

全国中小学教材审定委员会2005年  
初审通过

普通高中课程标准实验教科书

# 物理

(选修3-5)

广东教育出版社



普通高中课程标准实验教科书

# 物理


(选修3-5)

W U L I

广东基础教育课程资源研究开发中心物理教材编写组 编著

主 编: 保宗悌  
副 主 编: 布正明 王笑君 姚跃涌  
本册主编: 王笑君  
本册编者: 王 恬 王笑君 布正明 左景民  
          吴 肖 李 铭 张军朋 陈小平  
          范传东 保宗悌 陶力沛  
(以姓氏笔画为序)

绘 图: 李德安

 广东教育出版社

· 广 州 ·

# 前言

同学们，大家好！欢迎进入高中物理学习旅途的最后一站。此前，同学们经历了宏观世界中各种各样的物质运动形式的描述及其相互作用规律的探寻。本书将引导同学们从生活中常见的现象——宏观物体间的碰撞出发，探究物体间碰撞的一般规律，并将这类问题的研究进一步引申到组成物体的原子和原子核中，揭开微观世界神秘的面纱，探索原子及原子核的结构，寻找微观粒子相互作用的规律，感受这些规律的应用对人类当今的生活及社会发展所带来的巨大影响。

在学习新知识的过程中，同学们将接触并亲身体会一种新的研究方法——模型法。这是与以往宏观物理学探究中常用的归纳法不同的研究方法，也是现代科学研究中最常用的一种研究方法。此外，同学们还将从书中欣赏到物理世界的对称与和谐美，学会欣赏物理学，建立起科学的情感；从一系列物理学家在发掘新的粒子和探索新的规律时那种实事求是的作风，学会从事科学研究的严谨态度；从核能的开发与利用的一系列讨论中，树立起正确的科学判断的价值观。

人类对微观世界客观规律的探索，直接导致了现代物理学两大支柱之一的量子力学理论的诞生。量子力学是当今各自然科学前沿领域的理论基础，也是当前各种高新技术在未来进一步发展的理论基础。本书所介绍的内容，可以成为同学们今后学习量子理论的一些前期准备。希望本书不会是同学们学习物理学的终点，而是成为同学们将来继续学习物理学知识的新起点。

祝同学们学途愉快！

# 目 录

<b>第一章 碰撞与动量守恒</b> .....	1
<b>第一节 物体的碰撞</b> .....	2
历史上对碰撞问题的研究 .....	2
生活中的各种碰撞现象 .....	2
弹性碰撞和非弹性碰撞 .....	3
<b>第二节 动量 动量守恒定律</b> .....	6
动量及其改变 .....	6
碰撞中的动量守恒定律 .....	7
<b>第三节 动量守恒定律在碰撞中的应用</b> .....	10
<b>第四节 反冲运动</b> .....	14
<b>第五节 自然界中的守恒定律</b> .....	18
守恒与不变 .....	18
守恒与对称 .....	19
<b>第二章 波粒二象性</b> .....	27
<b>第一节 光电效应</b> .....	28
光电效应与光电流 .....	28
光电流的变化 .....	29
极限频率 .....	30
遏止电压 .....	30
经典电磁理论解释的局限性 .....	32
<b>第二节 光子</b> .....	33
能量量子假说 .....	33
光子假说 .....	33
光电效应方程 .....	34
光电效应的解释 .....	34
<b>第三节 康普顿效应及其解释</b> .....	36
<b>第四节 光的波粒二象性</b> .....	38
光的波粒二象性的本质 .....	38
概率波 .....	39
<b>第五节 德布罗意波</b> .....	41
德布罗意波假说 .....	41

电子衍射 .....	41
电子云 .....	42
不确定性关系 .....	43
<b>第三章 原子结构之谜</b> .....	<b>47</b>
<b>第一节 敲开原子的大门</b> .....	<b>48</b>
探索阴极射线 .....	48
电子的发现 .....	50
<b>第二节 原子的结构</b> .....	<b>52</b>
$\alpha$ 粒子散射实验 .....	52
原子的核式结构的提出 .....	53
<b>第三节 氢原子光谱</b> .....	<b>56</b>
巴耳末系 .....	56
氢原子光谱的其他线系 .....	57
原子光谱 .....	58
<b>第四节 原子的能级结构</b> .....	<b>60</b>
能级结构猜想 .....	60
氢原子的能级 .....	60
<b>第四章 原子核</b> .....	<b>67</b>
<b>第一节 走进原子核</b> .....	<b>68</b>
放射性的发现 .....	68
原子核的组成 .....	69
<b>第二节 放射性元素的衰变</b> .....	<b>71</b>
原子核的衰变 .....	71
半衰期 .....	72
<b>第三节 放射性同位素</b> .....	<b>75</b>
核反应 .....	75
放射性同位素 .....	75
放射性同位素的应用 .....	76
放射线的危害及防护 .....	78
<b>第四节 核力与结合能</b> .....	<b>81</b>
核力及其性质 .....	81
重核与轻核 .....	81
结合能 .....	81
<b>第五节 裂变和聚变</b> .....	<b>84</b>
核裂变与链式反应 .....	84
受控热核反应 .....	85
<b>第六节 核能利用</b> .....	<b>88</b>
反应堆 .....	88
核电站 核能利用 .....	89
<b>第七节 小粒子与大宇宙</b> .....	<b>92</b>
从小粒子到大宇宙——空间跨度 .....	92
从粒子寿命到宇宙年龄——时间跨度 .....	93

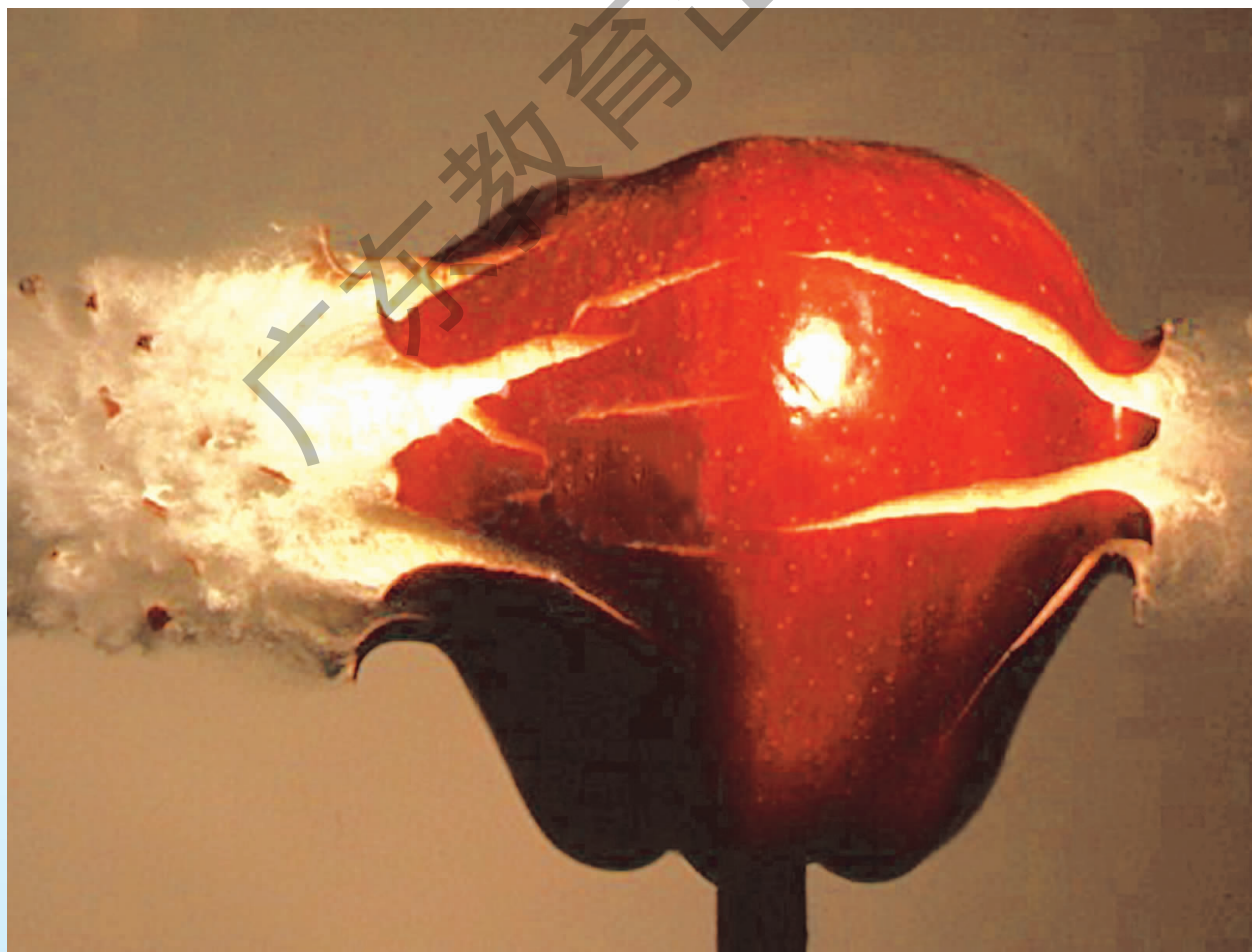
# 第一章

## 碰撞与动量守恒

碰撞是生活中常见的现象，也是自然界中物体最常见的相互作用的表现形式之一。大到宇宙中星系碰撞后产生的效果，小到生活中两个鸡蛋相碰后哪个更易破碎这类有趣的问题，无一不与碰撞有关。

碰撞现象曾经是 17 世纪物理学家集中注意的一个问题，对碰撞问题的研究直接导致了自然界中应用广泛的物理定律——动量守恒定律的确立。“碰撞”也是微观粒子典型的特征之一，在解释分子、原子、基本粒子之间的碰撞时，应用有关的动量知识，可以将许多复杂的问题简单化。

本章将从历史上的碰撞实验出发，通过探究和分析认识各种碰撞的形式及其所遵循的物理规律，并得出一个物理学上普遍适用的守恒定律，进而从守恒与对称的关系中感受物理学的和谐美。



## 第一节 物体的碰撞

碰撞是力学中的基本问题之一. 在 17 世纪中叶, 碰撞问题成为了科学界共同关心的课题.

### 历史上对碰撞问题的研究

最早发表有关碰撞问题研究成果的是布拉格大学校长、物理学教授马尔西 (M. Marci, 1595—1667), 他在 1639 年发表的著作《运动的比例》中得出了一些碰撞的结论. 随后, 著名的物理学家如伽利略、马略特 (E. Mariotte, 1620—1684)、牛顿、笛卡儿 (R. Descartes, 1596—1650)、惠更斯 (C. Huygens, 1629—1695) 等都先后进行了一系列的实验, 从最初对一些现象尚无法作出解释, 到逐渐归纳成系统的理论, 总结出碰撞的规律, 为后面学到的动量守恒定律奠定了基础.

图 1-1-1 是马尔西发表的著作中的一幅插图, 一颗大理石球对心撞击一排大小相等且同等质料的小球时, 运动将传递给最后一个小球, 其余的小球毫无影响.

