪”对钢球的作用较好地模拟了原子核对  $\alpha$  粒子的库仑斥力, 可较好地符合大多数散射角很小、少数散射角较大、极少数散射角超过  $90^\circ$ 、个别被弹回的规律。若

改为圆柱状虽然仍能得到散射现象, 但具体作用规律变化, 不碰到圆柱状的钢球就完全不散射, 碰到的则较多发生大角度散射, 小角度散射与大角度散射的比例也相应变化

**命题意图:** 类比宏观物体, 定性半定量分析散射问题, 深入理解原子核式结构模型。

**主要素养与水平:** 模型建构(II); 解释(II)。

**5. 参考解答:** 蓝色或紫色。根据玻尔理论, 氢原子的能量  $E_n = \frac{E_1}{n^2}$ , 式中  $n$  称为量子数。可知从  $n=5$  到  $n=2$  的能级差更大、波长更短。已知为可见光, 故可能为蓝色或紫色

**命题意图:** 应用玻尔理论定量分析原子能级跃迁辐射。

**主要素养与水平:** 模型建构(II); 科学推理(II)。

**6. 参考解答:** 3 种。发射电磁波对应原子状态向量子数更小的状态跃迁,即从  $n=3$  到  $n=2$  或 1,再考虑跃迁到  $n=2$  的激发态后还可以向  $n=1$  的基态跃迁,同时注意到这三种跃迁的能级差不同,对应电磁波频率不同,故共 3 种

**命题意图:** 应用玻尔理论定性分析原子能级跃迁辐射。

**主要素养与水平:** 模型建构(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

**7. 参考解答:** 由题述条件可知,随着从零开始逐渐增大加速电压  $U_{G2K}$ ,电子动能  $E_k$  从零开始逐渐增大,电流  $I_P$  单调递增,意味着抵达阳极的电子增多。但是当  $U_{G2K}=4.9\text{ V}$ 、电子动能  $E_k=4.9\text{ eV}$  时,电流  $I_P$  骤降,意味着抵达阳极的电子突然减少;继续增加电压  $U_{G2K}$ ,增加电子动能  $E_k$ ,电流又开始平稳地增加,抵达阳极的电子又平稳地增多;直到  $U_{G2K}=9.8\text{ V}$ 、 $E_k=2\times4.9\text{ eV}$  时,又观察到  $I_P$  骤降,抵达阳极的电子又突然减少……抵达阳极的电子突然减少是由于大量处于基态的汞原子组成的汞蒸气吸收了电子的能量,而由以上现象可知其吸收的能量总是  $4.9\text{ eV}$  或  $4.9\text{ eV}$  的整数倍。汞原子能吸收  $4.9\text{ eV}$  的能量,再同时考虑到汞原子的能级分布与氢原子类似,即  $E_n=\frac{E_1}{n^2}$ ,相似的非均匀能级分布,也就意味着每个

处于基态的汞原子只能吸收一份  $4.9\text{ eV}$  的能量。

综上所述,可以判定当电子动能达到  $4.9\text{ eV}$  的整数倍时,电子的能量被多个汞原子吸收,而每个汞原子吸收的能量为  $4.9\text{ eV}$

**命题意图:** 结合实验数据应用玻尔理论定性半定量分析问题。

**主要素养与水平:** 证据(Ⅱ);科学推理(Ⅱ)。

## 第三部分 本章练习部分解读

### 第一节 电子的发现

1. 汤姆孙 阴极射线 原子

2. 一个大枣  $30\text{ g}$ ,一位学生质量  $60\text{ kg}$ (其他例子符合实际均可)

3. 油滴受力平衡  $mg=qE$ , 又  $m=\frac{4\rho\pi R^3}{3}$ ,  $q=ne$ 。联立得  $n=\frac{4\rho g \pi R^3}{3eE} \approx 4.6 \times 10^4$

4. 汤姆孙在实验中观察到磁场使阴极射线偏转,确认其由带负电的粒子组成,再测得粒子比荷(电荷量与质量之比)约为  $10^{11}\text{ C/kg}$ ,电荷约  $1.1 \times 10^{-19}\text{ C}$ ,进而得到质量约  $1.1 \times 10^{-30}\text{ kg}$ 。该粒子质量约是已知的最小原子——氢原子的  $\frac{1}{2000}$ ,由此证明阴极射线中带负电的粒子的质量比原子、分子小得多,是原子的组成部分

### 第二节 原子的核式结构模型

1. B

2. 原子中心有一个很小的核,原子的全部正电荷和几乎全部质量都集中于核内,电子在核外空间绕核旋转

3. 原子核的密度约  $2 \times 10^{18}\text{ kg/m}^3$ 。如果原子核堆满边长为  $1\text{ mm}$  的立方体的话,质量为  $2 \times 10^9\text{ kg}$ ,即  $2 \times 10^6\text{ t}$ ,相当于 40 万头  $5\text{ t}$  大象的质量

4. 根据经典理论,原子是不稳定的,原子光谱应是连续的,均与事实不符

### 第三节 玻尔的原子模型

1. 不连续 频率
2. 减小 放出 增加
3. 6 无数
4.  $\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1+\lambda_2}$  或  $\frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}$

## 第四部分 本章实验与活动部分解读

自主活动 观察磁场中的阴极射线

活动中观察到哪些现象?这些现象能否佐证阴极射线是一种带负电的粒子流?

**参考解答:**当条形磁体的一极靠近阴极射线管时,阴极射线向一侧偏转;用条形磁体的另一极靠近,阴极射线向另一侧偏转。可进一步记录磁体的极性和对应的偏转方向,当阴极射线管如图 13-1 所示放置时,将条形磁体 N 极靠近阴极射线管,且磁体沿磁极方向轴线与亮迹所在平面垂直时,阴极射线向下偏转。能。阴极射线由带电粒子组成,在磁场中受到洛伦兹力作用发生偏转。由条形磁体的磁极可以大致判断磁场方向,由阴极射线的偏转方向可以判断洛伦兹力的方向,根据左手定则,可以判断出粒子带负电。

**命题意图:**观察并记录实验现象。根据观察到的现象和已经学习过的知识,作出论证。

# 第十四章 ■ 微观粒子的波粒二象性

## 第一部分 整 章 分 析

### 学习目标

1. 通过演示实验,观察光电效应现象;知道光电效应的实验规律及其与光的电磁理论的矛盾;理解遏止电压、截止频率、逸出功等概念的含义。
2. 理解光子说及其对光电效应的解释,能根据光电效应和康普顿效应说明光的粒子性;理解光的波粒二象性,形成对光的本性的正确认识。
3. 了解德布罗意波(物质波)的概念及其实验探索和验证,通过波粒二象性知道物质波是概率波;知道电子云的概念,了解波粒二象性是微观世界的基本特征,进一步体会建构物理模型的意义,了解建构模型的方法和意义。

### 编写意图

课程标准中对本章的“内容要求”为:

3. 4. 1 通过实验,了解光电效应现象。知道爱因斯坦光电效应方程及其意义。能根据实验结论说明光的波粒二象性。
3. 4. 2 知道实物粒子具有波动性,了解微观世界的量子化特征。体会量子论的建立对人们认识物质世界的影响。

本章以课程标准规定的内容为载体,展现人类对粒子性和波动性的认识由相互对立走向相互融合的过程。量子力学对原子结构的刻画,假说和建模等过程中所用的科学方法,以及物理学家实事求是的科学态度、求真务实的科学精神都为培养学生物理学科核心素养提供了生动的教育素材。

本章内容为完善学生对物质和运动的认知奠定重要的知识基础,有助于提升学生的物理观念、科学思维和科学探究的能力。

完成本章内容的学习,共需要 3.5 课时,其中第一节 1.5 课时,第二节 1 课时,第三节 1 课时。

## 第十四章

# 微观粒子的波粒二象性

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

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

## 本节编写思路

本节主要介绍光电效应现象与经典理论之间的矛盾，以及爱因斯坦光子说对光电效应现象所作出的解释。本节内容按照光电效应现象与经典波动理论的矛盾、光子说及其进一步的实验验证为主线展开：

1. 通过演示实验，介绍光电效应现象以及相关概念、规律。

2. 通过光电效应与经典理论之间的矛盾，展现爱因斯坦提出光子说的历史背景。

3. 通过光子说、对光电效应现象的解释，以及密立根实验，展现光子说的创新性和科学性。

在学习过程中让学生经历认识光电效应的实验现象、规律及爱因斯坦光子说的过程，有助于学生形成相对科学的物质观念，领悟实事求是、不迷信权威的科学精神。

## 正文解读

[1] 教材中提供的实验操作方式较为简单易行，而且现象比较明显。教师可引导学生分析验电器指针张角减小的原因。

### 第一节 光电效应 光子说

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

#### ► 光电效应现象

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



图14-1 光电效应实验

上述实验表明，经紫外线照射的锌板释放了电子。

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

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

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

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

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

换用不同金属材料极板, 还可以研究光电子最大初动能与极板材料之间的关系。

## [2] 大家谈

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

### ► 光电效应的实验规律

实验表明, 光电效应遵循以下规律:

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

## [3]

表14-1 几种金属材料的截止频率

金属	铯	钠	锌	银	铂
$v_0/\text{Hz}$	$4.545 \times 10^{14}$	$6 \times 10^{14}$	$8.065 \times 10^{14}$	$1.153 \times 10^{15}$	$1.529 \times 10^{15}$

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

光电子数为  $n = \frac{I_m}{e}$ ; 光电子的最大初动能为  $E_{km} = eU_c$ 。研究逸出光电子的最大初动能与板K材料之间的关系时, 应控制入射光的频率和强度。

[3] 教师可利用表14-1所列数据, 引导学生估算铯、钠、锌等金属产生光电效应时光电子初动能的数量级。

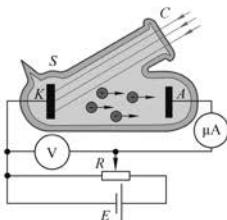


图14-2 研究光电效应

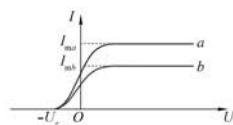


图14-3 光电流和电压的关系

[1] 图14-2中, 滑动变阻器作为分压器使用, 学生在此前学习稳恒电路时已经了解滑动变阻器作为限流器和分压器的连接方法。分压器常用于测定元件的伏安特性曲线。因此, 图14-3就可以看成是图14-2中光电管在不同光强的单色光照射下的伏安特性曲线。教师可视具体情况引导学生分析下列问题:

(1) 当正向电压由零逐渐增大时, 光电流为何先增大再保持不变?

(2) 当图14-2中的电源反接时, 光电流为何不立即减小到零?

(3) 图14-3中红色和蓝色图线的光电流饱和值与遏止电压的关系说明哪些问题?

[2] 此处设置“大家谈”旨在帮助学生加深对相关电学知识以及控制变量法的理解。单位时间从板K逸出的

[1] 由表 14-1 可知, 锶、钠、锌等金属要产生光电效应, 入射光至少需要使光电子的初动能达到约几个电子伏的能量。以下按照经典理论估算光电效应的响应时间。实验发现, 光强为  $1 \mu\text{W}/\text{m}^2$  的光照射到钠金属表面, 即可测到光电流。这相当于一个功率为  $500 \text{ W}$  的点光源照到  $6\ 300 \text{ m}$  处的钠金属板上, 即可有电子发射。钠原子的半径  $r$  约  $2 \times 10^{-10} \text{ m}$ , 估算得面积为  $1 \text{ m}^2$  的单原子层的体积为  $V = 2 \times 2 \times 10^{-10} \times 1 \text{ m}^3 = 4 \times 10^{-10} \text{ m}^3$ , 则假设钠金属有 10 个单原子层的厚度, 其中的钠原子数约  $10^{20}$  个。这样, 每个钠原子每秒从入射光获得的能量约为  $0.1 \mu\text{eV}$ 。即使每个原子中只有一个电子接收能量, 这个电子也需要  $10^7 \text{ s}$  的时间才能获得  $1 \text{ eV}$  能量。这一响应时间与实验结果相去甚远!