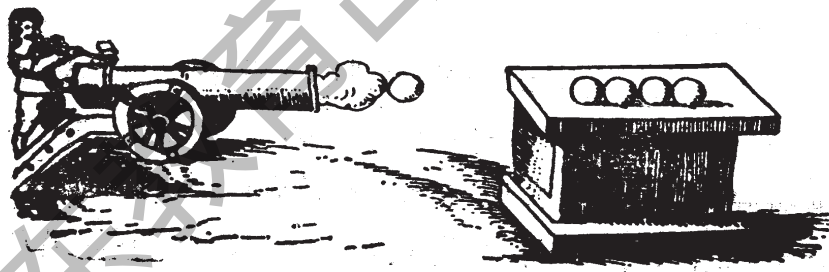


图 1-1-1 马尔西的碰撞实验

到了近代, 科学家在前人的基础上继续对自然界中的各种碰撞进行研究. 20 世纪 30 年代以后, 由于加速器技术和探测技术的发展, 通过高能粒子的碰撞, 实验物理学家相继发现了许多新粒子, 这些粒子中只有极少数的几个是理论上预言的, 绝大多数的粒子是突如其来发现的. 它们在性质上和相互关系上都表现出极大的差别, 从而大大丰富了人们对于微观粒子世界的认识, 形成了新的基本粒子物理研究领域.

### 生活中的各种碰撞现象

碰撞现象在生活中随处可见, 除了打桩、钉钉子以及各种打击现象以外, 还有球拍与球的撞击 (图 1-1-2), 运动员起跳、着地, 在蹦床上的各种蹦跳动作等等. 有些碰撞现象虽然很罕

见，可一旦发生，就有可能引起灾难，例如小鸟撞上了正在高速飞行的飞机会导致空难的发生。因此，工程技术中各种可能承受撞击作用的机器和建筑，它们各组成部分的强度都需要精确计算以便能够承受相应的碰撞负荷。



图 1-1-2 球拍与球的撞击

### 讨论与交流

用两只手各拿一个鸡蛋，把其中一个向另一个撞去，如果两个鸡蛋都是一样的坚硬，且碰撞的部位也都相同，猜一猜，哪一个蛋会被撞破？你的依据是什么？

研究物体的碰撞，对于解释大自然中的各种现象有着重要的作用，同时也有助于对物体相互作用的具体规律的认识和了解。19 世纪的著名自然科学家居维叶曾经说过：“我们如果离开了碰撞，就不可能得到有关原因和作用之间关系的明确印象。”

物体间碰撞的形式多种多样。例如图 1-1-3 (a) 中两个小球的碰撞，作用前后沿同一直线运动，称为正碰；图 1-1-3 (b) 中两个小球的碰撞，作用前后不沿同一直线运动，称为斜碰。有些物体碰撞后相互分开，如台球间的碰撞；有些物体碰撞后不再分开，如车站里一列火车在轨道上以一定速度碰撞一列不动的车厢，挂接后一同向前运动。

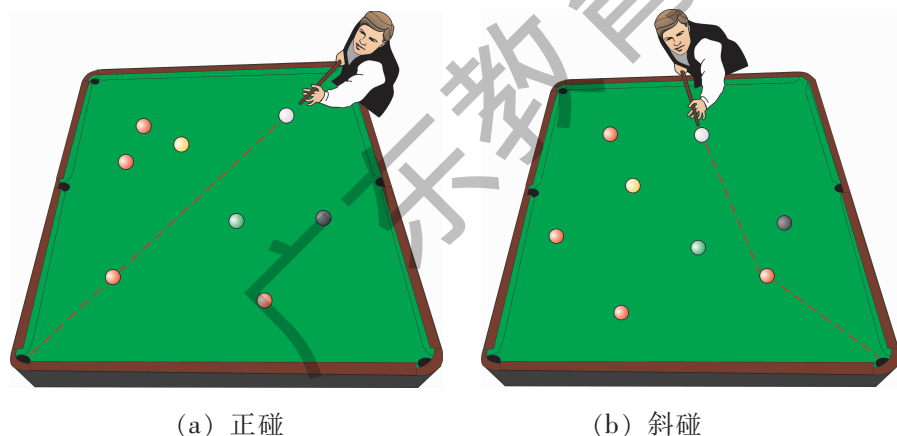


图 1-1-3 台球的碰撞

要研究碰撞问题，应从物理本质上区分各种不同的碰撞，为此，我们首先考虑碰撞前后物体能量的变化。

### 弹性碰撞和非弹性碰撞

碰撞就是两个或两个以上的物体在相遇的极短时间内产生非常大的相互作用的过程。碰撞的最主要特点是：相互作用时间短，作用力变化快和作用力峰值大等，因而其他外力可以忽略不计。



在同一高度释放一些不同材料制成的小球，你会看到，小球着地后反弹的高度有所不同，某些球比其他球弹得更高些，通常会说是小球的弹性不同。那么，不同弹性的物体间碰撞的物理本质的区别是什么呢？

### 实验与探究

如图 1-1-4 所示。

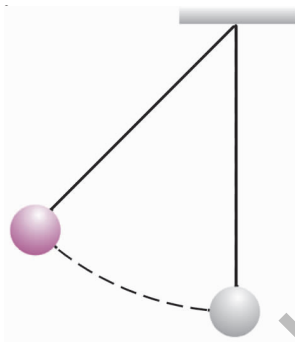


图 1-1-4 两个小球碰撞

(1) 两个等质量橡皮球挂于同一水平点，线长相等，将其中一球拉开一定角度，释放后使之与另一球正碰。

(2) 在两个小球上分别套上布套，用上述同样的方法使两球碰撞。

观察实验现象并思考以下问题：

(1) 在理想情况下，橡皮球之间碰撞前后的总动能是否相等？为什么？

(2) 套上布套以后，橡皮球之间的碰撞前后的总动能是否相等？如果你认为不等，那么是否违反了能量守恒定律？

(3) 能否总结出弹性碰撞与非弹性碰撞的本质区别是什么？

#### 专业术语

弹性碰撞

elastic collision

非弹性碰撞

inelastic collision

事实上，任何两个小球碰撞时都会发生形变，若两个小球碰撞后形变能完全恢复，则没有能量损失，碰撞前后两个小球构成的系统的动能相等，我们称它为**弹性碰撞**；若两个球碰撞后它们的形变不能完全恢复原状，这时将有一部分动能最终会转变为其他形式的能（如热能），碰撞前后系统的动能不再相等，我们称它为**非弹性碰撞**。自然界中，多数的碰撞实际上都属于非弹性碰撞。



#### 资料活页

##### 英国皇家学会的征赏

1662 年成立的英国皇家学会，曾为 17 世纪中叶的碰撞实验研究征赏论文。应征并获得奖赏的有三人：伦恩，瓦利斯，惠更斯。

伦恩 (C.Wren, 1632—1723), 在他的论文中叙述了弹性碰撞的规律. 他的结果是正确的, 只是没有给出证明.

瓦利斯 (J.Wallis, 1616—1703), 在他的应征论文中, 陈述了非弹性碰撞的一些基本规律, 而后又在《力学或论运动》一书中, 更进一步地论述了弹性和非弹性碰撞的原理, 瓦利斯是从惯性定律和“运动力”的总量守恒定律出发进行研究的, 并用公式表示出这些结论.

荷兰物理学家惠更斯 (C.Huygens, 1629—1695) 的工作在三人之中最为细致. 他的应征文章没有被英国皇家学会公布, 而不得不发表在法国科学院的出版物上. 后来, 他又写了一篇更为详尽的论文, 题目是“论碰撞作用下物体的运动”. 不过, 惠更斯的理论只限于弹性 (他称之为“绝对刚性”) 碰撞.

### http 我们的网站 (physics.scnu.edu.cn)

1. 历史上几位科学家对碰撞问题的研究.
2. 微观粒子碰撞模拟实验演示.
3. “强烈反弹的小球”引起了空间技术中的“弹弓效应”.
4. 固体弹性的好坏是由什么决定的?
5. 撞蛋问题的研究与交通事故.

### 练习

1. 判断下列碰撞是什么碰撞:
  - (1) 弹性小球在某一高度从静止开始下落, 与地面相碰后, 反弹回到出发点.
  - (2) 子弹射穿静止在光滑水平面上的木块.
2. 把两个穿孔小球用细线连接, 如图 1-1-5, 中间夹有一根已被压缩的弹簧. 剪开细线, 小球将分别向两侧弹开. 这种现象是否也属于物体的碰撞? 生活中有没有类似的实例?

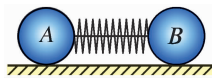


图 1-1-5

3. 两个质量都是  $3\text{ kg}$  的球, 各以  $6\text{ m/s}$  的速率相向运动, 发生正碰后每个球都以原来的速率向相反方向运动, 它们的碰撞是弹性碰撞吗? 为什么?
4. 两个球以相同的速度相向运动, 其中一个球的质量是另一个球的三倍, 相碰后重球停止不动, 轻球以二倍的速率弹回, 试证明它们发生的是弹性碰撞.
5. 选取几种不同的碰撞物, 如玻璃珠、钢珠、毛线团、橡胶泥球等, 相互间做几个简单的碰撞实验, 总结一下碰撞后物体运动状态的变化会与哪些因素有关.

## 第二节 动量 动量守恒定律

一把重锤可将静止的飞机的玻璃砸碎，而一只小鸟也可将高速飞行的飞机的玻璃撞碎，为什么轻重相差如此悬殊的两个物体，产生的作用效果却是相同的呢？物体碰撞时相互作用力的大小，究竟与什么因素有关呢？

### 动量及其改变

在生活中我们常会见到这样的现象：当一个鸡蛋从一定高度掉到地上时会摔破，但如果地上垫了一块海绵，鸡蛋则可能完好无损。在这里，两次碰撞中鸡蛋前后速度的变化是一样的，但碰撞中受到的作用力却显然不同，这是为什么？

#### 观察与思考

取一个 50 g 的砝码，分别让它从同一高度自由下落到垫有软纸的地面和坚硬的地面上，用力传感器测量砝码碰撞地面时作用力的大小，并由数据采集器记录下力随时间变化的一组数据，实验结果经电脑显示后如图 1-2-1 所示。

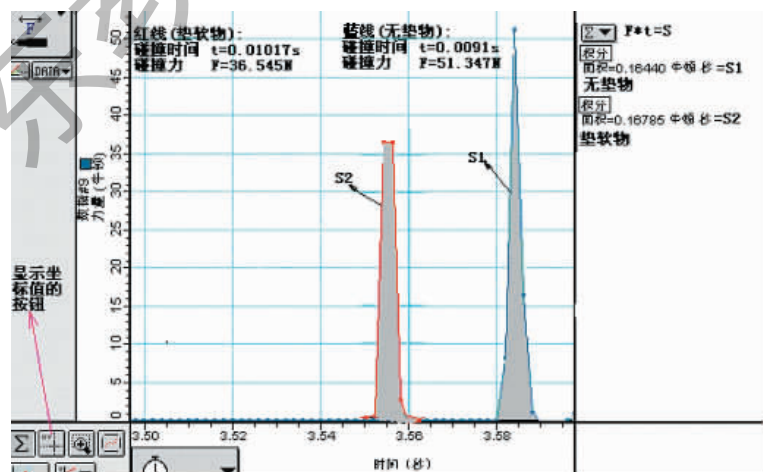


图 1-2-1 两次碰撞的  $F-t$  图线

由图可见：两次碰撞相互作用力  $F$  大小明显不同。

你认为这与碰撞作用时间  $t$  的长短会有关系吗？如果把碰撞过程中的力近似看成恒力，设碰撞前砝码的速度为  $v_0$ ，碰撞后速度为零，根据牛顿第二定律，两次碰撞中力  $F$  与作用时间  $t$  的乘积是否应相等？将你的结论与图中的实验结果比较一下，能否归纳出影响作用力大小的因素有哪些？

可以证明：一个质量为  $m$  的物体，在合力  $F$  的作用下，经过时间  $\Delta t$  后，速度由  $v$  变为  $v'$ ，则

$$F \cdot \Delta t = mv' - mv \quad (1.2.1)$$

物理学中，物体受到的力与力的作用时间的乘积叫做力的**冲量**。而运动物体的质量和它的速度的乘积叫做物体的**动量**。动量是一个矢量，用符号  $p$  表示。它的方向和速度的方向相同。在国际单位制中，动量的单位是千克米每秒，符号是  $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。记为：

$$p = mv \quad (1.2.2)$$

(1.2.1) 式表明：物体所受合力的冲量等于物体动量的改变量，这个关系叫做动量定理。很多时候，我们需要在较短的时间内产生一个较大的作用力，比如打棒球时，击球手的任务是改变球的动量，由于球与棒接触的时间极短，因此作用力非常大。

有些时候，我们又需要延长作用时间来减小作用力。例如跳伞运动员在跳伞时，即使打开降落伞，他在落地时的动量也不小，如果着地时他的腿伸直不动，会感到腿部受到了地面给予的巨大冲力。所以最好是弯曲膝盖，以延长落地冲击的时间，减小所受到的冲力。

### 碰撞中的动量守恒定律

当研究两个物体相互碰撞时，可以把具有相互作用的两个物体称为系统。系统外部的其他物体对系统的作用力叫做外力。

根据 (1.2.1) 式，当一个物体受到的合外力为零时，动量会保持不变，那么由两个物体组成的系统，当整个系统所受的合外力为零时，系统总动量是否也保持不变呢？

### 实验与探究

实验器材：气垫导轨，光电计时器，两辆质量相同的小车，弹簧，细线，砝码，双面胶。

实验步骤：

1. 调整导轨使之处于水平状态，并使光电计时器系统正常工作。
2. 导轨上一小车静止，用另一小车与其碰撞，观察两小车的速度变化。
3. 如图 1-2-2 所示，将两小车用压缩的弹簧连接在一起，烧断细线，观察两小车的运动速度。

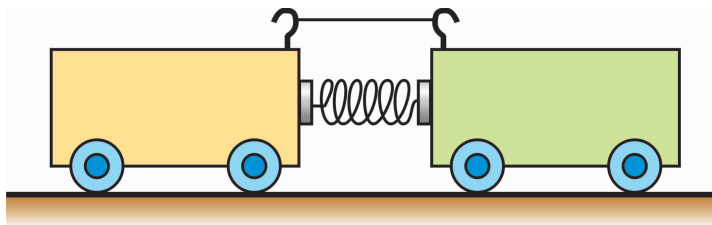


图 1-2-2 弹开实验

#### 专业术语

冲量

impulse

动量

momentum

动量定理

theorem of momentum

#### 专业术语

系统

system

## 专业术语

动量守恒定律

law of conservation  
of momentum

4. 在一小车上贴上双面胶，用另一小车碰撞它，使两小车随后粘在一起运动。观察小车碰撞前、后速度的变化。

5. 改变其中某一小车的质量，重复以上步骤。

请讨论如下问题：

两小车组成的系统所受的合外力是否为零？系统碰撞前、后的总动量有什么关系？由上述实验可得到什么结论？

精确的实验表明：物体在碰撞时，如果系统所受到的合外力为零，则系统的总动量保持不变。这就是**动量守恒定律**。设两个质量分别为  $m_1$  和  $m_2$  的物体组成的系统，碰撞前后速度分别由  $v_1$ 、 $v_2$  变为  $v_1'$ 、 $v_2'$ ，则碰撞的动量守恒定律可以表示为：

$$m_1v_1+m_2v_2 = m_1v_1'+m_2v_2' \quad (1.2.3)$$

动量守恒定律并不限于两个物体的相互作用，一个系统里可以包括任意数目的物体，只要整个系统受到的合外力等于零，系统的总动量就守恒。

### 实践与拓展

1. 如图 1-2-3 为碰碰摆，又称牛顿摆，是由一排多粒钢珠组成的玩具，可通过钢珠间的相互碰撞来演示动量守恒定律。你能解释这种现象吗？



图 1-2-3 牛顿摆



### 资料活页

#### 动量守恒定律的发现

动量守恒定律是最早发现的一条守恒定律，第一个提到这个定律的是法国科学家和哲学家笛卡儿。笛卡儿相信自然界中的运动是守恒的，它永远不会不留痕迹地消失，也不能从虚无中产生。因此他设想用物体的速度乘以它的“量”（即现代概念的质量）的乘积来度量机械运动。笛卡儿声称，世界上所有物体的总的动量是不变的。物理学史上有笛卡儿学派和莱布尼兹学派之间“关于力的自然量度”的著名争论，论战达半个多世纪之久，实质上，这场争论是很有意义的，它让我们认识到了物质运动的形式是多种多样的。

http 我们的网站 (physics.scnu.edu.cn)

1. 台球中的碰撞问题.
2. 靠抛球特技, 大力士能过桥吗?
3. 杂技揭秘——受得住铁锤捶击的人.
4. 安全带为什么能起安全作用?
5. 各国汽车研发中的碰撞实验测试结果.
6. 推铅球为什么要滑步?

### 练习

1. 一个质量是  $0.1 \text{ kg}$  的钢球, 以  $6 \text{ m/s}$  的速度水平向右运动, 碰到一个坚硬的障碍物后被弹回, 沿着同一直线以  $6 \text{ m/s}$  的速度水平向左运动. 碰撞前后钢球的动量有没有变化? 变化了多少?

2. 把质量为  $10 \text{ kg}$  的物体放在光滑的水平面上, 在与水平方向成  $53^\circ$  的  $10 \text{ N}$  的力  $F$  作用下从静止开始运动, 在  $2 \text{ s}$  内力  $F$  对物体的冲量为多少? 物体获得的动量是多少?

3. 一个重  $70.0 \text{ g}$  的棒球, 以  $5.0 \text{ m/s}$  的速度向人迎面飞来, 接球者正对棒球施加  $45.0 \text{ N}$  的力, 需要多久才能使棒球停止运动?

4. 在没有空气阻力的条件下, 在距地面高为  $h$ , 同时以相等初速  $v_0$  分别平抛, 竖直上抛, 竖直下抛一质量相等的物体  $m$ , 当它们从抛出到落地时, 比较它们的动量的增量  $\Delta p$ , 有 ( ).

- A. 平抛过程较大                      B. 竖直上抛过程最大  
C. 竖直下抛过程较大                D. 三者一样大

5. 下列关于物体的动量和动能的说法, 正确的是 ( ).

- A. 物体的动量发生变化, 其动能一定发生变化  
B. 物体的动能发生变化, 其动量一定发生变化  
C. 若两个物体的动量相同, 它们的动能也一定相同  
D. 动能大的物体, 其动量也一定大

6. 竖立放置的粉笔压在纸条的一端. 要想把纸条从粉笔下抽出, 又要保证粉笔不倒, 应该缓缓、小心地将纸条抽出, 还是要快速地将纸条抽出? 说明理由.

7. 在光滑的水平面上有一辆平板车, 如图 1-2-4, 一个人站在这辆平板车上, 用一个大锤敲打车的左端, 在锤的连续捶打下, 这辆平板车能持续地向右驶去吗? 说明你的理由.

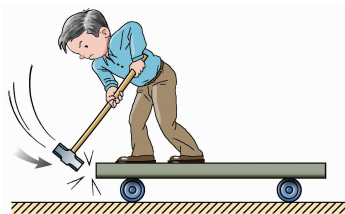


图 1-2-4

8. 把两个磁性很强的磁铁分别放在两辆小车上, 如图 1-2-5, 磁铁的同性磁极相对, 小车放在光滑的水平桌面上, 推动一下小车, 使它们相互接近, 两辆小车没有碰上就分开了, 两辆小车相互作用前后, 它们的总动量守恒吗? 为什么?

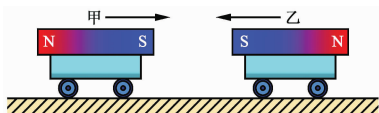


图 1-2-5

9. 把质量为  $1 \text{ kg}$  的铁球在沙坑上方从静止释放, 下落  $1 \text{ s}$  后, 落到沙子表面上, 又经过  $0.2 \text{ s}$ , 铁球在沙子内静止不动. 假定沙子对铁球的阻力大小恒定不变, 请用两种方法求铁球在沙坑里运动时沙子对铁球的阻力. ( $g=10 \text{ m/s}^2$ )

10. 在现实生活中, 你可以找到 3 个以上用动量与冲量的关系来解释的缓冲装置吗?

### 第三节 动量守恒定律在碰撞中的应用

动量守恒定律是物理学中最常用的定律之一，它在理论探索 and 实际应用中均发挥了巨大的作用。迄今为止，每当在实验中观察到似乎是违反动量守恒定律的现象时，物理学家们都会提出新的假设以坚持动量守恒定律的正确性，最终的结果，往往是因为有新的发现而胜利告终。

动量守恒在日常生活中是很常见的现象。两节火车车厢之间的挂钩靠碰撞连接，妙趣横生的台球之间的碰撞、激烈的碰碰车之间的碰撞等，都是动量守恒定律的体现。

**例 1** 在列车编组站里，一辆载重质量为  $m_1=3.0 \times 10^4 \text{ kg}$  的货车在平直轨道上以  $v_1=2 \text{ m/s}$  的速度运动，碰上另一辆载重后质量为  $m_2=4.5 \times 10^4 \text{ kg}$  的静止的货车，它们碰撞后接合在一起继续运动，求运动的速度。

**分析：**本题中我们的研究对象是什么？我们选哪个过程作为研究过程？研究对象在该过程中受到哪些力的作用？系统在此过程中动量是否守恒？系统的初、末状态的运动情况如何？系统的初、末动量各如何表示？

**解：**取碰撞前货车运动的方向为正方向，则有  $v_1=2 \text{ m/s}$ 。设两车接合后的速度为  $v'$ 。两车碰撞前的总动量为  $p=m_1v_1$ ，碰撞后的总动量为  $p'=(m_1+m_2)v'$ 。由动量守恒定律  $p=p'$  可得  $m_1v_1=(m_1+m_2)v'$

$$v' = \frac{m_1v_1}{m_1+m_2}$$

$$v' = 0.8 \text{ m/s}$$

$v'$  是正值，表示两车接合后以  $0.8 \text{ m/s}$  的速度沿着第一辆车原来运动的方向继续运动。

从本题中总结出应用动量守恒定律解题的一般步骤为：

1. 确定研究对象组成的系统，分析所研究的物理过程中，系统受外力的情况是否满足动量守恒定律的应用条件。
2. 设定正方向，分别写出系统初、末状态的总动量。
3. 根据动量守恒定律列方程。
4. 解方程，统一单位后代入数值进行运算，列出结果。