[2] 普朗克认为, 原子发射和吸收的能量是一份一份的, 而能量(电磁波)在传播过程中仍是连续的。“能量子”假说是一项有划时代意义的工作, 它标志着量子力学的诞生。但在当时, 不论是普朗克本人还是他的同时代人, 对这一观念都没有充分认识。普朗克还为自己提出了不连续的“能量子”思想违反了经典的连续性概念而烦恼和后悔。他本人宣称量子概念“只是理论上的假设”, “只有附属的数学价值”。普朗克由黑体辐射的测量数据算出了普朗克常量  $h = 6.55 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

[3] 关于光子的质量请参阅“资料链接”。

[1] (3) 当入射光频率高于截止频率时, 光电子的最大初动能与入射光的强度无关, 只随入射光频率的增大而增大。  
 (4) 当入射光频率高于截止频率时, 几乎在光入射金属表面的同时即有光电子逸出。

#### ► 光电效应实验规律与经典理论之间的矛盾

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

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

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

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

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



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

#### ► 光子说

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

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

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

上式称为光电效应方程，运用光电效应方程可以解释光电效应的规律。

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

- [2]

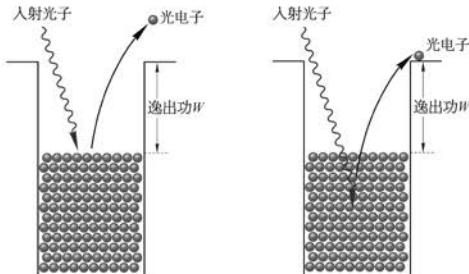


图 14-5 光电效应示意图（电子在图中位置的高低代表电子能量的大小）

- 对于一定的金属而言，逸出功的值是确定的，所以入射光子的频率越高，光电子的最大初动能就越大。若入射光子的频率较低，电子获得的能量小于逸出功，即使再多的光子都无法使“阱”中最上层的电子越出“阱”口（不产生光电效应），这就是光电效应规律中截止频率的由来。截止频率  $v_0$  可表示为

$$hv_0 = W, \text{ 即 } v_0 = \frac{W}{h}$$

不同金属的逸出功不同，所以它们的截止频率也不同。入射光频率大于截止频率时，

[1] 此处设置“助一臂”旨在帮助学生了解物理学重要的思想方法——假说。

[2] 图 14-5 以及相关说明文字帮助学生直观地理解光电效应方程所描述的物理过程。教材中“逸出过程中，电子需要克服金属原子实对它的吸引而做功，从而使电子的动能减少，犹如做竖直上抛运动的物体克服重力做功，动能减少”，为图 14-5 所采用的类比方式埋下了“伏笔”。光电效应方程反映了一种功能关系，并非所有光电子都具有最大初动能，只有受金属束缚作用最弱的光电子才具有最大初动能。

[3] 截止频率常被称为“红限”。

[1] 此处设置“STSE”

旨在介绍光电效应现象的实际应用，体现科学与技术之间的关系。除教材所提及的光电效应（亦称为“外光电效应”）以外，半导体材料所涉及的“内光电效应”目前的应用更为广泛。光照射在某些半导体材料上并被吸收后，会在半导体内部激发出导电的载流子（电子-空穴对），从而使得材料导电能力显著增加；或者由于这种载流子的运动所造成的电荷积累，使得材料两面产生一定的电势差（所谓“光生伏特”）。这些现象统称内光电效应。

[2] 光电效应已在生产、科研、国防中有广泛的应用。在有声电影、电视和无线电传真技术中都用光电管或光电池把光信号转化为电信号；在光度测量、放射性测量时也常常用光电管或光电池把光变为电流并放大后进行测量；光计数器、光电跟踪、光电保护等多种装置在生产自动化方面的应用更为广泛。

[3] 爱因斯坦的光子说没有及时地得到人们的理解和支持，他提出“遏止电压与频率成正比”没有直接的实验依据。直到1916年，密立根设计如图1所示的实验装置对此作出了验证。他的实验排除了表面的接触电势差、氧化膜的影响，获得了比较好的单色光。他选了三种逸出功较低的材料——钠、钾、锂作为阴极，置于特制的真空管中，分别接受光的照射，同时测其光电流。通过实验，密立根测得普朗克常量  $h = 6.56 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

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

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

### [1] STSE

除了在建立光子说的过程中扮演了具有历史意义的角色以外，光电效应还具有许多实际的应用价值。如图14-6所示，影片后期录音时，利用特殊设备将声音的变化以宽窄不同的条纹记录在电影胶片边缘的音轨上。放映时，强度不变的窄光束通过音轨时，由于音轨上条纹的宽窄变化，通过音轨进入光电管的光的强度也做相应变化。这样，光电管产生的光电流也随之变化，经过电流放大后再通过喇叭将声音放送出来。图14-7所示则是广泛用于报警

器、自动门等设备中的开关控制电路，当照射光电材料的入射光的强度发生变化时，电路中的电流发生变化，从而改变电磁铁的磁性强弱，实现对开关的吸放效果。

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

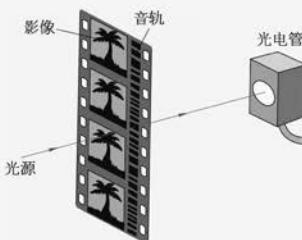


图 14-6 电影胶片



图 14-7 开关控制电路

### [3] ▶ 光电效应方程的实验验证

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

密立根历时十载，仔细地研究了不同金属在各种频率单色光照射下反向遏止电压  $U_0$ 。

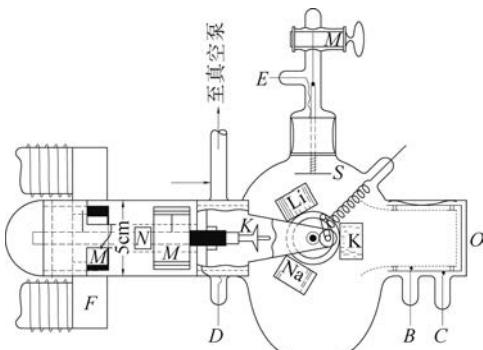


图 1

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

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

[1]

## 大家谈

为什么图 14-8 中三条直线彼此平行？如何由图线求出普朗克常量？

[2]

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

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



图 14-9 叶企孙  
(1898—1977)

## 问题与思考

- 金属钨的逸出功为 4.52 eV，则其截止频率是多少？用频率介于  $3.9 \times 10^{14}$ ~ $7.5 \times 10^{14}$  Hz 的可见光照射钨，是否会发生光电效应？
- 用甲、乙、丙三种不同的单色光照射同一光电管，得到了如图 14-10 所示的三条光电流与电压之间的关系图线。分析比较三种情况下入射光频率、光电子最大初动能和饱和光电流之间的关系。
- 在图 14-2 所示的实验中，为什么光电流不能一直随正向电压增大而增大？光电流达到饱和值后，怎样才能使光电流继续增大？
- 若一个电子可以同时吸收多个光子的能量，简述光电效应现象会发生怎样的变化。

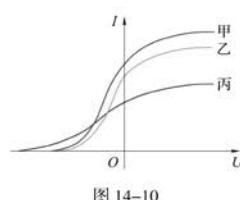


图 14-10

光电效应是否发生。

**主要素养与水平：**模型建构（I）；科学推理（I）。

**2. 参考解答：**由图可知饱和光电流  $I_{m\text{甲}} > I_{m\text{乙}} > I_{m\text{丙}}$ 。入射光频率  $\nu$ 、光电子最大初动能  $E_{km}$ 、逸出功  $W$  与反向遏止电压  $U_c$  满足： $h\nu - W = E_{km} = eU_c$ 。由图可知  $U_{c\text{甲}} = U_{c\text{乙}} < U_{c\text{丙}}$ ，所以光电子最大初动能  $E_{km\text{甲}} = E_{km\text{乙}} < E_{km\text{丙}}$ ，入射光频率  $\nu_{\text{甲}} = \nu_{\text{乙}} < \nu_{\text{丙}}$

**命题意图：**通过分析光电效应中入射光频率、光电子最大初动能和饱和光电流之间的关系，加强对光电效应、光子说的理解。

**主要素养与水平：**模型建构（I）；科学推理（II）。

[1] 此处设置“大家谈”旨在帮助学生理解图 14-8，并体验密立根测定普朗克常量的方法。根据光电效应方程，图 14-8 中直线的斜率均为  $\frac{h}{e}$ ，而  $h$ 、 $e$  均为物理学基本常数，故三条直线彼此平行。同时，由直线斜率及电子电荷量  $e$  可算出普朗克常量  $h$ 。

[2] 关于普朗克常量的进一步介绍，请参阅本节“资料链接”。

## 问题与思考解读

**1. 参考解答：**截止频率  $\nu_0$  满足：逸出功  $W = h\nu_0$ ，故

$$\begin{aligned} \nu_0 &= \frac{W}{h} \\ &= \frac{4.52 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.626 \times 10^{-34}} \text{ Hz} \\ &\approx 1.09 \times 10^{15} \text{ Hz}. \end{aligned}$$

可见光频率小于此截止频率，可知可见光照射钨不会发生光电效应

**命题意图：**练习运用截止频率的条件判断

**3. 参考解答：**单位时间内特定数目的光子照射金属，产生一定量的光电子，一部分的光电子从阴极运动到阳极从而产生光电流。随着正向电压的增大，有更多的光电子到达阳极，使光电流增大，但单位时间内照射金属的光子数目是有限的，产生的光电子数目也是有限的，所以随着正向电压的继续增大，几乎全部的光电子参与导电，光电流也就达到饱和。要使光电流继续增大，可以增大照射金属的光强，即增大单位时间内光子的数目，增大产生的光电子数目，增大饱和光电流

**命题意图：**通过对光电流的分析，加强对光电效应、光子说的理解。

**主要素养与水平：**交流（I）；科学推理（II）。

**4. 参考解答：**若用光照射金属时，一个电子可以同时吸收多个光子的能量，则不管单个光子的能量如何，电子总是可以积累多份能量，克服金属的束缚成为光电子，由此可知光电效应不会有截止频率，光电子的最大初动能也不会仅与单个光子能量有关，还应和电子能吸收的光子个数有关。如果光强足够弱，电子需要等待一段时间才能吸收多个光子能量从金属表面逸出，则瞬时性规律也发生变化。饱和光电流与光强成正比的规律没有变化

**命题意图：**对比基于不同假设对光电效应的分析，加强对光子说的理解。

**主要素养与水平：**交流（I）；科学推理（II）。

## 资料链接

### 光子的质量与动量

光子以光速运动，故牛顿力学不再适用。按照狭义相对论质量和能量的关系式  $E=mc^2$ ，可以确定光子的质量，即

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$$

在狭义相对论中，质量和速度的关系为

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$m_0$  为静止质量，光子永远以不变的速度运动，因而光子的静止质量必然等于零，否则  $m$  将为无穷大。从另一角度看，因为相对于光子静止的参照系是不存在的，所以光子的静止质量等于零也是合理的。而原子组成的一般物质的速度总是小于光速的，故它们的静止质量不等于零。在  $m_0$  是否等于零这一点上，光子和普通物质有显著的区别。

在狭义相对论中，任何物体的能量和动量的关系为

$$E^2 = c^2 p^2 + m_0^2 c^2$$

光子的静止质量  $m_0=0$ ，故光子的动量为

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

### 普朗克常量与国际单位制基本单位

普朗克常量是一个很小的量，它给出了量子化的一个基本单位。普朗克将它称为“作用量子”，是微

观世界有代表性的特征量，也是最重要的物理学常数之一。

2019年5月20日，国际单位制基本单位的新定义生效，kg、A、K 及 mol 四个基本单位改为以物理学常数精确值的方式定义，这些常数中就包括普朗克常量  $h$  [其他常数分别是：元电荷( $e$ )、波尔兹曼常数( $k$ )及阿伏加德罗常数( $N_A$ )]。另外三个基本单位 s、m 和 cd，此前已经以物理学常数定义。

例如，kg 的定义就发生了根本性改变。kg 的旧定义依赖于人造国际千克原器，即：kg 是质量单位，1 kg 等于国际千克原器的质量。而新定义则可以等价地表达为：1 kg 等于频率总和为  $1.356\,392\,489\,652 \times 10^{50}$  Hz(基于 Cs133 原子不受扰动的基态超精细能级跃迁频率， $\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770$  Hz)的一组光子具有相同能量的物体的静止质量。显然，这一定义涉及的关系式是  $h\nu = m_0c^2$ ，其中含有的物理学常数就有光速  $c$  与普朗克常量  $h$ 。

## 本节编写思路

本节以光的波粒二象性切入,引出物质波假说并介绍实物粒子波动性的实验证据。本节的编写主线为:

1. 简要介绍康普顿效应及其对爱因斯坦光子假说的重要意义。以单光子双缝干涉实验进一步说明光的波粒二象性。

2. 简要介绍德布罗意物质波假说及其最重要的实验证据——电子的衍射实验。借助“STSE”,展现电子衍射现象的实际应用,反映科学与技术之间的关系。

学习过程中让学生经历认识光的波粒二象性、物质波假说以及电子衍射现象的过程,有助于学生形成科学的物质观念,领悟科学论证的严密性。

## 正文解读

[1] 引入部分承接上一节所提到的“光子假说所面临的尴尬”,引出光子说除光电效应现象之外的另一个实验证据——康普顿效应。

[2] 依照经典电磁理论,入射的电磁辐射使物质中原子的电子受到一个周期变化的作用力,迫使电子以入射波的频率振荡。振荡着的电子必然要向四面八方发射电磁波,其频率与振荡频率相同。例如,蓝色的衣服在镜子里决不会看到是红色的。因此,经典理论无法解释康普顿效应。

[3] 在经典理论中,波动是连续的、扩展于空间的;而粒子是离散的,甚至可以按照我们的假定集中于一点(质点)。因此,很难想象将这两种相反的属性赋予同一实体上。尽管光具有波粒二象性,但在特定的事例中,光要么显示波动性,要么显示粒子性,两种属性绝不同时出现。

## 第二节 波粒二象性

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

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

### ► 康普顿效应

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

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

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

### ► 光的波粒二象性

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

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

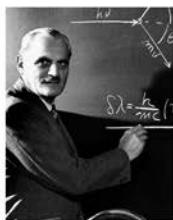


图14-11 康普顿  
(A. H. Compton,  
1892—1962)



图14-12 吴有训  
(1897—1977)

[1]

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

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

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

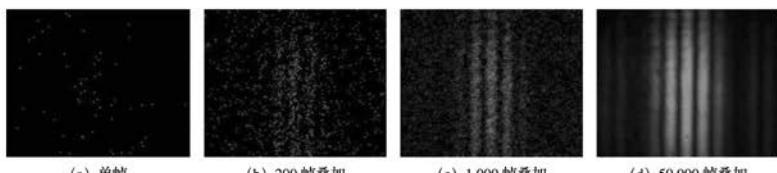


图 14-13 光子逐个通过双缝后的干涉图样

[2]

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

[3]

### 大家谈

怎样用概率来解释双缝干涉所形成的明暗条纹?