**例 2** 质量为  $m_1=0.2 \text{ kg}$  的小球以  $5 \text{ m/s}$  的速度在光滑平面上运动，跟原来静止的质量为  $m_2=50 \text{ g}$  的小球相碰撞，如果碰撞是弹性的，求碰撞后球  $m_1$  与球  $m_2$  的速度。

**分析：**如图 1-3-1 所示，球  $m_1$  和球  $m_2$  所组成的物体系统在

碰撞过程中所受到的合外力为零，因此遵守动量守恒定律，又因为是弹性碰撞，碰撞过程中无机械能损失，因此碰撞前后系统的总动能相等。设碰撞前  $m_1$  的速度为  $v_1$ ， $m_2$  的速度为零，碰撞后  $m_1$  的速度为  $v_1'$ ， $m_2$  的速度为  $v_2'$ ，并且规定速度  $v_1$  的方向为  $x$  轴的正方向，根据动量守恒定律得：

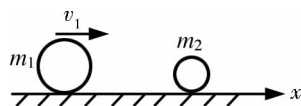


图 1-3-1

$$m_1 v_1 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \quad ①$$

根据机械能守恒定律：

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad ②$$

$$\text{由式①得：} \quad m_1(v_1 - v_1') = m_2 v_2' \quad ③$$

$$\text{由式②得：} \quad m_1(v_1 + v_1')(v_1 - v_1') = m_2 v_2'^2 \quad ④$$

$$\text{④式比③式：} \quad v_1 + v_1' = v_2' \quad ⑤$$

$$\text{将⑤式代入式③} \quad m_1(v_1 - v_1') = m_2(v_1 + v_1') \quad ⑥$$

$$\text{由式⑥得：} \quad v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \cdot v_1 = \frac{200 - 50}{250} \cdot 5 \text{ m/s} = 3 \text{ m/s}$$

将此结果代入式⑤得

$$v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1 = \frac{2 \cdot 200}{250} \cdot 5 \text{ m/s} = 8 \text{ m/s}$$

计算结果表明，碰撞后小球  $m_1$  的速度为 3 m/s（方向朝右），小球  $m_2$  的速度为 8 m/s（方向朝右）。

在碰撞类问题中，相互作用力往往是变力，过程相当复杂，很难用牛顿运动定律来求解，而应用动量守恒定律只需考虑过程的初、末状态，不必涉及过程的细节，且在实际应用中，往往需要知道的也仅仅是碰撞后物体运动的速度，所以动量守恒定律在解决各类碰撞问题中有着极其广泛的应用。

### 资料活页

#### 动量守恒定律的普遍应用

近代的科学实验和理论分析都表明：在自然界中，大到天体的相互作用，小到质子、中子等基本粒子间的相互作用都遵守动量守恒定律。弗兰克 (J. Frank, 1882—1964) 和赫兹 (G. Hertz, 1887—1975) 通过电子和原子的碰撞，证实了原子中能量的量子化，共同分享了 1925 年度诺贝尔物理学奖。此外，微观领域中通过碰撞实验得到的新发现还包括查德威克 (J. Chadwick, 1891—1974) 发现中子，获得了 1935 年度诺贝尔物理学奖；马丁·佩尔 (M.L. Perl, 1927— ) 则因为发现轻子，弗雷德里克·莱因斯 (F. Reines, 1918—1998) 因为检测到中微子，共同分享了 1995 年度诺贝尔物理学奖等等。

在天文学中发现过这样一种现象：在太空的某个地方有时会突然发出非常明亮的光，这就是超新星。可是它很快就暗淡下来，经过几十个昼夜后亮度就会减弱一半。光要从这样一颗超新星出发到达地球需要几百万年，而相比之下超新星从发光到熄灭的时间就显得太短了，在光到达我们这里以前，



超新星早已烧光了. 那么, 对于超新星和地球组成的系统, 动量守恒定律是否还适用呢?

答案是肯定的, 只不过我们必须把光也考虑在内. 当超新星发射光时, 星体得到动量, 同时光也带走了大小相等、方向相反的动量. 经过几百万光年到达地球时, 光把它的动量传递给了地球. 这里要注意的是: 动量不仅可以为实物所携带, 而且可以以辐射的方式传递, 当我们考虑到这点时, 动量守恒定律还是正确的.

可见, 动量守恒定律是比牛顿运动定律应用更为普遍的定律.

### 练习

1. 两个质量均为  $45\text{ kg}$  的女孩手挽手以  $5\text{ m/s}$  的速度溜冰. 一个质量为  $60\text{ kg}$  的男孩以  $10\text{ m/s}$  的速度从后面追上她们, 然后三个人一起挽手向前滑行的速度是多少?

2. 在光滑的水平桌面上有两个小球  $A$  和  $B$ , 见图 1-3-2, 他们的质量分别是  $m_A=2\text{ kg}$  和  $m_B=4\text{ kg}$ .

(1) 如果小球  $A$  和小球  $B$  沿同一直线向同一方向运动见图 (a), 速率分别为  $v_A=5\text{ m/s}$  和  $v_B=2\text{ m/s}$ , 它们碰撞前的总动量是多大? 方向如何?

(2) 如果小球  $A$  和小球  $B$  沿同一直线相向运动见图 (b), 速率仍分别是  $v_A=5\text{ m/s}$  和  $v_B=2\text{ m/s}$ , 它们碰撞前的总动量又是多少? 方向如何?

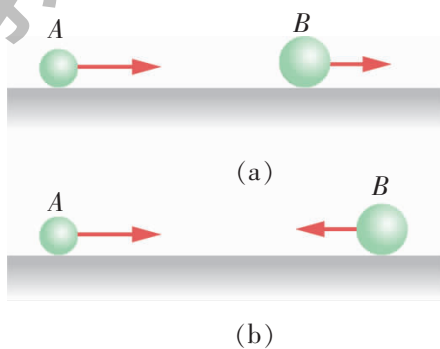


图 1-3-2

(3) 在以上两问中, 假如无法知道小球  $A$  和小球  $B$  碰撞后速度的大小和方向, 你能确定碰撞后总动量的大小和方向吗?

(4) 如果碰撞前两个小球沿同一直线相向运动的速率分别是  $v_A=6\text{ m/s}$  和  $v_B=3\text{ m/s}$ , 碰撞后两个小球的动量大小有什么关系? 动量方向有什么关系? 为什么?

3. 质量是  $10\text{ g}$  的子弹, 以  $300\text{ m/s}$  的水平速度射入质量是  $24\text{ g}$  的静止在水平桌面上的木块, 并留在木块中. 子弹留在木块中以后, 木块运动的速度是多少? 如果子弹把木块打穿, 子弹穿

过后的速度为  $100 \text{ m/s}$ ，这时木块的速度又是多少？

4. 两个质量相等的小球分别以  $4 \text{ m/s}$  和  $2 \text{ m/s}$  的速率相向运动，相撞后粘合在一起，假设以  $3 \text{ m/s}$  的速率一起运动，这是有可能吗？

5. 1930年，科学家用放射性物质中产生的  $\alpha$  粒子轰击铍原子时，产生了一种看不见的、贯穿能力很强的不带电粒子。为了弄清楚这是一种什么粒子，人们用它分别去轰击氢原子和氮原子，结果从中打出了氢核和氮核，以此推算出该粒子的质量，从而确定该粒子为中子。设氢核的质量为  $m_{\text{H}}$ ，打出后速度为  $v_{\text{H}}$ ，氮核的质量为氢核的14倍，打出后速度为  $v_{\text{N}}$ 。假设中子与它们的碰撞为弹性碰撞，请根据这些可测量的量，推算中子的质量。

广东教育出版社

## 第四节 反冲运动

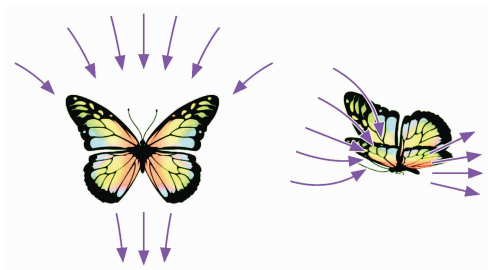


图 1-4-1

你是否听说过，弱不禁风的小蝴蝶，竟也能飞越崇山峻岭、甚至漂洋过海，航程达 3000~4000 km? 科学家使用高速摄影机摄下了蝴蝶飞行的情况，惊奇地发现蝴蝶飞迁时，巧妙地利用自己翅膀的张合，使前面一对翅膀形成一个空气收集器，后面一对翅膀形成一个漏斗状的喷气通道。每次扇动翅膀时，两翅间的空气由于翅膀连续不断地扇动而被从前往后挤压出去，形成一股向后喷出的气流而推动蝴蝶向前飞行。蝴蝶利用喷气来完成洲际旅行的这类运动，在物理上称为反冲运动。

反冲运动是一种常见的现象。射击时子弹向前飞出，枪身会向后退；节日放烟花时，火药气体向下喷出，烟花会向上飞。它们共同的特点是：当一个物体向某一方向射出（或抛出）其中的一部分时，这个物体的剩余部分将向相反方向运动。

**例 1** 反冲小车放在水平玻璃上，点燃酒精，水蒸气将橡皮塞冲出，小车沿相反方向运动。如果小车的总质量是  $M=3\text{ kg}$ ，水平喷出的橡皮塞的质量是  $m=0.1\text{ kg}$ ，橡皮塞喷出时速度  $v=2.9\text{ m/s}$ ，求小车的反冲速度。

**解：** 小车与橡皮塞为系统，所受外力之和为零，系统总动量为零。

根据动量守恒定律， $mv+(M-m)v'=0$

$$\begin{aligned} v' &= -\frac{m}{M-m}v \\ &= -\frac{0.1}{3-0.1} \times 2.9\text{ m/s} \\ &= -0.1\text{ m/s} \end{aligned}$$

负号表示小车运动方向与橡皮塞的运动方向相反，反冲速度大小是  $0.1\text{ m/s}$ 。

### 讨论与交流

若橡皮塞喷出时速度大小不变，方向与水平方向成  $60^\circ$  角，小车的反冲速度又是如何？

只要系统的总动量守恒，可以通过各种方式改变系统某部分的速度，使其他部分产生所需的速度或动量。乌贼和大多数头足类软体动物都是利用这种方法在水里活动的：经过身体侧面

的孔和前面的特别漏斗，它们把水吸入鳃腔，然后经过漏斗用力把水压出体外。这样，根据牛顿第三定律，它们就得到了相反方向的推力，能从后面推动身体很快向前游去，通过改变漏斗管的指向，可以使自己朝任何方向前进。

**例 2** 火箭是动量守恒定律最重要的应用之一。火箭飞行的最大速度是由什么因素决定的？设火箭发射前的总质量是  $M$ ，燃料燃尽后的质量为  $m$ ，火箭燃气的喷射速度为  $v$ ，求燃料燃尽后火箭的飞行速度为  $v'$ 。

**解：**在火箭发射过程中，由于内力（火箭燃气喷射后产生对火箭的推力）远大于外力（火箭的重力），内力的动量远大于外力的动量，因而可以忽略外力的影响而把整个火箭的总动量看成是守恒的。

取火箭的速度方向为正方向，发射前火箭的总动量为 0，发射后的总动量为

$$mv' - (M - m)v$$

则由动量守恒定律得  $mv' - (M - m)v = 0$

$$\text{所以 } v' = \frac{M - m}{m}v = \left(\frac{M}{m} - 1\right)v$$

由上式可以看出，喷气速度  $v$  越大， $\frac{M}{m}$  越大，火箭的飞行速度就越大。

我们得到的结论是：燃料燃尽时火箭获得的最终速度由喷气速度  $v$  和质量比  $\frac{M}{m}$ （火箭开始飞行时的质量与燃料燃尽时的质量之比）两个因素决定。



图 1-4-2 “神舟五号”上天

可见，多级火箭能及时把空壳抛掉，使火箭的总质量减少，因而能够达到很高的速度。

多级火箭可用来完成洲际导弹、人造卫星、宇宙飞船等的发射工作，但火箭的级数不是越多越好，级数越多，构造越复

杂，工作的可靠性越差。目前多级火箭一般都是三级火箭。

2003年10月15日，我国首位航天员杨利伟乘坐的“神舟五号”载人飞船，在酒泉卫星发射中心成功升空。从“神舟一号”到“神舟五号”，中国的科技实力一次次走向尖端。它向世人证明了：中国人民的创造力是无穷无尽的。

### 实践与拓展

在老师的指导下完成水火箭的制作。



### 资料活页

#### 航天先驱者——万户

14世纪，中国明代的一位工匠叫万户，他进行了人类历史上第一次借助火箭飞行的试验。

他设计了会飞的“飞龙”火箭。这种木质雕刻的火箭筒可以飞行1000 m。他让助手把自己捆在座椅上，在椅后安装了47支当时最大的火箭，然后双手各持一面大风筝。万户设想，这些火箭同时点燃后，火箭产生的推力和风筝提供的升力将使他飞上天空。当工匠们点燃构架四周绑着的火箭后，“飞龙”拔地而起，但最终箭毁人亡。

万户的勇敢尝试虽遭失败，却被6个世纪以后的国际航天史学家公认为人类试图利用火箭升空的首次壮举。现在看来，万户的确是进行了一次科学探索。他考虑了升空需要推力和升力，利用了当时所能提供的最先进的技术手段，并勇敢地亲自实践，直至献身。

为纪念这位先驱者，美国的火箭专家赫伯特·基姆撰文记载了他的事迹，在美国的航空和航天博物馆中也标记着“最早的飞行器是中国的风筝和火箭”。国际天文学会将月球背面“东方海”附近的一座环形山以“万户”命名。万户高踞“海”边的山脊之上，永久地凝视着深不可测的宇宙，总算弥补了当年飞天壮志未酬的遗憾。

### 我们的网站 ([physics.scnu.edu.cn](http://physics.scnu.edu.cn))

1. 奇妙的仿生学——反冲运动如何被生物所利用。
2. 水动力火箭制作资料。
3. 登天的梯子——现代火箭升空原理。



### 练习

1. 采取下列哪些措施有利于增加喷气式飞机的飞行速度？( )。
  - A. 使喷出的气体速度更大
  - B. 使喷出的气体温度更高
  - C. 使喷出的气体质量更大
  - D. 使喷出的气体密度更小
2. 一个静止的、不稳定的原子核的质量为  $m'$ ，当它放射出

一个质量为  $m$ ，速度为  $v$  的粒子后，剩余部分获得的反冲速度大小为 ( )。

- A.  $\frac{m'v}{m'+m}$                       B.  $\frac{mv}{m'+m}$   
C.  $\frac{mv}{m'-m}$                       D.  $\frac{mv}{m'}$

3. 一支步枪的质量为 3.95 kg，弹头的质量为 8.6 g (火药的质量不计)，击发后，弹头射出枪口时的速度为 735 m/s，试计算射击时枪身后退的速度？

4. 抛出的手雷在最高点时水平速度为 10 m/s，这时突然炸成两块，其中大块质量为 300 g，仍按原方向飞行，其速度测得为 50 m/s，另一小块质量为 200 g，求它的速度的大小和方向。

5. 子弹在水平飞行时，其动能为  $E_{k0}=800$  J，当它分裂成质量相等的两块时，其中一块的动能为  $E_{k1}=625$  J，求另一块的动能  $E_{k2}$ 。

6. 螺旋桨式飞机与喷气式飞机产生前进的动力的原理是否相同？它们能否都在没有空气的太空中飞行？

7. 请解释：宇航员怎样使自己在“空间行走”。

8. 利用反冲原理设计几个小实验，如水的反冲，空气的反冲，并查找资料了解反冲运动在现实生活中的应用。如：反击式水轮机，喷气式飞机等。

## 第五节 自然界中的守恒定律

自然现象丰富多彩，物体运动千变万化，物理学家却在繁杂的变化中寻找不变，探索各种守恒定律。

在现代科学中各种守恒定律显得越来越重要，一些最有用和最重要的物理定律都有相应的守恒形式。

### 守恒与不变

守恒定律其实并没有告诉我们物体状态变化过程的全部细节。整个过程的具体细节，往往需要用到其他科学定律来描述。守恒定律并不能断定某种变化是否一定会发生，它也无法描述变化过程的快慢，但它却可以用来判断某个变化是否可能发生，以及一旦发生变化，物体初、末状态之间应满足什么样的关系。

**能量守恒：**能量是物理学中最重要的物理量之一，而且具有各种各样的形式，各种形式的能量可以相互转化，但总能量不变。可以说，能量守恒是最重要的守恒形式。

### 讨论与交流

观察图 1-5-1 荷兰艺术家埃舍尔在 1961 年完成的《瀑布》，从能量守恒的观点，你觉得这幅神奇而充满哲理的空间图形有没有什么问题？物理美与艺术美相同的地方是什么？不同的地方又是什么？

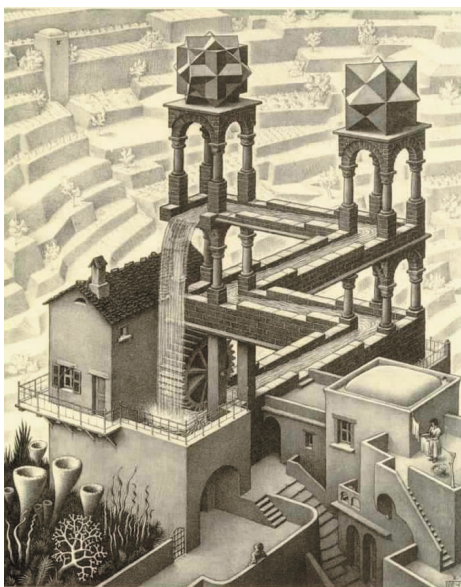


图 1-5-1 埃舍尔的《瀑布》

**动量守恒：**动量守恒定律通常是对相互作用的物体所构成的系统而言的。适用于任何形式的运动，因此常用来推断系统在发生碰撞前后运动状态的变化。事实上，动量守恒定律与碰撞过程的具体细节无关这一点是很重要的。例如，当两个亚原子微粒碰撞时，由于对碰撞过程的各种细节我们还缺乏完整而可靠的运算理论，因而事先并不能准确预知碰撞的结果，但却可以根据能量与动量守恒定律推断碰撞后是否有未观察到的粒子，从而在实验中加以注意，进行检验。

物理学中各种各样的守恒定律，本质上就是某种物理量保持不变。例如能量守恒是对应着某种时间变换中的不变性，动量守恒则是对应着某种空间变换中的不变性。因此，守恒定律其实是自然界和谐统一规律的体现。

### 守恒与对称

所谓对称，其本质也是具有某种不变性。例如，左右对称就是左右交换后保持不变。由于守恒定律的本质，是某种物理量保持不变，所以守恒与对称性之间有着必然的联系。

近代研究表明，守恒定律来源于对称。物理规律的每一种对称性（即不变性）通常都相应于一种守恒定律。对称和守恒这两个重要概念是紧密地联系在一起的。

人们相信自然界应该是和谐对称的，因此，在探索未知的物理规律的时候，允许以普遍的对称性作为指引。体现这种思想的最具典范的例子，就是爱因斯坦的相对论。

牛顿力学以运动定律和万有引力定律的简洁形式，把地球上的力学与其他天体上的力学统一起来。但牛顿理论的致命弱点，是需要一个绝对的参考系来判断物体是否运动。而爱因斯坦坚信自然界应是和谐的，参考系应是平权的，即物理规律应该是对称的。为此他提出“真空中的光速是一个普适常数，与参考系无关”，以及“一切物理定律在所有参考系中具有相同的形式”，由此奠定了相对论的理论基础。而相对论的理论在后来也被大量的实验所证实。

物理学在破译宇宙密码的同时，实实在在地展示了其“惊人的简单”、“神秘的对称”以及“美妙的和谐”。三大守恒定律（物质、能量、动量）乃是物质世界和谐性最完美的体现。

### 讨论与交流

在美学中，“对称”是形式美的一种表现（如图 1-5-2）。在物理学中，物理学家追求的美，则是所研究的宇宙结构的对称性和物体运动的对称性。你对物理学的感觉，是“美妙”的，还是“枯燥无味”的？能否举出一些物理学中“美妙”的例子？





图 1-5-2 各种对称的图形



## 资料活页

## 诺特定理

在自然界，对称是一种很常见的现象。在物理学中，利用对称性分析问题，往往能够把许多难题高度简化。然而，对称现象的背后却孕育着极为深刻的内涵，对它的发掘，直接导致了上世纪物理学中一个非常深刻而重大的发现，就是对称性和守恒定律的内在联系，这是由一位当时居住在德国的杰出女性，艾米·诺特 (A.E.Noether, 1882—1935) 所提出的。诺特是数学家，1918 年她在哥廷根学报上发表了一篇极为深刻、影响深远的论文，证明了自然界的每一个准确的对称性，都对应一条守恒定律，相应有一个守恒量。例如，如果物理学规律对于时间原点的选择是对称的，即在任何时刻开始计时，都观测到同样的物理规律，那么能量是守恒的。如果物理学规律对于空间坐标的选择是对称的，即在任何地点都可以选择为坐标的原点，那么动量是守恒的。这使得能量守恒同时间均匀性的联系以及动量守恒同空间均匀性的联系变得十分明显。

诺特定理引导物理学家们去寻找新领域中的守恒定律和守恒量，由此确定其中的对称性，从而获得作用量的形式和基本定律。反过来，如果知道了使一个给定的作用量保持不变的对称变换，从而也就可以知道相应的守恒定律和守恒量。这样使得物理学的基础研究因有法可循而变得富有成效。

 我们的网站 ([physics.scnu.edu.cn](http://physics.scnu.edu.cn))

1. 诺特的生平.
2. 吴健雄《 $\beta$ 衰变中宇称守恒的实验检验》.