#### ► 实物粒子的波动性

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

[4]

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

粒子性会明显地表现出来。因为光子的能量和动量都正比于频率,所以波长越短的光,粒子性越明显。例如,X 射线和  $\gamma$  射线的波长极短,它们的粒子性是相当鲜明的,康普顿效应就是这方面的典型例子。

[3] 此处设置“大家谈”旨在帮助学生理解单个光子运动的不确定性。双缝干涉实验中,单个光子在光屏上的落点不确定,但大量光子在光屏上的落点分布是确定的。暗纹所在处,光子到达概率低;亮纹所在处,光子到达概率高。

[4] 德布罗意当时认为:“……在整整几个世纪的长时间里,当谈论关于光的理论时,人们过分地倾向于用波的概念而忽视微粒概念,那么在谈论物质的理论时,人们是否又犯了与此相反的错误呢? ……”从这一思想出发,他认为:“任何物质都伴随有波,而且不可能将物体的运动与波的传播分开。”

[1] 关于光子的动量,参阅本章第一节的“资料链接”。

[2] 单光子的干涉

实验表明,波动性是每个光子本身的固有属性,光子的干涉是自身的干涉,不是不同光子间的干涉。或者说,波动性不是大量光子在一起时才有的属性。对于光的波粒二象性应得到如下的物理图像,光是由光子组成的,光子在很多方面具有经典粒子的属性,但它们出现的概率(振幅和强度)却是按照波动光学的预言来分布的。由于普朗克常量极小,当频率不很高时,光子能量和动量很小,在很多情况下个别光子不易显示出可观测的粒子效应。人们平时看到的是大量光子的统计行为,这与波动光学所预言的无异。只有在一些特殊场合,尤其是涉及光的发射和吸收等过程时,个别光子的粒

[1] 德布罗意波长公式的推导涉及群速度、相速度和波包的概念。

[2] 对于总能量为  $E$ 、动能为  $E_k$ 、速度为  $v$ 、动量为  $p$ 、静止质量为  $m_0$  的自由粒子，由德布罗意波长和相对论动量公式，得其波长  $\lambda$  为

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_0 v \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

考虑到粒子总能量、动能和动量之间的关系，则

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{hc}{\sqrt{E^2 - m_0^2 c^4}} \\ &= \frac{hc}{\sqrt{2m_0 c^2 E_k + E_k^2}} \end{aligned}$$

当  $v \ll c$  时， $E_k = \frac{1}{2}m_0 v^2$ ，则

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx \frac{h}{\sqrt{2m_0 E_k}}$$

[3] 此处设置“自主活动”旨在引导学生运用德布罗意波长公式计算经过加速的电子的物质波波长，帮助学生体会电子的波粒二象性。静止的电子经 200 V 电压加速后，其速度远小于光速，可以用非相对论情形下的德布罗意波长公式，即

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 E_k}} = \frac{6.626 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 200}} \text{ m} \approx 0.0807 \text{ nm}$$

[4] 图 2 是戴维孙等人发现电子衍射实验的示意图。低能电子轰击镍单晶会发生衍射现象，主要表现在反射电子束的强度在一定角度下出现明显的最大值。G. P. 汤姆孙则利用高能电子被多晶体衍射的现象，通过衍射环直径计算电子波长，而不必像戴维孙等人那样靠反射逐点观察。

[1] 和量子理论导出了实物粒子波长  $\lambda$  与动量  $p$  之间的关系——德布罗意波长公式

[2]

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

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

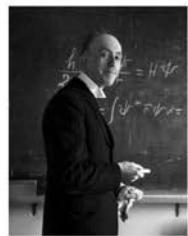


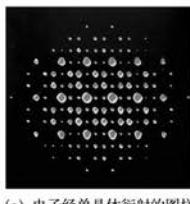
图 14-14 德布罗意  
(L. de Broglie, 1892—1987)

[3] 自主活动

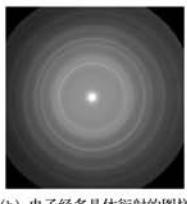
电子电荷量大小为  $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，质量为  $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 。利用实物粒子波长与动量的关系计算静止电子经 200 V 电压加速后的波长。

#### ► 电子的衍射实验

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



(a) 电子经单晶体衍射的图样



(b) 电子经多晶体衍射的图样

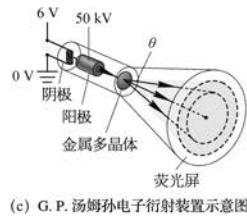


图 14-15 电子衍射

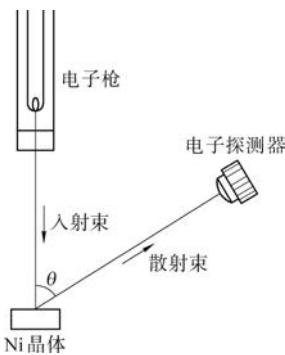


图 2

### [1] STSE

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

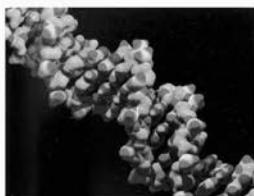


图 14-16 根据电子衍射实验推演的 DNA 大分子结构示意图

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

- [3] 20世纪30年代以后, 科学家陆续观察到中子、质子甚至原子的衍射现象, 它们的波长也都适用于德布罗意波长公式。1961年, 德国科学家将托马斯·杨的双缝实验进行改造, 直接做了电子双缝干涉实验, 从屏上摄得了类似杨氏双缝干涉图样的照片。如今, 一切物质都具有波粒二象性的观点成为物理学界的共识。

### [4]

#### 问题与思考

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

[1] 此处设置“STSE”

旨在引导学生了解电子衍射现象在结构分析中的应用。这里展现了“科学—技术—科学”的路径。

[2] 低能电子的衍射可用于微观结构分析技术。1933年, 电子显微镜研制成功。电子显微镜的原理与光学显微镜类似, 只不过用电子枪产生的电子束代替光源, 用电磁透镜聚焦电子束。

[3] 1961年, 德国科学家约恩孙(C. Jonsson)首次成功获得电子的双缝干涉图样。如图 3(a)所示, 他使灯丝 F 发射的电子经过 50 kV 的电压加速后, 穿过阳极上的小孔, 照射到用铜箔制成的双狭缝上。双缝宽度为  $a = 0.5 \mu\text{m}$ , 缝间距离  $d$  为  $1 \sim 2 \mu\text{m}$ , 电子束的德布罗意波长  $\lambda = 5.48 \times 10^{-3} \text{ nm}$ 。在缝后距离 0.35 m 处的荧光屏或照相底片上得到了清晰的等间距、等强度的双缝干涉图样[图

3(b)], 与光的双缝干涉完全一致, 明确地显示了电子具有波动的特征。

[4] 本节教学结束后, 建议教师引导学生比较微观粒子的波粒二象性与经典理论范畴内粒子和波动的差异。

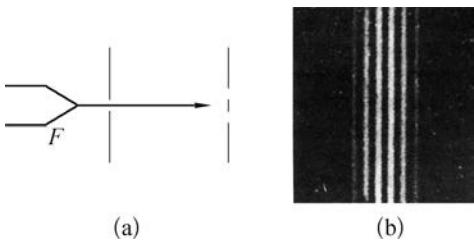


图 3

## 问题与思考解读

1. 参考解答：由德布罗意波长公式可知  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}}$ ，因为电子和质子的动能相同，而电子质量小于质子质量，故电子的物质波波长大于质子的物质波波长

命题意图：练习使用德布罗意波长公式分析微观粒子。

主要素养与水平：物质观念（I）；科学推理（II）。

2. 参考解答：由德布罗意波长公式可知  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.626 \times 10^{-34}}{0.005 \times 80} \text{ m} \approx 1.66 \times 10^{-33} \text{ m}$ ，远远小于宏观物体尺寸，比原子核尺寸  $10^{-15} \text{ m}$  还要小 18 个数量级，所以难以观察到它的波动性

命题意图：练习使用德布罗意波长公式分析宏观物体。

主要素养与水平：物质观念（I）；科学推理（I）。

3. 参考解答：从早期的感觉经验，到牛顿的微粒说、惠更斯的波动说，菲涅耳发展了波动说，麦克斯韦提出光的电磁理论，再到爱因斯坦提出光子说，人类对光的认识经过了一个曲折的、螺旋上升的过程。近代研究表明光既有波动性，又有粒子性，称为波粒二象性

命题意图：总结人类对光的本性认识的发展过程。

主要素养与水平：物质观念（I）；交流（I）。

## 本节编写思路

本节将原子结构模型与波粒二象性联系起来,通过引入电子云的概念,给出量子力学对原子结构的大致描述。本节的编写主线为:

1. 简要介绍用电子的物质波波长解释玻尔理论中的轨道量子化。

2. 简要介绍薛定谔方程以及波函数的统计诠释,说明物质波与机械波、电磁波的本质区别。

3. 通过对电子云的简要介绍,说明量子力学对原子结构的大致描述。

在学习过程中初步认识原子结构的量子力学模型,有助于学生形成对原子结构更加完整、科学的认识,并以此提升物质和运动的观念。

## 正文解读

[1] 引入部分简要地列出一些玻尔理论无法解释的具体问题,涉

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

### ▶ 物质波的本质

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

$$2\pi r = n\lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

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

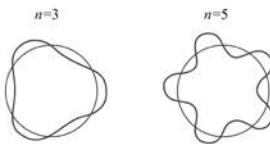


图14-17 核外电子轨道周长与电子波长的关系

### [3] 自主活动

利用德布罗意波长公式和玻尔理论中的核外电子轨道量子化条件推导出式(1)。

但是,德布罗意并没有给出物质波所满足的波动方程,因此无法知道物质波如何随时间变化。德布罗意的理论受到奥地利物理学家薛定谔(图14-18)的极大关注。1926年1月,薛定谔建立了物质波的波动方程,这个著名的方程就是描述原子中电子运动的薛定谔

及电子的自旋、塞曼效应、斯塔克效应、泡利不相容原理等内容。

[2] 德布罗意认为,要使绕原子核运动的电子能稳定存在,电子的物质波必须是一个驻波,即电子绕核一周以后,电子的物质波相位不变,由此便可得到式(1)。

[3] 此处设置“自主活动”旨在帮助学生理解物质波假说对玻尔理论的解释。由德布罗意波长公式  $p = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{mv}$ , 及轨道量子化条件  $mvr = n \frac{h}{2\pi} (n = 1, 2, 3, \dots)$ , 可得式(1)。

[1] 机械波是质点的振动在空间的传播；电磁波是一种变化的电磁场，是电磁场物质的传播。因此，经典理论对波有两种理解：波是物质的运动属性或波就是物质。若按以上观点理解微观粒子的波粒二象性，即将单个粒子看成由波组成（许多不同频率的单色平面波组成的波包）或者将波看成大量粒子分布密度的变化，都无法解释实验中观察到的粒子的行为。以电子的衍射或干涉实验为例，按照波函数的统计诠释，涉及大量电子的实验现象是一次测量中同时入射大量电子的统计结果；涉及单电子的实验现象是长时问内对单电子多次测量的统计结果。波函数的统计诠释与经典理论中的统计规律截然不同。经典理论的根本规律是“确定论”，统计规律只是处理多粒子体系的一种方法、工具或者说权宜之计。

方程。薛定谔方程的解称为波函数  $\Psi$ ， $\Psi$  是随时间和位置变化的复数函数。求解薛定谔方程，就可以得到运动电子的量子化能级，而不需要人为地规定某些量子化条件。

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

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

### ▶ 电子云

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

### [2] 拓展视野

[3] 1927年，德国物理学家海森堡（图14-20）提出了不确定原理，揭示了微观粒子位置和动量之间的关系。不确定原理表明，如果微观粒子的位置完全确定，则粒子的动量完全不确定；反之，若微观粒子的动量完全确定，则其位置完全不确定。

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

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

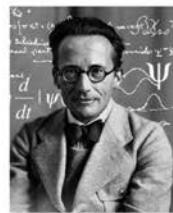


图14-18 薛定谔 (E. Schrödinger, 1887—1961)



图14-19 玻恩 (M. Born, 1882—1970)



图14-20 海森堡 (W. Heisenberg, 1901—1976)

[2] 此处设置“拓展视野”旨在提供不确定原理和矩阵力学的选读材料，有助于学生理解微观粒子的运动特点并为电子云的引入做准备。

[3] 不确定原理也叫做“测不准原理”，事实上微观粒子在客观上不能同时具有确定的位置及相应的动量，因而“不能同时精确地测量微观粒子的位置和动量”是客观规律的必然结果，并非测量本身使然！矩阵力学和波动力学连同波函数的统计诠释、不确定原理一起组成了非相对论量子力学的理论体系，这一理论体系还能解释电子自旋这类概念。1928年，狄拉克(P. Dirac, 1902—1984)建立的相对论量子力学成功地解释了电子自旋等现象。不过，相对论量子力学至今仍不是完善的。

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

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

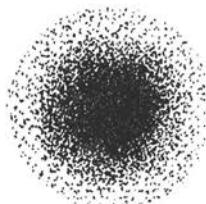


图 14-21 基态氢原子的电子云

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

### 问题与思考

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

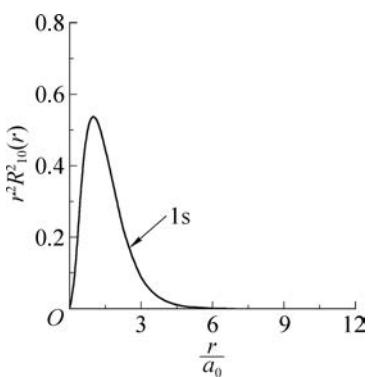


图 5

[1] 电子在原子核所形成的球对称性静电场中运动。电子的波函数可以表示为球半径  $r$  的函数、极角  $\theta$  的函数和方位角  $\varphi$  的函数的乘积，即

$$\Psi = R(r)\Theta(\theta)\Phi(\varphi)$$

$R(r)$  除与主量子数  $n$  有关外，还与角量子数  $l$  有关，常以  $R_{nl}(r)$  表示， $R_{nl}^2(r)$  则表示距核  $r$  处沿径向电子出现的概率密度。对于基态氢原子， $n=1, l=0$ 。由薛定谔方程解得

$$R_{10}(r) = 2\left(\frac{1}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{r}{2a_0}}$$

式中  $a_0$  为玻尔理论中基态氢原子核外电子的轨道半径。 $R_{10}^2(r) - \frac{r}{a_0}$  的图像如图 4 所示。

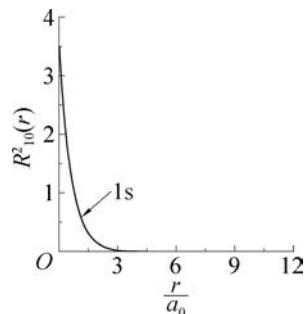


图 4

图 14-21 所示的基态氢原子的电子云即按图 4 所绘制。量子数不同，电子云的形状也不同。半径为  $r$ 、厚度为  $dr$  的薄球壳内电子出现的概率为  $4\pi r^2 R_{10}^2(r) dr$ ，则  $4\pi r^2 R_{10}^2(r)$  表示沿径向单位长度上电子出现的概率。显然， $r=0$  和  $r \rightarrow \infty$  时， $r^2 R_{10}^2(r)=0$ ；而  $r=a_0$  时， $r^2 R_{10}^2(r)$  最大。 $r^2 R_{10}^2(r) - \frac{r}{a_0}$  的图像如图 5 所示。