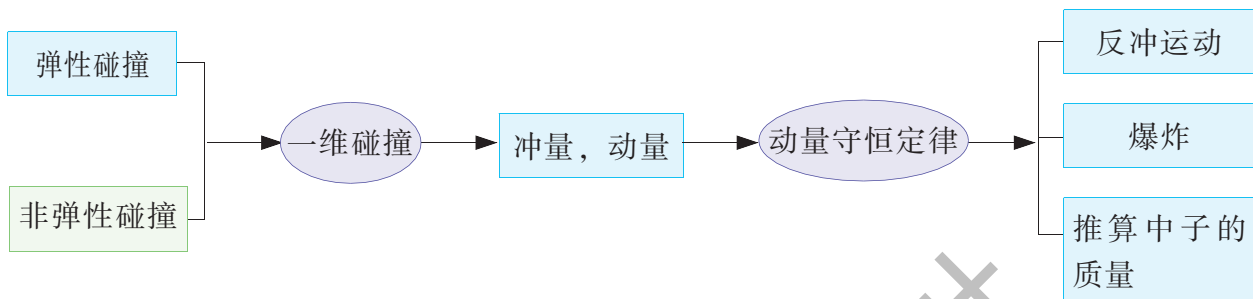
### 练习

查阅资料，了解物理学上除了守恒与对称产生和谐美以外，还有没有其他和谐美的表现形式？

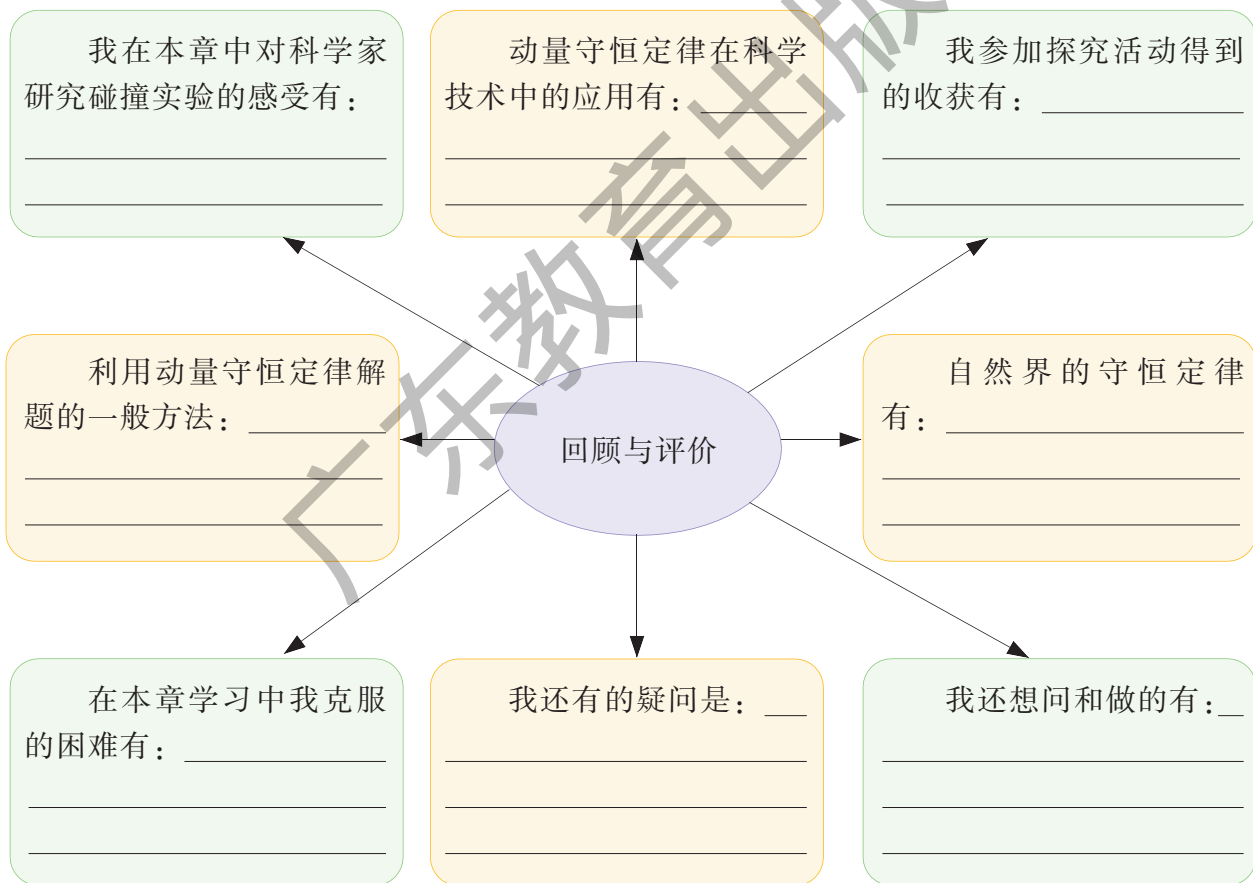
广东教育出版社

## 本章小结

### 一、知识结构



### 二、回顾与评价



## 习 题 一

1. 关于冲量和动量，以下说法正确的是 ( ).
  - A. 物体的运动状态改变，不一定受到冲量的作用
  - B. 物体运动时合外力的冲量方向与物体动量方向相同
  - C. 物体的动量发生了改变，则合外力一定对物体做了功
  - D. 运动物体动量方向与即时速度方向相同，而合外力的冲量与合外力的方向相同
2. 从同样高度落下的玻璃杯，掉在水泥地上容易打碎，而掉在草地上不容易打碎，其原因是 ( ).
  - A. 掉在水泥地上的玻璃杯动量大，而掉在草地上的玻璃杯动量小
  - B. 掉在水泥地上的玻璃杯动量改变大，掉在草地上的玻璃杯动量改变小
  - C. 掉在水泥地上的玻璃杯动量改变快，掉在草地上的玻璃杯动量改变慢
  - D. 掉在水泥地上的玻璃杯与地面接触时，相互作用时间短，而掉在草地上的玻璃杯与地面接触时间长
3. 向空中发射一物体，不计空气阻力，当物体的速度恰好沿水平方向时，物体炸裂为  $a$ 、 $b$  两块，若质量较大的  $a$  块的速度方向仍沿原来的方向则 ( ).
  - A.  $b$  的速度方向一定与原速度方向相反
  - B. 从炸裂到落地这段时间里， $a$  飞行的水平距离一定比  $b$  的大
  - C.  $a$ 、 $b$  一定同时到达地面
  - D. 炸裂的过程中， $a$ 、 $b$  受到的爆炸力的冲量大小一定相等
4. 如图 1-1 所示的装置中，木块  $B$  与水平桌面间的接触是光滑的，子弹  $A$  沿水平方向射入木块后留在木块内，将弹簧压缩到最短. 先将子弹、木块和弹簧合在一起作为研究对象 (系统)，则此系统从子弹开始射入木块到弹簧压缩到最短的整个过程中 ( ).
  - A. 动量守恒，机械能守恒
  - B. 动量不守恒，机械能不守恒
  - C. 动量守恒，机械能不守恒
  - D. 动量不守恒，机械能守恒

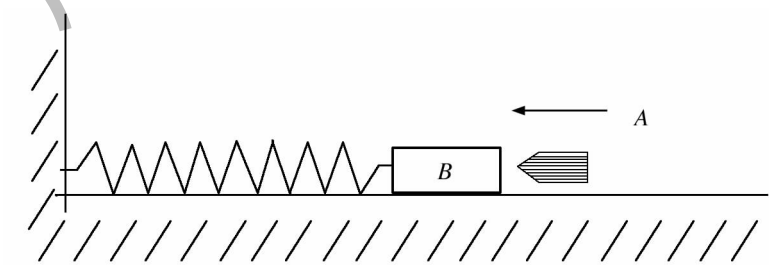


图 1-1

5. 在利用碰撞做“验证动量守恒定律”的实验中，实验装置如图 1-2 所示，仪器按要求安装好后开始实验. 先是不放被碰小球，重复实验若干次；然后把被碰小球静止放在斜槽末端的水平部位的前端边缘处，又重复实验若干次，在白纸上记录下重锤位置和

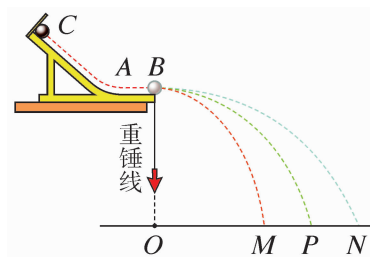


图 1-2

各次实验时小球落点的平均位置，依次为  $O$ 、 $M$ 、 $P$ 、 $N$ ，设入射小球和被碰小球的质量分别为  $m_1$ 、 $m_2$ ，且  $m_1=2m_2$ ，则：

(1) 入射小球每次滚下都应从斜槽上的同一位置无初速度释放，其目的是 ( )。

- A. 为了使入射小球每次都能水平飞出槽口
- B. 为了使入射小球每次都以相同的动量到达槽口
- C. 为了使入射小球在空中飞行的时间不变
- D. 为了使入射小球每次都能与被碰小球发生正碰

(2) 下列有关本实验的说法中正确的有 ( )。

- A. 未放被碰小球和放了被碰小球  $m_2$  时，入射小球  $m_1$  的落点分别是  $M$ 、 $P$
- B. 未放被碰小球和放了被碰小球  $m_2$  时，入射小球  $m_1$  的落点分别是  $P$ 、 $M$
- C. 未放被碰小球和放了被碰小球  $m_2$  时，入射小球  $m_1$  的落点分别是  $N$ 、 $M$
- D. 在误差允许的范围内若测得  $|ON|=2|MP|$ ，则表明碰撞过程中由  $m_1$ 、 $m_2$  两个小球组成的系统动量守恒

6. 一人平躺在木板上，腹部放一块大条石，另一人用大铁锤猛击大条石，石裂开而人无恙（请勿模仿），请简述其力学原理。

7. 试在下述简化情况下由牛顿运动定律导出动量守恒定律的表达式：系统是两质点，相互作用力是恒力，不受其他力，作用前后均沿同一直线运动，要求说明推导过程的步骤根据以及式中各符号和最后结果中各项的意义。

8. 如图 1-3 所示，在同一竖直面上，质量为  $2m$  的小球  $A$  静止在光滑斜面的底部，斜面高度为  $H=2L$ 。小球  $A$  受到弹簧的弹力作用后，沿斜面向上运动。离开斜面后，达到最高点时与静止悬挂在此处的小球  $B$  发生弹性碰撞，碰撞后小球  $B$  刚好能摆到与悬点  $O$  同一高度，小球  $A$  沿水平方向抛射落在水平面  $C$  上的  $P$  点， $O$  点的投影  $O'$  与  $P$  的距离为  $\frac{L}{2}$ 。已知小球  $B$  的质量为  $m$ ，悬绳长  $L$ ，视两球为质点，重力加速度为  $g$ ，不计空气阻力，求：

- (1) 小球  $B$  在两个小球碰撞后一瞬间的速度大小。
- (2) 小球  $A$  在两个小球碰撞后一瞬间的速度大小。
- (3) 弹簧的弹力对小球  $A$  所做的功。

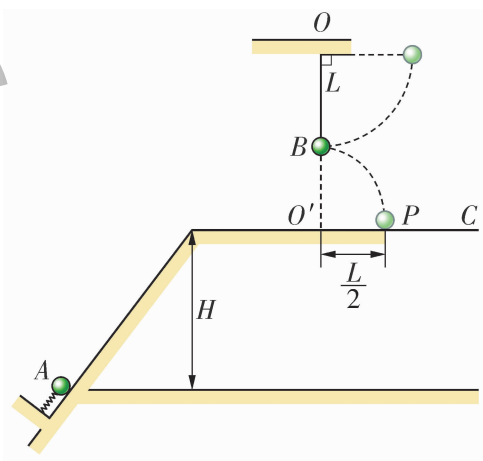


图 1-3

9. 如图 1-4 (a) 所示，在光滑绝缘水平面的  $AB$  区域内存在水平向右的电场，电场强度  $E$  随时间的变化如图 1-4 (b) 所示。不带电的绝缘小球  $P_2$  静止在  $O$  点。  $t=0$  时，带正电的小球  $P_1$  以速度  $v_0$  从  $A$  点进入  $AB$  区域。随后与  $P_2$  发生正碰后反弹，反弹速度是碰前

的  $\frac{2}{3}$  倍.  $P_1$  的质量为  $m_1$ , 带电量为  $q$ ,  $P_2$  的质量为  $m_2=5m_1$ ,  $A$ 、 $O$  间距为  $L_0$ ,  $O$ 、 $B$  间距为  $L=\frac{4L_0}{3}$ . 已知  $\frac{qE_0}{m_1}=\frac{2v_0^2}{3L_0}$ ,  $T=\frac{L_0}{v_0}$ .

- (1) 求碰撞后小球  $P_1$  向左运动的最大距离及所需时间.
- (2) 讨论两球能否在  $OB$  区间内再次发生碰撞.

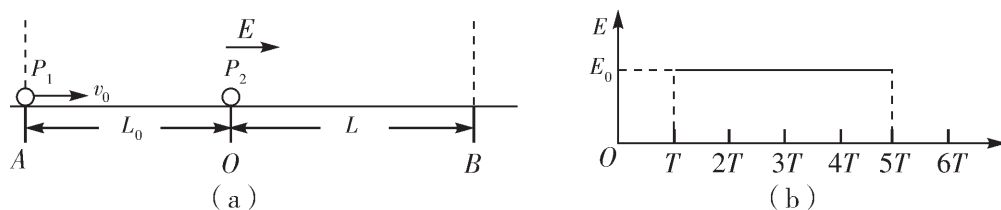


图 1-4

10. 如图 1-5 所示, 一条轨道固定在竖直平面内, 粗糙的  $ab$  段水平,  $bcde$  段光滑,  $cde$  段是以  $O$  为圆心、 $R$  为半径的一小段圆弧. 可视为质点的物块  $A$  和  $B$  紧靠在一起, 静止于  $b$  处,  $A$  的质量是  $B$  的 3 倍. 两物块在足够大的内力作用下突然分离, 分别向左、右始终沿轨道运动.  $B$  到  $d$  点时速度沿水平方向, 此时轨道对  $B$  的支持力大小等于  $B$  所受重力的  $\frac{3}{4}$ .  $A$  与  $ab$  段的动摩擦因数为  $\mu$ , 重力加速度为  $g$ , 求:

- (1) 物块  $B$  在  $d$  点的速度大小  $v$ .
- (2) 物块  $A$  滑行的距离  $s$ .

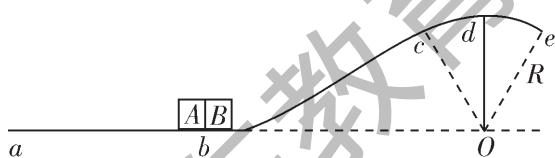
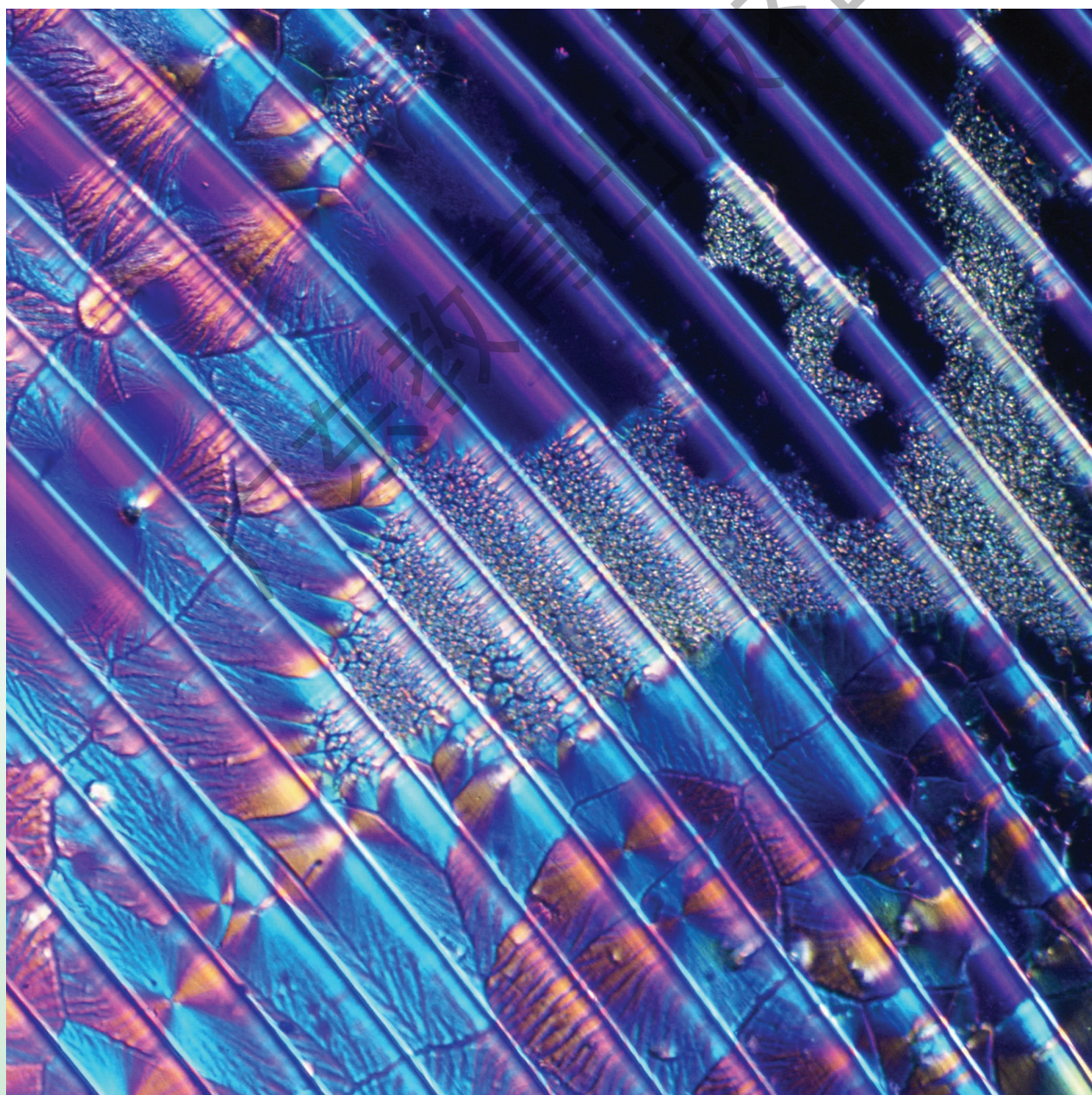


图 1-5

# 第二章

## 波粒二象性

20 世纪是科学技术特别是物理学飞速发展的世纪。相对论和量子力学相继建立，成为现代物理学的两大基石。1900 年，为了解释黑体辐射谱，普朗克提出了能量量子假说。1905 年，爱因斯坦提出了光子假说，可以解释光电效应。1924 年，德布罗意提出了实物粒子的波动性，几年后，他的思想得到电子衍射实验的证明。对微观粒子的波粒二象性本质的讨论，显示出了人类直接经验的局限性，同时也把人类对微观世界的认识提升到一个新的高度。现在让我们回到 20 世纪初，通过探究与分析，追踪先哲发现和认识微观粒子波粒二象性的足迹，探寻其中的奥秘。



## 第一节 光电效应

麦克斯韦 (J. C. Maxwell, 1831—1879) 于 19 世纪中叶建立的电磁理论完美地解释了光的波动现象之后, 光是一种电磁波的观念得到了广泛的承认. 与水波相似, 光通过障碍物可以呈现衍射和干涉现象. 真空中的光速也就是电磁波在真空中的传播速度, 大约为  $3 \times 10^8$  m/s. 至此, 光的本性问题似乎完全解决了. 然而, 在 19 世纪末, 人们发现光电效应的某些特征却不能用光的电磁理论来解释.

### 光电效应与光电流

#### 专业术语

光电效应

photoelectric effect

光电子

photo-electron

光电流

photo-current

19 世纪 80 年代, 人们发现金属等材料在光的照射下会带电. 例如, 把锌片放在紫外光下照射, 用验电器检验锌片, 可以发现锌片带正电. 后来, 人们明白, 这是由于锌片在光的照射下发射电子的缘故. 金属在光的照射下发射电子的现象称为**光电效应**, 发射出来的电子称为**光电子**.

光电管是利用光电效应制成的一种常见的光电器件, 它可以把光信号转变成电信号. 光电管主要由密封在玻璃壳内的阴极和阳极组成, 如图 2-1-1 (a) 所示. 阴极表面通常涂有碱金属, 如铯、铷等. 碱金属对电子的束缚能力比较弱, 所以比较容易在光的照射下发射电子. 阴极发出的光电子被阳极收集, 在回路中会形成电流, 称为**光电流**. 为了把光电子尽可能多地收集到阳极, 以增强光电流, 通常还在光电管两极加上正向电压  $U$ , 如图 2-1-1 (b) 所示. 光电流在电阻  $R$  的  $a$ 、 $b$  两端产生电压  $U_{ab}$ ,  $U_{ab}$  随着光的强弱的变化而变化. 这样, 光电管就把光信号变成了电信号.