## 问题与思考解读

**1. 参考解答：**物质波是一种概率波，对应物质在空间各处出现的概率。波函数的统计诠释为某一时刻空间某一位置波函数模的二次方正比于该处单位体积内找到该波函数所描述粒子的概率

**命题意图：**了解物质波概念。

**主要素养与水平：**物质观念(I)；交流(I)。

**2. 参考解答：**玻尔理论将电子视作经典意义上的粒子，认为其在确定的轨道上运动并在任意时刻都具有确定的位置和动量，而量子力学认为电子具有波动性，电子在原子内各处出现的概率分布是确定的，但不存在确定的运动轨道

**命题意图：**通过对比，了解原子结构的量子力学模型。

**主要素养与水平：**物质观念(I)；交流(I)。

**3. 参考解答：**根据量子力学的观点，我们只能知道电子在原子内各处出现的概率分布。如果我们用小黑点的疏密表示电子在核外各处出现的概率分布，原子核似乎被一层“云雾”所笼罩，这种“云雾”被称为电子云

**命题意图：**了解原子结构的量子力学模型。

**主要素养与水平：**物质观念(I)；交流(I)。

## 小结

· 基本概念和基本规律

光电效应：金属在光的照射下发射出电子的现象。

光电子：光电效应中从金属表面发射出来的电子。

光子：光是由一份一份能量子组成的，这些能量子被称为光子。

光电效应方程： $E_{km} = h\nu - W$ 。

波粒二象性：微观粒子既有波动性又有粒子性。

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

· 基本方法

通过光子说、物质波假说建立过程的学习，感受物理学中建立假说的方法。

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

· 知识结构图



## 复习与巩固解读

94 第十四章 微观粒子的波粒二象性

**1. 参考解答:** 根据光子说可知, 电子吸收一个光子的能量  $E$  后, 如果足够克服逸出功  $W$ , 则能从金属表面逸出, 且光子的能量  $E = h\nu$  正比于入射光的频率  $\nu$ 。故入射光的频率  $\nu$  必须大于截止频率  $\nu_0 = \frac{W}{h}$  才能产生光电效应。

**命题意图:** 理解光子说, 并运用光子说解释截止频率。

**主要素养与水平:** 科学推理(I); 模型建构(I)。

**2. 参考解答:** 赖曼系紫外线的波长满足

$$\text{公式 } \frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

( $n = 2, 3, 4, 5, \dots$ ), 当  $n = 2$  时, 光子最小能量

$$E_{\min} = \frac{hc}{\lambda} = hcR \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right)$$

$$\approx 1.635 \times 10^{-18} \text{ J.}$$

由截止频率  $\nu_0 = 8.065 \times 10^{14} \text{ Hz}$  可知, 锌的逸出功  $W = h\nu = 6.626 \times 10^{-34} \times 8.065 \times 10^{14} \text{ J} \approx 5.34 \times 10^{-19} \text{ J}$ , 最大初动能  $E_{km} = E_{\min} - W \approx 1.10 \times 10^{-18} \text{ J}$ 。量子数为  $n$  的赖曼系紫外线光子能量为  $E_n$ , 对应的光电子最大初动能  $E_{kmn} = E_n - W$ , 故将这些所有的取值画成的“能级图”与氢原子能级图赖曼系部分一一对应, 只相差一个常数  $W$ 。

**命题意图:** 使用“能级图”的方法将数据可视化, 并建立不同数据间的联系。

**主要素养与水平:** 物质观念(I); 交流(I)。

**3. 参考解答:** 真空中的光速总是恒定值, 光子碰撞前后的速率不变, 频率改变

**命题意图:** 理解光子说, 对比光子与经典粒子的差异。

**主要素养与水平:** 物质观念(I); 科学推理(I)。

**4. 参考解答:** 由  $E = cp$ 、 $E = h\nu$  可知  $\frac{h}{p} = \frac{c}{\nu}$ , 结合光速  $c$ 、波长  $\lambda$  与频率  $\nu$  的关系  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ , 得  $\lambda = \frac{h}{p}$

### 复习与巩固

- 用光子说解释入射光的频率必须大于截止频率才能产生光电效应的原因。
- 用氢原子赖曼系光谱中的紫外线逐一照射锌板, 光电子最大初动能的最小值为多少? 将所有最大初动能可能的取值画成的“能级图”与氢原子能级图赖曼系部分的关系如何? (氢原子的赖曼系光谱介绍参见第 72 页拓展视野, 锌的截止频率为  $8.065 \times 10^{14} \text{ Hz}$ )
- 经典粒子动量大小的变化往往意味着粒子速率的变化。真空中光子与静止电子碰撞后, 光子的动量减小, 其速率是否也减小?
- 光子的能量为  $E = cp$ , 其中  $c$  为真空中的光速,  $p$  为光子动量。利用这一关系推导物质波波长公式。
- 如果 LED 灯消耗的电功率有 80% 产生可见光, 试估算 10 W 的 LED 灯泡 1 s 内发出的可见光光子数数量级。
- 以表格形式列举本章学习过的光具有波动性和粒子性的证据。
- 蜻蜓质量约 1 g, 其飞行速度可以达到 40 km/h。已知普朗克常量  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , 计算快速飞行的蜻蜓的物质波波长, 简述日常生活中没有察觉到物体波动性的原因。
- 普朗克在《热辐射理论》一书中, 用引力常量  $G$ 、光速  $c$  和普朗克常量  $h$  导出了具有长度、时间和质量单位的三个物理量, 即普朗克长度  $L_p$ 、普朗克时间  $T_p$ 、普朗克质量  $m_p$ 。已知  $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 、 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 、 $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , 猜测普朗克质量  $m_p$  的表达式并计算数值。
- 我们已经知道动量守恒定律适用于康普顿效应, 试判断在光电效应中动量守恒定律是否适用于光子和电子组成的系统。

**命题意图:** 理解物质波波长、动量和能量之间的关系。

**主要素养与水平:** 科学推理(I)。

**5. 参考解答:** LED灯1 s内消耗10 J电能,产生光能为8 J的光子,有 $E_{\text{光}}=nh\nu$ 。

频率取可见光频率范围中间值 $6\times 10^{14}$  Hz代入计算,可得1 s内光子数 $n=\frac{E_{\text{光}}}{h\nu}=\frac{8\text{ J}}{6.626\times 10^{-34}\times 6\times 10^{14}\text{ J}}\approx 2\times 10^{19}$

**命题意图:** 通过估算光子数,建立光子模型在实际生产生活中的印象。

**主要素养与水平:** 物质观念(I);科学推理(I)。

**6. 参考解答:**

波动性证据	光的双缝干涉
粒子性证据	光电效应、康普顿效应

**命题意图:** 通过证据的收集,理解光的波粒二象性。

**主要素养与水平:** 物质观念(I);证据(I)。

**7. 参考解答:** 由德布罗意波长公式可知 $\lambda=\frac{h}{p}=\frac{6.626\times 10^{-34}}{0.001\times 11}\text{ m}\approx 6\times 10^{-32}\text{ m}$ ,远远小于宏观物体

尺寸,比原子核尺寸 $10^{-15}\text{ m}$ 还要小17个量级,我们难以观察到它的波动性

**命题意图:** 练习使用德布罗意波长公式分析宏观物体。

**主要素养与水平:** 物质观念(I);科学推理(I)。

**\*8. 参考解答:** 设 $m_p=h^a G^b c^c$ ,利用量纲分析有 $[m_p]=[h]^a [G]^b [c]^c$

$$\begin{aligned} \text{即 } kg^1 &= J^a \cdot s^a \cdot N^b \cdot m^{2b} \cdot kg^{-2b} \cdot m^c \cdot s^{-c} \\ &= kg^a \cdot m^{2a} \cdot s^{-2a} \cdot s^a \cdot kg^b \cdot m^b \cdot s^{-2b} \cdot m^{2b} \cdot kg^{-2b} \cdot m^c \cdot s^{-c} \\ &= kg^{a+b-2b} \cdot m^{2a+b+2b+c} \cdot s^{-2a+a-2b-c} \\ &= kg^{a-b} \cdot m^{2a+3b+c} \cdot s^{-a-2b-c} \end{aligned}$$

有 $a-b=1$ , $2a+3b+c=0$ , $-a-2b-c=0$

$$\text{故 } a=\frac{1}{2}, b=-\frac{1}{2}, c=\frac{1}{2}.$$

$$\text{普朗克质量 } m_p=\left(\frac{hc}{G}\right)^{\frac{1}{2}}\approx 5.46\times 10^{-8}\text{ kg}$$

**命题意图:** 知道普朗克质量。

**主要素养与水平:** 物质观念(I);科学推理(II)。

**\*9. 参考解答:** 不适用。因为在光电效应中电子受到金属材料的束缚作用,不满足动量守恒定律中合外力为零的条件

**命题意图:** 在陌生的微观情境中运用熟悉的经典理论,体验规律的普适性。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用观念(I);科学推理(II)。

## 第三部分 本章练习部分解读

### 第一节 光电效应 光子说

1. 失去 光电效应 爱因斯坦

2. ✓ ✓ ✗ ✓ ✗

3. 根据光子说理论,光子的能量  $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ , 取最短波长  $\lambda = 4.0 \times 10^{-7} \text{ m}$ , 则最大光子能量  $E_{\max} \approx 5.0 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。根据  $E_{\max} > W$  判断, 钠、钾、铷能发生光电效应

4. 光是由一份一份的光子组成的,一个光子的能量  $E = h\nu$ ,  $\nu$  为光的频率。当光子照射到金属上时,一个光子的能量可以被金属中某个电子全部吸收,该电子吸收光子能量后,动能立刻增大,不需要一个积累能量的过程。如果电子的动能足够大,能够克服金属对它的束缚,电子就可以从金属表面逃逸出来,成为光电子,这就是光电效应。

一次光电子的产生几乎是瞬时的。金属中的电子只有获得足够的能量,才能克服金属对它的束缚成为光电子。光子频率小于某一值时,电子获得的一个光子的能量不足以克服金属对它的束缚,则不会发生光电效应,因此存在截止频率

### 第二节 波粒二象性

1. ⑤ ③④ ①②

2. C

3. 经 50 kV 电压加速的电子的动能  $E_k = eU = 8.0 \times 10^{-15} \text{ J}$ , 动量  $p = \sqrt{2m_e E_k} \approx 1.2 \times 10^{-22} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ,  
由德布罗意波长公式可知  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.626 \times 10^{-34}}{1.2 \times 10^{-22}} \text{ m} \approx 5.5 \times 10^{-12} \text{ m}$

### 第三节 原子结构的量子力学模型

1. 玻尔、薛定谔、海森堡、玻恩等 微观

2. ✗ ✓ ✓

3. 玻尔理论中电子在确定的轨道上运动。量子力学认为我们只能知道电子在原子内各处出现的概率分布,如果用小黑点的疏密表示电子在核外各处出现的概率分布,原子核似乎被一层“云雾”所笼罩,这种“云雾”被称为“电子云”。玻尔理论中的电子轨道对应“电子云”中电子出现概率最大的地方

# 第十五章 原子核

## 第一部分 整 章 分 析

### 学习目标

- 通过对原子核相关内容的教学,帮助学生形成科学的物质观念,了解原子核的组成与核力的性质,对自然界四种基本相互作用有初步了解,能根据质量数守恒和电荷数守恒写出相应的核反应方程。
- 对原子核的结构和特点及放射性有初步了解,能说明原子核的衰变和放射现象,知道半衰期及其统计意义,对放射性同位素在不同领域的简单应用有一定了解,知道射线的危害与防护。
- 认识原子核的结合能,初步理解爱因斯坦质能方程,初步了解核裂变及核聚变反应,关注并了解核技术应用及核能对人类生活和社会发展的影响。
- 了解人类对物质结构的探索历程,了解直线加速器、同步加速器、粒子探测器在核物理和粒子物理研究中的作用,了解华人科学家在粒子物理领域中的杰出贡献。
- 通过本章内容的学习,引导学生初步认识科学技术对人类生活和社会发展的积极影响及可能带来的问题,认识到人与自然是生命共同体,人类必须敬畏自然、尊重自然、遵循自然规律。

### 编写意图

课程标准中对本章的“内容要求”为:

- 3.3.2 了解原子核的组成和核力的性质。知道四种基本相互作用。能根据质量数守恒和电荷守恒写出核反应方程。
- 3.3.3 了解放射性和原子核衰变。知道半衰期及其统计意义。了解放射性同位素的应用,知道射线的危害与防护。
- 3.3.4 认识原子核的结合能,了解核裂变反应和核聚变反应。关注核技术应用对人类生活和社会发展的影响。
- 3.3.5 了解人类对物质结构的探索历程。

本章首先从贝克勒尔发现天然放射现象出发,引出对放射性及原子核衰变的讨论,介绍各种射线的性质并引入半衰期的概念。随后,讨论原子核的结构,介绍质子和中子的发现,引入同位素的概念并介绍同位素的应用。接着,通过核裂变、核聚变的介绍,引入结合能的概念,讨论如何和平利用核能。最后,从中微子和正电子的发现出发,对加速器及对撞机进行了初步的介绍,对粒子物理的现状做了简要总结。

完成本章内容的学习,共需要 4 课时,其中第一节 1 课时,第二节 1 课时,第三节 1 课时,第四节 1 课时。

## 第二部分 本章教材解读

# 第十五章 **原子核**

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

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

## 本节编写思路

本节从贝克勒尔发现天然放射现象出发,讨论放射性及原子核衰变的性质并引入半衰期的概念。

## 正文解读

[1] 德国物理学家伦琴在研究阴极射线时,无意中发现了X射线,由此引发了物理学界对X射线性质研究的极大兴趣。贝克勒尔受到伦琴的启发,试图研究磷光物质在阳光照射下是否会辐射X射线。由于天气的原因,无意中发现含铀矿石在未被阳光照射的情况下能自发地辐射未知射线使照相底片感光,由此发现了铀的放射性,进而开启了对原子核结构的研究。

[2] 居里夫人认为,放射性不是铀元素独有的性质,而是具有一定普遍性的现象。经

### 第一节 天然放射现象 原子核的衰变

[1]



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

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

#### ► 天然放射现象 放射性

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

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

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

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



图 15-2 铀辐射照片



图 15-3 居里夫妇在做实验

过几年的艰苦努力,居里夫妇发现了放射性更强的钋和镭,并从成吨的矿渣中提炼出 0.1 g 镭。

[3] 放射性是自然界的普遍现象,原子序数 83(铋)以上的元素都属于放射性元素,而原子序数低于 83 的元素中也有一些是放射性元素(如 43 号锝、61 号钷等)。2003 年发现铋也有极微弱的放射性。所有元素都存在具有放射性的同位素,如氢 3(即氚)、碳 14、钴 60、铀 235、钍 232 等,目前已知的放射性同位素超过 2 000 种。

[4] 在国际单位制中,描述放射性活度的单位为贝克勒尔(Bq),在此之前的常用单位为居里(Ci)。1 贝克勒尔定义为每秒 1 个原子衰变,而 1 居里定义为每秒  $3.7 \times 10^{10}$  个原子衰变。

[1] 所谓射线，就是具有一定能量的粒子束流。从阴极射线、X射线，到 $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线和 $\gamma$ 射线，这些能量不同、性质各异的射线成为物理学家研究物质结构的有力工具。粒子能量越高，就越有利于探究物质的深层次结构。

[2] 此处设置“大家谈”的目的是引导学生寻求科学证据并结合 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 粒子的性质作出科学论证。

参考答案：虽然 $\alpha$ 粒子受到的电场力是电子所受电场力的2倍，但 $\alpha$ 粒子的质量是电子质量的7300多倍，所以电子在电场中的加速度远大于 $\alpha$ 粒子的加速度，因此电子的偏转更大。

[3] 研究 $\beta$ 衰变时，测量发现电子的能谱是连续的，这与 $\beta$ 衰变是两体衰变的流行观点不符。曾有物理学家认为能量守恒对 $\beta$ 衰变过程可能不成立。泡利认为，能量守恒是物理学的基本原理，对任何物理过程都应该成立。实际上当原子核发生 $\beta$ 衰变时，除了辐射电子，还会辐射不带电、质量几乎为零的中性粒子。费米将这个粒子称为中微子，以区别于卢瑟福所预言的中子。

### ► 三种射线

[1] 1898年至1902年间，卢瑟福等人先后从含铀物质的射线中发现了三种穿透能力不同的成分，卢瑟福将这三种射线分别命名为 $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线和 $\gamma$ 射线。

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

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

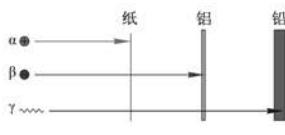


图15-4 三种射线穿透能力的比较

[2]

### 大家谈

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

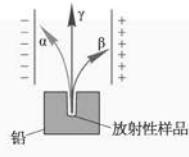


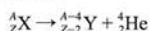
图15-5 三种射线在电场中的偏转

### ► 原子核的衰变

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

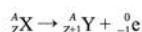
在物理学中，用符号 ${}^A_Z X$ 来表示某种元素的原子核。其中X为元素符号，A表示原子核的质量数，Z表示原子核的核电荷数，也就是原子序数。

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



[3]

原子核放出 $\beta$ 粒子的衰变过程称为 $\beta$ 衰变， $\beta$ 衰变的过程可以表示为\*



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

### [1] 自主活动

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

- [2] 发生 $\alpha$ 衰变或 $\beta$ 衰变后，有些原子核处于激发态，处于激发态的原子核可以通过发射 $\gamma$ 射线的方式跃迁到基态。原子核放出 $\gamma$ 射线时，其质量数和电荷数不发生变化。

### [3] STSE

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

#### ► 放射性元素的半衰期

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

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

#### 问题与思考

- 放射性元素发出三种射线，通过水平向右的匀强电场时呈现如图15-6所示的三种不同轨迹①、②、③，试指出它们分别是什么射线。
- 带电的验电器在放射线的照射下电荷会很快消失，简述其原因。
- $^{210}_{83}\text{Bi}$ 的半衰期是5天。 $10\text{ g }^{210}_{83}\text{Bi}$ 经过20天后还剩下多少？

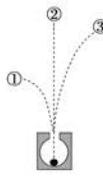


图 15-6

变。根据定义，一定量的放射性原子核经过足够长的时间就会有足够多的原子核发生衰变，但不会全部发生衰变。原子核衰变满足的是指数衰变律。

### 问题与思考解读

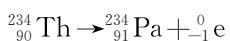
- 参考解答：①是 $\beta$ 射线，②是 $\gamma$ 射线，③是 $\alpha$ 射线

命题意图：理解天然放射现象中射线粒子所带的电荷。

主要素养与水平：科学推理（Ⅱ）。

- 参考解答：放射线使验电器周围的空气电离，电荷通过导电的空气被转移

[1] 此处设置“自主活动”的目的是帮助学生理解衰变过程所遵循的电荷数守恒和质量数守恒。核反应方程如下：



### [2] 原子及原子核

从激发态跃迁到较低能量状态时会发射相应能量的光子。原子的激发主要是核外电子的激发，一般能量不高，而原子核的激发能量要高得多。因此当原子核从激发态跃迁到较低能量状态时，会辐射高能的 $\gamma$ 光子，即 $\gamma$ 射线。

### [3] STSE

此处设置“STSE”的目的是引导学生科学地认识射线可能造成的危害及防护常识。

[4] 半衰期描述的是大量放射性元素原子核的衰变规律，对单个原子核，我们并不知道什么时候它会发生衰

**命题意图：**知道射线的基本性质。

**主要素养与水平：**科学推理(Ⅰ)。

**3. 参考解答：**20 天等于 4 个半衰期, 经过 20 天后该 Bi 源的剩余量为原来的  $\left(\frac{1}{2}\right)^4 = \frac{1}{16}$ , 即剩余

0.625 g 的 Bi

**命题意图：**应用半衰期解决简单问题。

**主要素养与水平：**科学推理(Ⅰ)。

## 本节编写思路

本节主要讨论原子核的结构,介绍质子和中子的发现,引入同位素的概念,对同位素的应用作简单介绍。

### 第二节 原子核的组成

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

#### ▶ 质子的发现

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

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

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

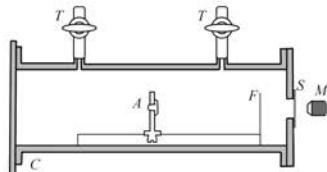


图15-7 卢瑟福发现质子的实验装置示意图

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

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

### 正文解读

[1] 卢瑟福根据金箔的 $\alpha$ 粒子散射实验,提出原子由原子核及核外电子组成。进一步的实验发现,原子核虽然尺度很小(只有 $10^{-15}\text{ m}$ ),但仍具有结构。利用较高能量的 $\alpha$ 粒子等粒子轰击原子,可以使原子电离,进而确定原子是由原子核及核外电子构成的。而要探究原子核的结构,则需要用更高能量的粒子来轰击原子核,才有可能打开原子核的神秘之门。

[2] 从20世纪初开始,卢瑟福和他的学生做了大量的 $\alpha$ 粒子散射实验,以探究原子及

原子核的结构。马斯登在1914年发现,实验中出现了穿透能力比 $\alpha$ 粒子强得多的新粒子,卢瑟福精心设计实验并经过几年的实验探索,确认这个新粒子就是氢核,并将其命名为质子。实验证明,用 $\alpha$ 粒子轰击各种不同的原子核均能产生质子,因此可以确定质子是原子核的组成部分。卢瑟福通过用 $\alpha$ 粒子轰击原子核后导致原子核的衰变,第一次通过人工方法实现了核反应,这一方法很快成为人们研究原子核和应用核技术的重要手段。应当注意,核反应过程中不仅质量数和电荷是守恒的,能量和动量也是守恒的。

[1] 根据实验,如果 $\alpha$ 粒子从氮原子核直接打出质子并被散射,那么在撞击点 $\alpha$ 粒子的径迹就会出现三分叉现象。如果 $\alpha$ 粒子是与氮原子核撞击后形成新的原子核同时放出质子,在撞击点 $\alpha$ 粒子的径迹则会出现两分叉现象。布拉凯特利用云室证明第二种猜测是正确的。

[2] 此处设置“大家谈”的目的是帮助学生理解 $\alpha$ 粒子击中氮原子核的概率。

参考答案:因为氮气的密度很低,原子核又很小,所以 $\alpha$ 粒子撞到氮原子核的概率很小。按第一种猜测,应该出现三分叉现象。

[3] 此处设置“拓展视野”的目的是简要介绍云室的结构和工作原理。云室又称威尔逊云室,是由英国物理学家威尔逊发明的用来显示带电粒子径迹的仪器,在核物理及粒子物理发展历史上曾起过重大作用。物理学家用云室先后发现了正电子、 $\mu$ 介子等粒子,我国物理学家王淦昌领导的实验组利用云室发现了反 $\Sigma^-$ 超子。

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

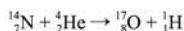


图15-8 布拉凯特所摄的云室照片

## [2] 大家谈

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

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

## [3] 拓展视野

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

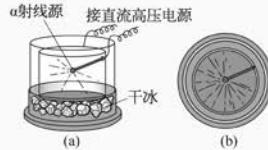


图15-9 云室

### ► 中子的发现

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

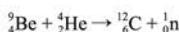
卢瑟福猜想原子核内可能存在由一个电子和一个质子紧密结合的中性双子,这种中性

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

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

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

发现中子的核反应方程是



实验证实，从许多原子核中都能打出中子，可见中子也是原子核的组成部分。

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

## [2] 自主活动

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

### ▶ 同位素

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



图15-10 查德威克 (J. Chadwick, 1891—1974)



图15-11 原子核模型

[1] 中子的发现是

核物理发展的一个里程碑，不仅圆满解决了原子核结构的问题，对中子的进一步研究也推动了核物理的飞速发展以及核能的开发利用。利用中子来撞击原子核，比用 $\alpha$ 粒子撞击产生的效果更好。费米利用中子轰击铀产生链式反应，使核能的利用成为可能。

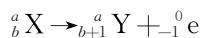
[2] 此处设置“自主活动”的目的是帮助

学生进一步理解中子的性质。

参考答案：中子不带电，与组成原子核的质子不会发生库仑力作用，所以更容易打进原子核。

[1] 此处设置“自主活动”的目的是帮助学生理解 $\beta$ 衰变的机理。

参考答案： $\beta$ 衰变过程中，原子核中的一个中子发生衰变，放出电子，而衰变产生的质子留在原子核中。核反应方程如下：



[2] 元素的化学性质是由外层电子决定的，而原子的核外电子数与质子数相同。同一种元素的不同同位素之间的差别只是原子核包含的中子数不同，因此具有相同的化学性质。

[3] 此处设置“STSE”的目的是简要介绍同位素在医学检测中的实际应用。将稳定的化学元素与其少量具有放射性的同位素混合在一起，就可以利用放射性来确定这种元素的运动情况及与其他物质的作用。这称为示踪原子法，在生物、化学、医学及工业上都有广泛的应用。

### [1] 自主活动

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

[2] 具有相同质子数、不同中子数的原子核互称为同位素(isotope)。例如， ${}^{11}_6 C$ 、 ${}^{12}_6 C$ 、 ${}^{13}_6 C$ 、 ${}^{14}_6 C$ 、 ${}^{15}_6 C$ 都是碳的同位素，但碳的各种同位素在自然界中的含量不同。譬如自然界中碳12是含量最多的碳同位素，占碳元素总量的98.9%。同位素的化学性质相同。有些同位素具有放射性，称为放射性同位素。

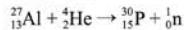
### [3] STSE

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

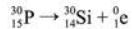
### [4] ▶ 人工放射性

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

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



这一核反应的生成物磷30具有放射性，发生正电子衰变，衰变方程是



磷30是首个通过人工方法获得的放射性同位素，这是一个重要发现。此后，科学家用质子、氘核、中子和 $\gamma$ 粒子轰击原子核，也都得到了放射性同位素。此前，我们已经知道原子序数大于83的天然存在的元素都具有放射性。事实上，天然放射性元素只有40多种，原子序数超过92的放射性同位素都是通过人工方法获得的。现在，利用原子能反应堆和粒子加速器生成的同位素已经超过2000种，每种元素都有放射性同位素。

### [1] 放射性同位素的应用

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

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

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

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

#### 问题与思考

1. 原子核A比原子核B的质量大，能否判定A也一定具有更大的原子序数？简述理由。
2. 长（Sr）的原子序数是38、质量数是95，一个长核有多少个中子、多少个质子？
3. 用 $\alpha$ 粒子轰击氮14，产生一个中子和一个反冲核，写出其核反应方程。
4. 估算氢原子核的密度。

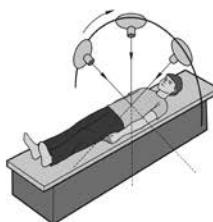


图15-12 患者正在进行放射性治疗



图15-13 人工全合成结晶牛胰岛素五十周年纪念邮票

### [1] 放射性同位素

目前广泛应用于工业、农业、医学及科学研究。科学家利用碳14的放射性来测定古生物的年代；工业上利用放射性进行无损检测；农业上用射线照射种子培育新品种，杀灭害虫。

## 问题与思考解读

### 1. 参考解答：

不能。原子序数等于原子核中的质子数，质量数等于原子核的核子数，即质子数加中子数。原子核A的质量大，说明其质量数更大，也就是核子数更多，但无法确定其质子数一定更多。而原子序数等于原子核的质子数，因此不能确定A一定具有更大的原子序数。

**命题意图：**知道原子序数与原子核质量的关系。

**主要素养与水平：**模型建构（I）；科学推理（I）。

### 2. 参考解答：长核有57个中子、38个质子

**命题意图：**知道原子序数、质量数与原子核内质子数、中子数的关系。

**主要素养与水平：**模型建构（I）；科学推理（I）。

### 3. 参考解答：根据质量数和电荷数守恒可得 ${}_{7}^{14}\text{N} + {}_{2}^{4}\text{He} \rightarrow {}_{0}^{1}\text{n} + {}_{9}^{17}\text{F}$

**命题意图：**知道原子核反应的基本规律。

**主要素养与水平：**模型建构（I）；科学推理（I）。

### 4. 参考解答：氢原子核只含有一个质子，质子的质量 $m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，原子核的半径 $r = 10^{-15} \text{ m}$ ，可

$$\text{得氢原子核密度 } \rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r^3} \approx 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

**命题意图：**原子核的尺度及密度量级的基本认识。

**主要素养与水平：**模型建构(I);科学推理(I)。

## 本节编写思路

本节通过核裂变、核聚变的介绍，引入结合能的概念，讨论如何和平利用核能。

### 第三节 核能及其应用

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

#### ▶ 核力

[2]

#### 大家谈

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

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

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

[4]

#### 大家谈

指出库仑力与核力的不同之处。

#### ▶ 原子核的结合能和平均结合能

要使一个核子脱离原子核，外界必须克服核力做功。因此，将原子核分解成彼此分离的核子，所有核子的能量之和比未分离的原子核能量大。例如，用能量为 2.22 MeV 的  $\gamma$  粒子照射氘核 ( ${}^2\text{H}$ )，会发生如下的核反应

为吸引力，距离小于 0.8 fm 时表现为斥力，而距离大于 4~5 fm 时核力急剧下降，几乎消失。核力是强相互作用在核子层面的表现。

- [4] 此处设置“大家谈”的目的是引导学生比较库仑力与核力的特点，加深对核力的理解。

参考答案：库仑力是长程力，大小与电荷量乘积成正比、与距离的二次方成反比；而核力是短程力，只在核子尺度范围内起作用，且与电荷量无关，核力大小与距离的关系比较复杂。

## 正文解读

[1] 核反应释放能量的基本原理就是爱因斯坦质能方程。核反应前后发生质量亏损，亏损的质量乘以光速的二次方即为释放的能量。

[2] 此处设置“大家谈”的目的是帮助学生理解核力存在的证据。

参考答案：原子核可以保持稳定，说明核子之间还存在一种比库仑斥力更强的作用力，且在原子核内部一定的距离范围内表现为相互吸引作用。

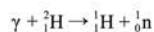
[3] 核力大小与距离有关，当核子间距离在 0.8~1.5 fm 时表现

[1] 原子核的结合能即分散的核子结合成原子核时释放的能量。反之,要将组成原子核的核子分开,就需要提供一定的能量。分子的结合能在 eV 的量级,而原子核的结合能在 MeV 的量级,大了 100 万倍。因此,核反应释放的能量比化学燃烧释放的能量要大得多。

[2] 很显然,原子核平均结合能越大,原子核内的核子就结合得越紧密,就越不容易打破,也就越稳定。所以铁是最稳定的元素。

[3] 哈恩和迈特纳的研究一开始是希望通过用中子轰击铀来制造出比铀更重的元素。但实验结果与预期相反,没有重元素出现,却发现了较轻的元素钡。迈特纳认为,这是铀 235 被中子轰击后分裂成两个较轻的元素——钡和氪,同时放出几个中子。

迈特纳将这个现象称为核裂变,并利用爱因斯坦质能方程计算了核裂变释放的巨大能量。



反之,在中子和质子结合成氘核的过程中会放出一个能量为 2.22 MeV 的  $\gamma$  粒子。这表明,原子核分解成核子需要吸收一定的能量;核子结合成原子核时则放出同样大的能量。原子核各个核子彼此分离状态下的能量总和与该原子核能量之差称为原子核的结合能

[1] (binding energy)。氘核的结合能为 2.22 MeV。原子核的核子数越多,结合能越大。

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

$$E = \Delta mc^2$$

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

图 15-14 反映了元素原子核的平均结合能

随核子数变化的关系。绝大多数元素原子核的平均结合能在 8 MeV 左右,图线左侧是轻核(核子数很小的原子核),例如,  ${}^2H$  和  ${}^3He$  的结合能小于 3 MeV,这些原子核中的核子结合得不太紧密。

[2] 平均结合能在铁 56 附近达到最大值,这些原子核结合得最紧密,原子核最稳定。图线右侧重核(核子数很大的原子核)的平均结合能均小于中等质量原子核(核子数在 50~60 左右)的平均结合能,例如,铀 238 的平均结合能比铁 56 小 1 MeV 左右。当重核分裂成两个或多个中等质量的原子核时,将有一部分结合能释放出来。

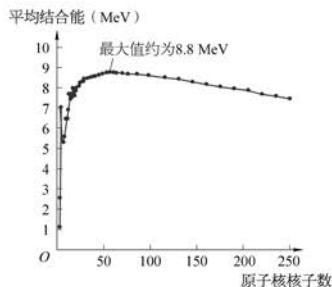


图 15-14 平均结合能与核子数的关系

### ► 原子核的裂变

[3] 1938 年,德国物理学家哈恩与助手发现中子轰击铀 235 后,产生一个钡原子核。奥地利物理学家迈特纳和弗利胥用“液滴模型”对哈恩发现的核反应做了解释。

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

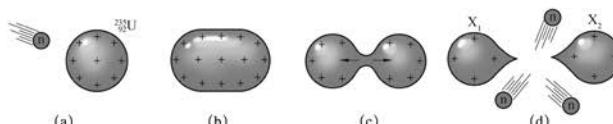
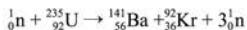


图 15-15 铀 235 裂变的液滴模型

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

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



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

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



图 15-16 钱三强夫妇

#### ► 链式反应

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

要产生自发、持续的链式反应还需要具备三方面的条件。

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

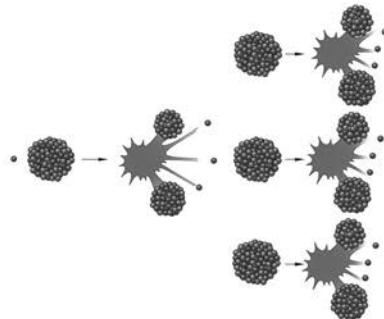


图 15-17 铀 235 链式反应示意图

在钚 239 的外围放置铀 238，钚 239 裂变产生的快中子能将铀 238 变成钚 239，即钚裂变在产生能量的同时，又将铀 238 变成燃料，因此快中子反应堆也叫增殖堆。由于自然界的铀 235 储量极为有限，快堆的推广应用，将大大提高铀资源的利用率，快堆将是今后核电发展的主要堆型。

[1] 要想利用核能，就需要利用提纯技术获得高浓度的铀 235。核电站所用的核燃料为 3% 的低浓缩铀，而制造核武器则需要 80% 以上的高浓缩铀。所以，普通的含铀矿石的辐射并没有想象的那么大，辐射强度跟 X 射线检查差不多，不必“谈铀色变”。

[2] 铀 235 在中子的轰击下发生裂变，同时放出几个高能自由中子。由于铀 235 在天然铀中占比极低，为了提高反应堆的裂变效率，需要利用轻水或重水等作为慢化剂将裂变产生的高速中子通过碰撞减速成慢中子。这类反应堆的缺点是天然铀中绝大部分的铀 238 不参与裂变，只是核废料。目前一种新型的反应堆是所谓快中子反应堆，简称“快堆”。这种反应堆不需要慢化剂，利用钚 239 作为裂变燃料。

[1] 自从第一个核裂变反应堆建成以来，反应堆的技术有了长足的进步。在军用、民用各方面都有了广泛的应用，核潜艇、核动力航母技术都已经非常成熟。

[2] 自 1951 年美国首次实现利用核能发电，核电技术已经走过 70 多年历程，核电站从第一代发展到目前的第四代，不断向更高效、更安全、更环保的方向发展，第五代核电技术也在研发之中。中国第一座核电站——秦山核电站 1991 年并网发电，经过多年努力，中国的核电技术已经达到国际一流水平。截至 2023 年 4 月，中国正在运行的核电规模已达世界第三，在建的核电规模居世界第一。

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

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

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

#### ► 核裂变反应堆

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

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

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

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

[2] 图 15-19 是核电站的示意图。反应堆工作时，链式反应所释放的核能将转化成内能使裂变反应堆温度升高。利用水、液态金属钠或空气等流体作为冷却剂，在反应堆内外循环流动，不断带走热量。利用这些热量使水汽化并驱动汽轮发电机发电。一座百万千瓦级的核电站每年约消耗 30 吨浓缩铀，而同样功率的火电站，每年约消耗 250 万吨煤。

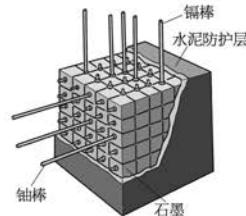


图 15-18 采用石墨作为减速剂的核反应堆示意图

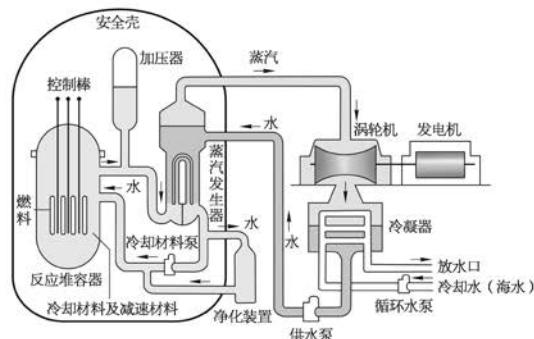


图 15-19 核电站示意图

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

### ► 原子核的聚变

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

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

为了使原子核发生聚变，原子核必须具有足够大的动能以克服核之间相互作用的库仑斥力，使原子核之间的距离达到核力能发生作用的范围。要使大量的轻核具有足够大的动能，意味着需要将它们加热到很高的温度，因此这类聚变反应又称为热核反应。太阳的核心区域温度高达约  $1.5 \times 10^7$  K，其中的原子核有足够的动能使聚变发生。聚变释放的能量又使高温得以维持，并引发进一步的聚变。重核裂变所引发的核爆炸可以产生  $10^8$  K 的高温，因此可以用原子弹来触发热核反应，氢弹就是利用这一原理制成的。1967 年 6 月 17 日，我国第一颗氢弹成功爆炸（图 15-20）。

图 15-20 我国第一颗氢弹  
爆炸成功

[1] 中国两弹的研制成功,离不开一大批科学家几十年的努力奋斗,其中包括邓稼先、于敏、钱三强、王淦昌、彭桓武、程开甲、周光召、陈能宽、朱光亚、郭永怀等著名科学家。

[2] 此处设置“自主活动”的目的是帮助学生理解聚变过程所遵循的守恒关系。

参考答案:3个氢1聚变成1个氦3时,放出 $5.91\text{ MeV}$ 的能量,2个氦3聚变成氦4时放出 $12.86\text{ MeV}$ 的能量并放出2个氢1。因此,一次p-p循环共放出能量 $2 \times 5.91\text{ MeV} + 12.86\text{ MeV} = 24.68\text{ MeV}$ 。

[3] 目前通过核聚变获得能量还只能是以爆炸的形式,无法控制聚变能量持续稳定地输出,可控核聚变还有很长的路要走。我国新一代可控核聚变研究装置“中国环流器二号M”

在2020年12月投入运行,总体参数达到国际先进水平,其中等离子体温度达到 $1.5 \times 10^8\text{ }^\circ\text{C}$ ,相当于太阳核心温度的10倍。这一装置的建成并运行表明中国在真正掌握可控核聚变方面又前进了一大步。

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



图15-21 邓稼先  
(1924—1986)

## 2 自主活动

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

### ▶ 可控核聚变

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

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



(a) “东方超环”外形



(b) 托卡马克装置真空室

图15-22 托卡马克装置

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



图 15-23 王淦昌  
(1907—1998)



图 15-24 直径 1 mm  
的氘氚靶丸

与核裂变反应相比，核聚变反应还具有对环境污染小的优点。从核聚变反应中还可以得到大量有用的中子。因此，可控核聚变反应受到普遍的重视，世界上许多国家都在积极开展可控核聚变反应理论和技术的研究。

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

## [1] STSE

巨大的核能是一柄双刃剑，它在造福人类的同时，也可能使人类遭受毁灭。中国拥有核武器伊始便庄重承诺，在任何时候、任何情况下都不会首先使用核武器。中国还无条件承诺不对无核武器国家和地区使用或威胁使用核武器。中国是世界上唯一作出并恪守这一承诺的国家。同时，中国积极致力于核能的和平开发和利用。我国的核电建设始于20世纪80年代。至2018年底，我国在运核电机组达到45台；装机容量4590万千瓦，年发电量2865亿千瓦·时，占我国年发电总量的4%。2020年4月，我国科学家宣布全超导托卡马克大科学装置“东方超环”物理实验获重大突破——实现了1亿摄氏度条件下10 s高约束等离子体运行，创造了新的世界纪录。“东方超环”的多项实验参数已接近核聚变反应稳定运行的需要，为未来的核聚变实验装置提供了重要的实验依据与科学支持。

[1] 此处设置“STSE”

的目的是帮助学生了解核能的“两面性”，并介绍我国在可控核聚变领域所取得的成就。

## 问题与思考解读

第三节 核能及其应用 111

**1. 参考解答:** ① 裂变产生的快中子减速为慢中子; ② 得到铀 235 含量高的浓缩铀块; ③ 铀块体积超过临界体积。

**命题意图:** 知道链式反应发生的条件。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用观念(Ⅰ); 科学推理(Ⅱ)。

**2. 参考解答:** 一个铀 235 核裂变平均放出能量  $E_0 = 200 \text{ MeV} = 200 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = 3.2 \times 10^{-11} \text{ J}$ , 1 g 铀 235 的物质的量  $n = \frac{1}{235} \text{ mol}$ , 可放出能量

$$E = n N_A E_0 = \frac{1}{235} \times 6.02 \times 10^{23} \times 3.2 \times 10^{-11} \text{ J} \approx 8.2 \times 10^{10} \text{ J} \approx 20000 \text{ kW} \cdot \text{h}, \text{以一个家庭每月用电 } 100 \text{ kW} \cdot \text{h} \text{ 估算, 约够用 } 17 \text{ 年}$$

**命题意图:** 通过对比感受核能。

**主要素养与水平:** 能量观念(Ⅰ); 科学推理(Ⅱ)。

**3. 参考解答:** 将大量轻核加热到很高的温度, 以保证其具有足够大的动能来克服核之间的库仑斥力, 使原子核之间的距离达到核力能作用的范围从而发生聚变。聚变释放的能量又使高温得以维持, 并引发进一步的聚变。

**命题意图:** 知道核聚变发生的条件。

**主要素养与水平:** 能量观念(Ⅰ); 科学推理(Ⅰ)。

**4. 参考解答:** 不正确。核内质子之间相互排斥力远大于万有引力, 由此将得到原子核不稳定的推论。

**命题意图:** 分析引力与库仑力的数量级。

**主要素养与水平:** 运动与相互作用观念(Ⅰ); 科学推理(Ⅰ)。

### 问题与思考

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

## 本节编写思路

112 第十五章 原子核

### 第四节 粒子物理简介

[1] 20世纪20年代，电子、质子和中子被认为是组成物质的基本粒子。自1912年发现了宇宙射线后，物理学家利用各种粒子探测器从宇宙射线中发现了许多新的粒子。20世纪30年代以后，原子核物理、宇宙线研究和量子力学理论对人们刚刚形成的物质结构观念形成了强烈的冲击。物理学新的分支——粒子物理学由此诞生。

#### ▶ 中微子和正电子的发现

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

[2] 1930年，泡利提出，在 $\beta$ 衰变的过程中，除电子以外，还有一个轻的电中性粒子一起被发射出来。这个中性粒子的穿透力极强，很难被探测到。物理学界将这种还未被实验证实的中性粒子命名为中微子（符号为 $\nu_e$ ）。 $\beta$ 衰变过程中，核子之间的相互作用不同于核力，物理学家将这种作用称为弱相互作用（weak interaction）。

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

#### [4] 大家谈

根据能量守恒定律，请分析 $\beta$ 衰变所释放的电子和中微子的能量关系。

[5] 1928年，英国理论物理学家狄拉克（图15-26）从理论上预言了正电子的存在。通过理论分析，一对能量为0.51 MeV的 $\gamma$ 粒子可在真空中产生一对正负电子对。反过来，如正电子和电子相遇则会发生湮灭，化成一对 $\gamma$ 粒子。此前，我国物理学家赵忠尧

说， $\beta$ 衰变实际上是中子衰变为质子、电子及反中微子的过程。

[3] 中微子不带电，质量极小，与其他物质的相互作用极弱，因此很难被探测到。中微子可以轻易穿透地球。太阳除了发光、发热，同时也发射大量的中微子。每时每刻都有大量的中微子穿过我们的身体，但我们却没有任何感觉。

[4] 此处设置“大家谈”的目的是帮助学生理解 $\beta$ 衰变中的能量守恒关系。

参考答案：根据能量守恒， $\beta$ 衰变前后的能量也是守恒的。因为原子核能量是确定的，所以电子与反中微子的能量之和也是确定的，但电子的能量和反中微子的能量可以是任意的。

[5] 量子力学的基本方程即薛定谔方程是非相对论的。狄拉克考虑了相对论后得到了狄拉克方程，为量子场论的发展奠定了基础。按照量子场论，任何粒子都有反粒子，正电子则是第一个被预言并被发现的反粒子。正反粒子的产生和湮灭是量子场论的基本过程。

## 正文解读

[1] 德谟克利特在2000多年前就提出了物质的基本组成单元——原子。而庄子则提出“一尺之棰，日取其半，万世不竭”的物质无限可分思想。对物质结构的探究是物理学家始终不渝的追求。随着越来越多的微观粒子被发现，粒子物理学开始成为独立的分支学科。

[2] 能量守恒是物理学的基本原理。不论是宏观的还是微观的，不论是经典物理还是量子物理，能量总是守恒的。但对于 $\beta$ 衰变的研究，却使包括玻尔在内的一些物理学家一度对能量守恒产生了怀疑。但泡利认为，能量守恒总是成立的， $\beta$ 衰变过程丢失的能量实际上是被一种质量很小的中性粒子带走了。也就是说， $\beta$ 衰变实际上是中子衰变为质子、电子及反中微子的过程。



图15-25 泡利  
(W. Pauli, 1900—1958)

[1] 正反粒子具有相同的质量、自旋、寿命等性质,但具有相反的电荷量、重子数、轻子数等。中性粒子也有反粒子,而光子的反粒子就是其自身。虽然实验上已经观察到了正电子、反质子、反中子等众多的反粒子,但从未在自然界中找到天然的反原子,如由正电子和反质子构成的反氢原子等,更没有发现由反原子构成的反物质。当然,利用加速器可以制造出反氢原子甚至反氦原子。

[2] 1932 年柯克罗夫特和沃尔顿建成世界上第一台加速器,第一次利用人工加速粒子实现核反应。1932 年劳伦斯建成第一台回旋加速器,并用它产生了人工放射性同位素。早期的加速器能量不高,只能将质子加速到 100 MeV 以内。20 世纪 50 年代以后,加速器达到了 GeV 的能级。

20 世纪 60 年代提出了对撞机的概念,高能加速器从此进入 TeV 的能级。目前最大的强子对撞机可以将单个质子加速到 7 TeV 的能量,对撞能量达到 14 TeV。随着加速器能量的不断提高,我们对微观物质世界的认识也逐步深入,粒子物理的研究也取得了巨大的成就。

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

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

## [2] ▶ 加速器与对撞机

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

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

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

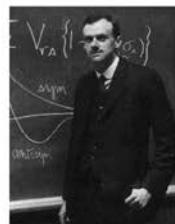


图 15-26 狄拉克 (P. Dirac, 1902—1984)



图 15-27 赵忠尧 (1902—1998)

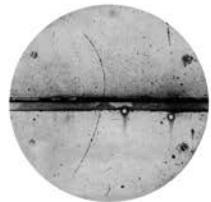


图 15-28 正电子在云室中的径迹  
(图中自下而上的弯曲径迹)

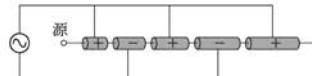


图 15-29 直线加速器原理示意图

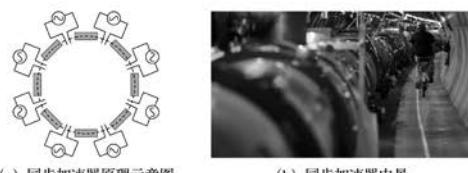


图 15-30 同步加速器

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

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

图 15-31 北京正负电子对撞机  
首次成功对撞

### [1] STSE

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

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

图 15-32 上海质子重离子  
医院的放疗设备图 15-33 上海同步辐射  
光源内的线站

[1] 此处设置“STSE”的目的是帮助学生了解加速器广泛的实际应用。

[2] 根据麦克斯韦电磁理论，带电粒子做加速运动时会辐射电磁波。同步加速器中的高速运动电子或正电子在磁场作用下偏转时会沿轨道切线方向辐射电磁波，即同步辐射。最初同步辐射是同步加速器的副产品，但由于同步辐射光源具有频谱宽、准直性好、高偏振、亮度大、窄脉冲、高稳定性等优点，可以广泛应用于物理、化学、生命科学、材料科学、医学等领域的科学研究。同步辐射光源是目前极为重要的研究工具。上海同步辐射光源是具有世界先进水平的第三代同步辐射光源。北京光源是目前最先进的第四代同步辐射光源。

[1] 物理学家一度认为电子、质子和中子是构成世界万物的基本粒子。为了描述核子之间的相互作用，汤川秀树引入了三种 $\pi$ 介子，随后在宇宙线中发现了 $\mu$ 子（刚发现时误以为 $\mu$ 子就是汤川提出的 $\pi$ 介子）和真正的 $\pi$ 介子。

[2] 进入 20 世纪 60 年代后，随着加速器能量的不断提高，发现了越来越多的微观粒子，这些粒子大部分是强子，即参与强相互作用的粒子。为了给这些粒子进行分类，坂田昌一提出了坂田模型，盖尔曼提出了基于对称性的八重法，均取得了一定的成功。在此基础上，盖尔曼提出了夸克模型。几乎同时，茨威格也提出了类似的模型，只是将类似夸克的粒子命名为 Ace，但是论文没有正式发表，所以茨威格的工作没有受到重视。

### ► 粒子的分类

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

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

### 3 自主活动

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

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

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

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

[3] 此处设置“自主活动”的目的是帮助学生了解反物质粒子的构成。

参考答案：反质子和反中子由反夸克构成，即 $\bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d}$ ， $\bar{n} = \bar{u}\bar{d}\bar{d}$ 。

[4] 夸克模型刚提出时，只有 $u$ 、 $d$ 、 $s$  三种夸克。夸克模型在解释现有粒子的性质以及预言新粒子等方面取得了很大的成功，但也存在一些问题。随着实验的进展，又陆续发现了 $c$ 、 $b$ 、 $t$  夸克。进一步的研究发现，为了正确描述强子的自旋-统计性质，必须给夸克引入颜色自由度，即每一种夸克都有红、蓝、绿三种颜色，而同一种夸克的不同颜色之间是严格对称的。这个发现导致了描述强相互作用的理论——量子色动力学的建立。

子，在目前的能量条件下，尚未发现轻子和夸克有内部结构。

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

表 15-1 自然界的四种相互作用

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

- [2] 1954 年，为了描述这些相互作用，物理学家杨振宁（1922—）和米尔斯提出了规范场理论，微观粒子通过交换规范玻色子发生相互作用。规范玻色子一共有 12 种，其中带电粒子通过交换光子发生电磁相互作用，夸克通过交换“胶子”（共 8 种）发生强相互作用，弱相互作用则通过交换“中间玻色子”（共 3 种，分别为  $W^+$ 、 $W^-$  及  $Z^0$ ）发生。

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

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

### 问题与思考

- 简述同步加速器与回旋加速器的区别。
- 试分析直线加速器中漂移管的最小长度与加在漂移管上的交变电压频率之间的关系。
- 电子、质子和光子是否都是基本的粒子？它们分别属于哪一类粒子？

加速器中带电粒子在由长度相同的漂移管排列组成的圆周内运动，通过同步增大磁场磁感应强度，保证其半径一定，带电粒子在运动一周过程中多次经过漂移管间隙而被多次加速。

**命题意图：**通过对比熟悉不同加速器的工作原理。

**主要素养与水平：**运动与相互作用观念（I）。

**2. 参考解答：**直线加速器中电子在漂移管中做匀速运动，在漂移管间隙处被加速。要确保每当电子到达两个相邻漂移管交界面处时加在漂移管上交变的电压总是使电子加速，也就需要确保电子在漂移管中的运动时间对应交变电压半周期的奇数倍，故漂移管最小的长度等于电子进入每一个漂移管时的速度与交变电压半周期的乘积。

**命题意图：**理解直线加速器的工作原理。

[1] 对微观粒子而言，引力作用比其他相互作用要弱得多，所以不需要考虑。电磁相互作用只发生在带电粒子之间。强相互作用和弱相互作用是短程力，只在核子尺度内起作用。

[2] 杨振宁和米尔斯在 1954 年提出的理论是为了解释核子之间的相互作用，当时并不成功。但杨振宁提出的基于对称性的规范场思想却产生了深远的影响，直接导致了后来弱电统一理论和量子色动力学的建立。

### 问题与思考解读

#### 1. 参考解答：

两种加速器都是通过交变的电场对带电粒子多次加速从而产生高能粒子的。回旋加速器中带电粒子在稳恒匀强磁场中每旋转半周被加速一次，随着速度增大旋转半径也逐渐增大；同步

**主要素养与水平:** 运动与相互作用观念(Ⅰ); 科学推理(Ⅰ)。

**3. 参考解答:** 电子和光子是基本粒子, 电子属于轻子, 光子属于玻色子; 质子由夸克组成, 它不是构成物质的基本粒子

**命题意图:** 知道基本粒子及其常见分类。

**主要素养与水平:** 物质观念(Ⅰ)。

**学期 活动****[1] 研究“啤酒泡”的“半衰期”。**

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

活动要求：

- (1) 描述放射性元素的半衰期。
- (2) 制定研究方案。
- (3) 进行实验，处理数据。
- (4) 归纳总结，得出结论。
- (5) 撰写研究报告。
- (6) 交流研究方案和结论，互相评价。

**[1] 用粗细均匀的**

量筒或杯子盛放适量啤酒，使酒液上方留有足够的泡沫。此时可以认为“啤酒泡”的数量大致与泡沫的厚度成正比。利用量筒上的刻度或刻度尺以及计时工具测量泡沫的厚度随时间变化的有关数据，绘制泡沫厚度随时间递减的图线，从中找到泡沫厚度减半的时间所满足的规律。

## 小结

· 基本概念和基本规律

天然放射现象：物质自发放出射线的现象。

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

半衰期：放射性元素的原子核的数目由于衰变减少至原来一半所经过的时间。

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

核子：质子和中子的统称。

同位素：具有相同质子数、不同中子数的原子核。

核力：使核子彼此吸引并紧密地结合在一起的力。

结合能：原子核各个核子彼此分离状态下的能量总和与该原子核能量之差。

核裂变：重核受到中子轰击后分裂成中等质量的原子核，同时放出能量的核反应。

核聚变：某些轻核结合成质量较大的原子核，并放出能量的核反应。

自然界四种相互作用：强相互作用、弱相互作用、电磁相互作用和引力相互作用。

· 基本方法

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

通过对原子核的衰变、裂变、聚变的分析，体会守恒思想。

通过对自然界四种基本相互作用的学习，感悟物理学规律普适性和统一性的思想。

· 知识结构图



## 复习与巩固解读

复习与巩固 (119)

### 复习与巩固

- 简述当人们发现质子后为什么认定原子核中一定还有不带电的未知粒子。
- 衰变、核裂变、核聚变和人工核转变是4种不同类型的原子核变化。请判断下列方程的原子核变化类型。
  - (1)  $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{140}_{54}\text{Xe} + ^{94}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$
  - (2)  $^{24}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{24}_{12}\text{Mg} + ^0_{-1}\text{e}$
  - (3)  $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n}$
  - (4)  $^{19}_{9}\text{F} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{22}_{10}\text{Ne} + ^1_1\text{H}$
- 有人认为 $\alpha$ 粒子散射实验中使 $\alpha$ 粒子发生偏转的力是核力。简要评价这一观点。
- 以表格形式列举阴极射线和 $\beta$ 射线的异同。
- $\text{eV}/c^2$ 是高能物理中的常用单位，这个单位对应什么物理量？简述理由，并将 $1\text{MeV}/c^2$ 换算成基本单位。
- 简述我国科学家如何利用放射性同位素证明人工牛胰岛素与天然牛胰岛素是同一种物质。
- 某放射性元素经过6天后只剩下八分之一没有衰变，它的半衰期是多少天？为估算某水库的库容，可取一瓶含该放射性元素的无毒水溶液，测得瓶内溶液1min衰变 $8 \times 10^7$ 次。现将这瓶溶液倒入水库，8天后在水库中取水样 $1.0\text{m}^3$ （可认为溶液已均匀分布），测得水样1min衰变20次，估算水库的容积。
- 自然界里有一些放射性重元素会发生一系列连续的衰变，形成放射性元素系。根据图15-34，判断锕系元素由U衰变为Pb的过程有几次 $\alpha$ 衰变、几次 $\beta$ 衰变？
- 简略比较核能与常规能源。
- 正负电子湮灭会产生一对 $\gamma$ 光子，历史上物理学家将0.51 MeV的 $\gamma$ 辐射作为发现正电子的证据。简述理由。（电子质量为 $9.11 \times 10^{-31}\text{kg}$ 、电子电荷量大小为 $1.60 \times 10^{-19}\text{C}$ ）

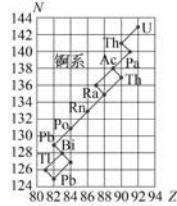


图15-34

**命题意图：**理解核力的性质。

**主要素养与水平：**模型建构(I); 运动与相互作用观念(I)。

**4. 参考解答：**见下表

射线种类	相同点	不同点
阴极射线	组成微粒都是电子	产生机制：阴极射线管中从阴极发射 能量状态：视加速电压而定
$\beta$ 射线		产生机制：核反应 能量状态：高能高速

**1. 参考解答：**发现质子后，人们已知其质量数和电荷数都是1，而原子核的质量都是质子质量的整数倍，但多数原子核的电荷数小于质量数。由此，人们认定原子核中一定还有不带电但质量和质子相近的未知粒子

**命题意图：**理解中存在的证据。

**主要素养与水平：**证据(I); 科学推理(I)。

**2. 参考解答：**(1) 裂变 (2) 衰变 (3) 聚变 (4) 人工核转变

**命题意图：**知道核反应的种类。

**主要素养与水平：**模型建构(I)。

**3. 参考解答：**不正确。核力是短程强相互作用力，作用范围仅限于原子核内，散射实验中 $\alpha$ 粒子并未进入此范围。同时可以设想，如果 $\alpha$ 粒子进入此范围受到核力作用，原子核将会发生变化

**命题意图:** 理解阴极射线与 $\beta$ 射线的本质和性质。

**主要素养与水平:** 物质观念(I)。

**5. 参考解答:** 对应质量。eV是能量单位,  $c$ 是光在真空中的传播速度, 根据质能方程  $E=mc^2$  可知对应质量。

$$1 \text{ MeV}/c^2 = 1.6 \times 10^{-19} \times 10^6 \div (3 \times 10^8)^2 \text{ kg} \approx 1.8 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

**命题意图:** 理解质能方程。

**主要素养与水平:** 科学推理(I)。

**6. 参考解答:** 在合成过程中将放射性碳 14 作为示踪原子掺入人工合成的牛胰岛素, 再将其与天然牛胰岛素混合、多次结晶, 得到了碳 14 均匀分布的牛胰岛素结晶, 从而在一定程度上为证明合成的人工牛胰岛素和天然牛胰岛素是同种物质提供了证据

**命题意图:** 知道放射性同位素的常见应用。

**主要素养与水平:** 科学推理(I)。

**7. 参考解答:** 放射性元素经过 6 天剩下  $\frac{1}{8}$ , 则其半衰期为 2 天。由此可知, 经过 8 天将剩余  $\frac{1}{16}$ , 1 min 内衰变总次数降为  $5 \times 10^6$  次, 为 20 次的  $2.5 \times 10^5$  倍, 故水库容积为水样体积 1 m<sup>3</sup> 的  $2.5 \times 10^5$  倍, 即  $2.5 \times 10^5$  m<sup>3</sup>

**命题意图:** 运用衰变规律解决问题。

**主要素养与水平:** 科学推理(II)。

**8. 参考解答:** 质量数从 235 减小到 207、电荷数从 92 减小到 82, 由衰变规律可知经过了 7 次 $\alpha$ 衰变、4 次 $\beta$ 衰变

**命题意图:** 运用衰变规律解决问题。

**主要素养与水平:** 科学推理(I)。

**9. 参考解答:** 与常规能源相比, 核能提供的能量巨大、污染小, 同时核燃料储量丰富、运输和储存方便。不过核能利用的技术要求高, 尤其需要注意安全性, 同时还要重视对核废料的科学、安全处置

**命题意图:** 对比常规能源知道核能的特点。

**主要素养与水平:** 能量观念(I)。

**10. 参考解答:** 正电子质量与电子质量相等, 一对正负电子对质量为  $1.822 \times 10^{-30}$  kg, 根据质能方程  $E=mc^2$ , 可知其湮灭产生的光子能量  $E=1.64 \times 10^{-13}$  J, 又  $1 \text{ MeV}=1.6 \times 10^{-13}$  J, 可知一对 0.51 MeV 的光子能量正好对应一对正负电子对, 故可作为发现正电子的证据

**命题意图:** 运用质能方程。

**主要素养与水平:** 证据(I); 科学推理(I)。

## 第三部分 本章练习部分解读

### 第一节 天然放射现象 原子核的衰变

1. D

2. C

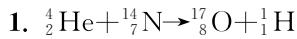
3. 3 5

4. (1) 根据质量数、电荷数守恒可知, $^{238}_{94}\text{Pu}$ 发生 $\alpha$ 衰变的核反应方程为 $^{238}_{94}\text{Pu} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^{234}_{92}\text{X}$

(2) 根据衰变规律  $N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$  可知, 75% 的原子核发生衰变, 剩余  $\frac{1}{4}$ , 即  $\frac{N}{N_0} = \frac{1}{4} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{87.7}}$ , 可

得  $t = 175.4$  年

## 第二节 原子核的组成



3. A

4. 利用放射性同位素射线的穿透能力进行透视检查, 利用放射性同位素射线的破坏性进行放疗医治肿瘤, 利用放射性同位素的射线显示该种元素的踪迹——示踪原子

## 第三节 核能及其应用

1. D



3.  $\times \quad \checkmark \quad \checkmark \quad \times$

4. 根据质能方程  $E = mc^2$ , 可知  $1\text{ }\mu\text{g}$  质量与能量  $E = 1 \times 10^{-9} \times (3 \times 10^8)^2 \text{ J} = 9 \times 10^7 \text{ J}$  相当, 可以把质量为  $2000\text{ kg}$  的汽车抬升  $h = \frac{E}{mg} = \frac{9 \times 10^7}{2000 \times 10} \text{ m} = 4.5 \times 10^3 \text{ m}$

## 第四节 粒子物理简介

1.  $\checkmark \quad \checkmark \quad \times$

2. 4 —2

3. 直线加速器、回旋加速器、同步加速器

4. 钱三强、何泽慧首次发现铀  $235$  三分裂、四分裂现象, 邓稼先等一大批科学家为我国核武器研制作出重要贡献, 王淦昌独立提出了利用惯性约束产生核聚变的构想, 赵忠尧发现了正负电子对湮灭所发出的  $0.51\text{ MeV}$  辐射, 杨振宁提出了规范场理论, 等等

## 附录 物理学科核心素养的水平划分

水平	物理观念
水平 1	能从物理学的视角观察自然现象,具有将物理学与实际相联系的意识
水平 2	形成初步的物理观念,能从物理学的视角解释一些自然现象,能应用物理知识解决一些实际问题
水平 3	具有物理观念,能从物理学的视角描述和解释自然现象,能应用物理知识解决实际问题
水平 4	具有清晰的物理观念,能从物理学的视角正确描述和解释自然现象,能综合应用物理知识解决实际问题,能指导工作和生活实践
水平 5	具有清晰、系统的物理观念,能从物理学的视角正确描述和解释自然现象,能灵活应用所学的物理知识解决实际问题,能有效指导工作和生活实践
	科学思维
水平 1	能说出一些简单的物理模型;能对常见的物理现象进行简单分析;能区别观点和证据;知道质疑和创新的重要性
水平 2	能在熟悉的问题情境中应用常见的物理模型;能对比较简单的物理现象进行分析和推理,获得结论;能使用简单和直接的证据表达自己的观点;具有质疑和创新的意识
水平 3	能在熟悉的问题情境中根据需要选用恰当的模型解决简单的物理问题;能对常见的物理现象进行分析和推理,获得结论并作出解释;能恰当使用证据表达自己的观点;能对已有观点提出质疑,从不同角度思考物理问题
水平 4	能将实际问题中的对象和过程转换成物理模型;能对综合性物理问题进行分析和推理,获得结论并作出解释;能恰当使用证据证明物理结论;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
水平 5	能将较复杂实际问题中的对象和过程转换成物理模型;能在新的情境中对综合性物理问题进行分析和推理,获得正确结论并作出解释;能考虑证据的可靠性,合理使用证据;能从多个视角审视检验结论,解决物理问题具有一定的新颖性
	科学探究
水平 1	具有问题意识;能在他人指导下使用简单的器材收集数据;能对数据进行初步整理;具有与他人交流成果、讨论问题的意识
水平 2	能观察物理现象,提出物理问题;能根据已有的科学探究方案,使用基本的器材获得数据;能对数据进行整理,得到初步的结论;能撰写简单的报告,陈述科学探究过程和结果
水平 3	能分析物理现象,提出可探究的物理问题,作出初步的假设;能在他人帮助下制订科学探究方案,使用基本的器材获得数据;能分析数据,发现特点,形成结论,尝试用已有的物理知识进行解释;能撰写实验报告,用学过的物理术语、图表等交流科学探究过程和结果
水平 4	能分析相关事实或结论,提出并准确表述可探究的物理问题,作出有依据的假设;能制订科学探究方案,选用合适的器材获得数据;能分析数据,发现其中规律,形成合理的结论,用已有的物理知识进行解释;能撰写完整的实验报告,对科学探究过程与结果进行交流和反思

(续表)

水 平	科学探究
水平 5	能面对真实情境,从不同角度提出并准确表述可探究的物理问题,作出科学假设;能制订有一定新意的科学探究方案,灵活选用合适的器材获得数据;能用多种方法分析数据,发现规律,形成合理的结论,用已有的物理知识进行科学解释;能撰写完整规范的科学探究报告,交流、反思科学探究过程与结果
	科学态度与责任
水平 1	认识到物理学是对自然现象的描述与解释;对自然界有好奇心,知道学习物理需要实事求是,有与他人合作的意愿;知道科学·技术·社会·环境存在相互联系
水平 2	认识到物理学是基于人类有意识的探究而形成的对自然现象的描述与解释,并需要接受实践的检验;有学习物理的兴趣,具有实事求是的态度,能与他人合作;认识到物理研究与应用会涉及道德与规范问题,了解科学·技术·社会·环境的关系
水平 3	认识到物理研究是建立在观察和实验基础上的一项创造性工作;有较强的学习和研究物理的兴趣,能做到实事求是,在合作中能尊重他人;认识到物理研究与应用应考虑道德与规范的要求,认识到人类在保护环境和促进可持续发展方面的责任
水平 4	认识到物理研究是一种对自然现象进行抽象的创造性的工作;有学习和研究物理的内在动机,坚持实事求是,在合作中既能坚持观点又能修正错误;能依据普遍接受的道德与规范认识和评价物理研究与应用,具有保护环境、节约资源、促进可持续发展的责任感
水平 5	认识到物理学是人类认识自然的方式之一,是不断发展的,具有相对持久性和普适性,但同时也存在局限性;有较强的学习和研究物理的内在动机,能自觉抵制违反实事求是的行为,在合作中既能主动参与又能发挥团队作用;在进行物理研究和应用物理成果时,能自觉遵守普遍接受的道德与规范,养成保护环境、节约资源、促进可持续发展的良好习惯

摘自《普通高中物理课程标准(2017年版2020年修订)》

## 说 明

本书根据教育部颁布的《普通高中物理课程标准(2017年版 2020年修订)》和高中物理教科书编写,经上海市中小学教材审查委员会审查准予使用。

编写过程中,上海市中小学(幼儿园)课程改革委员会专家工作委员会、上海市教育委员会教学研究室、上海市课程方案教育教学研究基地、上海市心理教育教学研究基地、上海市基础教育教材建设研究基地、上海市物理教育教学研究基地(上海高校“立德树人”人文社会科学重点研究基地)及基地所在单位复旦大学给予了大力支持。马世红、王祖源、陆昉、陈树德、蒋平、冀敏在本书编写的各个阶段审阅了书稿。在此一并表示感谢!

欢迎广大师生来电来函指出书中的差错和不足,提出宝贵意见。出版社电话:021-64848025。

**声明** 按照《中华人民共和国著作权法》第二十五条有关规定,我们已尽量寻找著作权人支付报酬。著作权人如有关于支付报酬事宜可及时与出版社联系。

经上海市中小学教材审查委员会审查  
准予使用 准用号 II - GJ - 2023005



绿色印刷产品

ISBN 978-7-5478-6254-4

A standard EAN-13 barcode representing the ISBN number 978-7-5478-6254-4.

9 787547 862544 >

定价：33.00 元