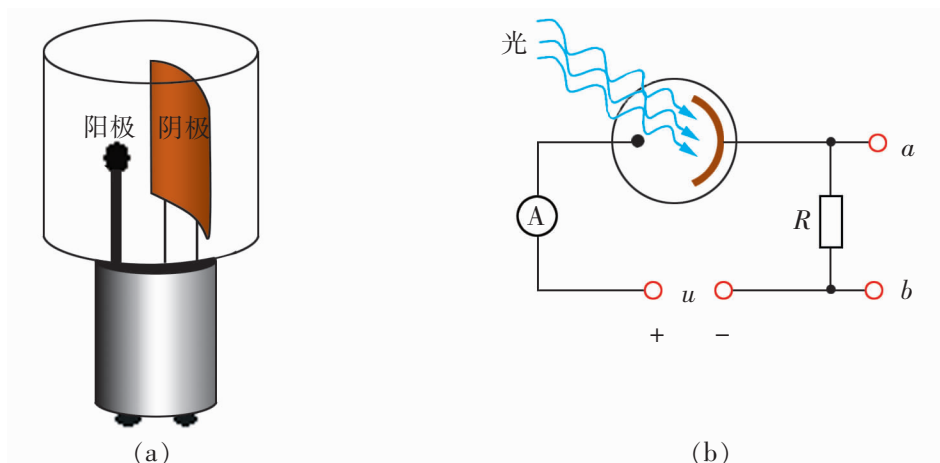


图 2-1-1 光电管的结构及其工作原理示意图



## 光电流的变化

光电流的产生是光照射的结果. 那么, 光电流的大小是否跟入射光的强度及其频率有关呢? 下面我们将通过实验对这个问题进行探究.

实验原理和装置如图 2-1-2 所示. 实验器材包括白炽灯、滤色片、光电管、电流表、电压表、电源、滑线变阻器等. 光源强度可以通过改变光罩上出射孔的数目或大小来改变, 光的频率可以用不同的滤色片来改变.

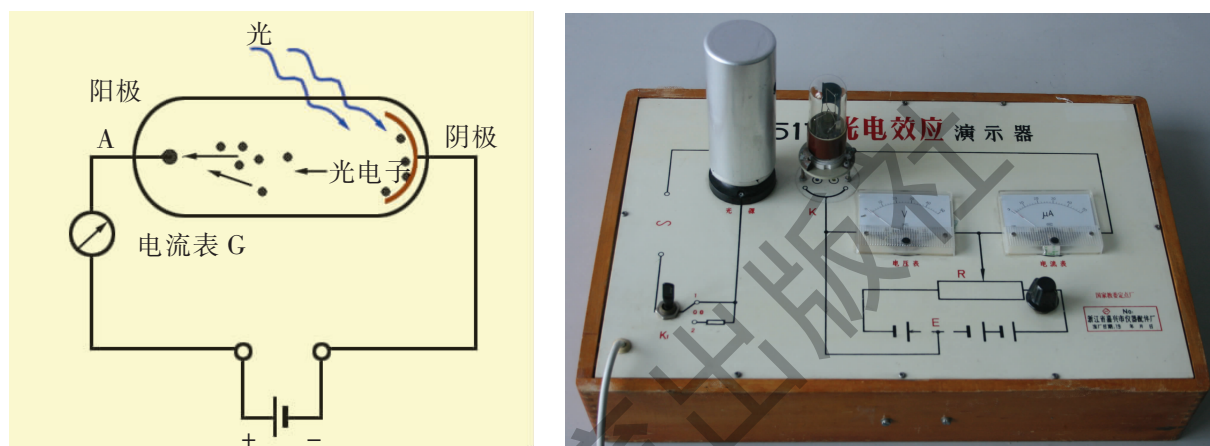


图 2-1-2 光电效应原理示意图及实验装置

### 实验与探究

首先, 在频率不变的情况下, 改变入射光的强度, 看看光电流的大小有无变化; 再将光的强度保持不变, 更换滤色片以改变入射光的频率, 观察光电流大小的变化. 将实验的结果记录在表 2-1-1 中.

表 2-1-1 光电流变化情况

入 射 光		光电流的变化
强度改变	强	
	中	
	弱	
频率改变	蓝光	
	绿光	
	红光	

### 讨论与交流

上述探究中，有没有让你感到特别奇怪的现象？能就此提出一些问题吗？

### 极限频率

实验中出现了一个奇怪的现象，当入射光的频率比较低时（例如红光），无论光多么强，照射时间多么长，光电管都不能发射光电子，即没有光电流产生。事实上，对于每一种金属，只有当入射光频率大于某一频率  $\nu_0$  时，才会产生光电流。我们将  $\nu_0$  称为极限频率，其对应的波长称为极限波长。表 2-1-2 给出了部分金属的极限频率和极限波长。

表 2-1-2 一些金属的极限频率和极限波长

材 料	铯 Cs	钠 Na	锌 Zn	银 Ag	铂 Pt
极限频率/ $10^{14}$ Hz	4.55	5.56	8.07	11.53	15.29
极限波长/nm	660	540	372	260	190

### 遏止电压

从光电管阴极射出的光电子具有一定的动能。为了测量光电子的动能，可以在光电管的两个电极上加上反向电压，如图 2-1-3 所示，调节反向电压的大小可阻止光电子到达阳极。

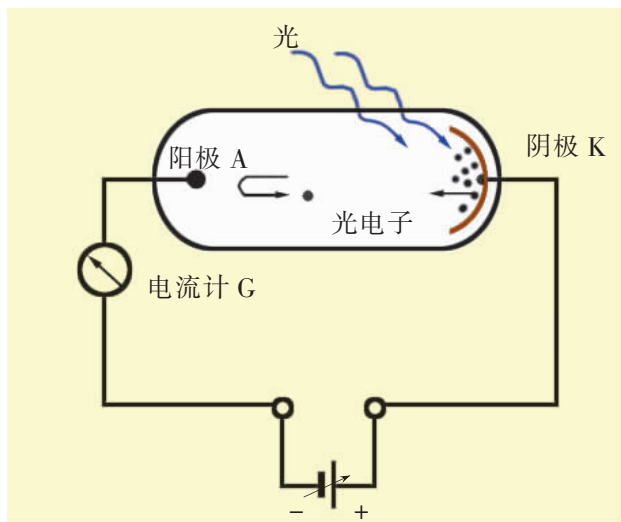


图 2-1-3 测量遏止电压实验示意图

不难猜想，在强度和频率一定的光照射下，回路中的光电流会随着反向电压的增加而减小，并且当反向电压达到某一数值时，光电流将会减小到零。我们把这时的电压称为**遏止电压**，用符号  $U_0$  表示。

根据我们掌握的电学知识，光电子到达阳极要克服反向电场力所做的功

$$W = eU_0$$

式中  $e$  为电子的电荷。

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

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = eU_0$$

式中  $m$  为电子的质量， $v_{\max}$  为光电子的最大初始速率。

可见，光电子的最大初始动能可以通过测量遏止电压来确定。下面我们再通过实验来探究遏止电压与光强及频率的关系。

### 实验与探究

首先，在蓝光的照射下，给光电效应的实验装置加上反向电压，逐渐增大电压，直至光电流为零，记录遏止电压的值。改变入射光强度，重复上述步骤。

其次，维持光源强度不变，改变入射光的频率。先采用蓝光作为入射光，记录遏止电压值；再换绿光作为入射光，记录遏止电压值。

表 2-1-3 遏止电压记录表

入射光		遏止电压
强度改变	强	
	中	
	弱	
频率改变	蓝光	
	绿光	

得到的结论是：遏止电压与入射光的强度\_\_\_\_\_（选填“有”或“无”）关，与入射光的频率\_\_\_\_\_（选填“有”或“无”）关。

### 讨论与交流

随着反向电压的逐渐增大，光电流是逐渐减小还是突然减小？由此是否可以推测出射光电子的动能不一样？遏止电压对应的是所有光电子的动能吗？

实验表明,对于一定频率的光,无论光的强弱如何,遏止电压都是一样的,当光的频率改变时,遏止电压也会改变.可见,遏止电压只与入射光的频率有关,而与入射光的强弱无关.而遏止电压对应光电子的最大初动能,也就是说其最大初动能也只与入射光的频率有关.

### 经典电磁理论解释的局限性

通过大量的实验,人们发现,对于那些频率高的光,随着光源强度的增加,光电流也会增大,这是非常容易理解的.因为按照光的电磁理论,在光的照射下,金属内部的电子受到电磁波的作用做受迫振动.光越强,电磁波的振幅越大,对电子的作用越强,电子振动得越厉害,因而,电子就越容易从物体内部逃逸出来.也就是说,单位时间到达阳极的光电子数目也就随之增多,光电流就会增大.

然而,根据上述理论,只要光足够强,任何频率的光都应该能够产生光电子,出射电子的动能也应该由入射光的能量即光强决定.但是实验结果却表明,每种金属都对应有一个不同的极限频率,而且遏止电压与光的频率有关,却与光的强度无关.由此可见,经典物理学里光的电磁理论在解释光电效应实验时遇到了根本性的困难.



#### 练习

1. 在光电效应实验中,如果实验仪器及线路完好,当光照射到光电管上时,灵敏电流计中没有电流通过,可能的原因是\_\_\_\_\_.
2. 查阅表 2-1-2 中五种金属的极限频率和极限波长,当用波长为 375 nm 的光照射它们时,可以发生光电效应的是\_\_\_\_\_.
3. 用某种色光照射到金属表面时,金属表面有光电子飞出,如果光的强度减弱而频率不变,则 ( ).
  - A. 光的强度减弱到某一最低数值时,就没有光电子飞出
  - B. 单位时间内飞出的光电子数目减少
  - C. 逸出的光电子的最大初动能减小
  - D. 单位时间内逸出的光电子数目和最大初动能都减小

## 第二节 光子

### 能量量子假说

按传统的光的电磁理论来解释光电效应是行不通的，必须另辟蹊径。1900年，德国物理学家普朗克（M. Planck, 1858—1947）在研究电磁波的辐射问题时，首次提出了一个与人类直接经验相违背的大胆假说，即能量量子假说：物体热辐射所发出的电磁波的能量是不连续的，只能是  $h\nu$  的整数倍， $h\nu$  称为一个能量量子，其中  $\nu$  是辐射频率， $h$  是一个常量，称为普朗克常量。实验测得

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

普朗克能量量子假说的意义在于，由这个假说出发，可以非常合理地解释某些电磁波的辐射和吸收的实验现象，而这些实验现象恰恰是传统电磁理论难以解释的。普朗克因此获得了1918年的诺贝尔物理学奖。

在宏观世界里，一个物理量的取值通常是连续的。比如，物体的质量、动能、动量的大小等都可以取从0到 $\infty$ 之间任意的有限值。在微观世界里，物理量的取值很多时候是不连续的，只能取一些分立的值。比如，氢原子中电子的能量只可能取  $-13.6 \text{ eV}$ 、 $-3.40 \text{ eV}$ 、 $-1.51 \text{ eV}$  等。这种物理量分立取值的现象称为量子化现象。

### 光子假说

1905年，在普朗克能量量子假说的启发下，26岁的爱因斯坦指出，光的能量不是连续的，而是一份一份的，每一份叫做一个光子。一个光子的能量为

$$\varepsilon = h\nu \quad (2.2.1)$$

式中  $h$  是普朗克常量， $\nu$  是光的频率。这就是爱因斯坦的光子假说。

普朗克首先提出了能量量子化假说，爱因斯坦则把普朗克的思想推广到辐射场的能量量子化，其光子概念是量子思想的一个质的飞跃。

利用光子假说，可以完美地解释光电效应的各种特征。



图 2-2-1 普朗克

#### 专业术语

普朗克常量

planck's constant

量子化

quantization

#### 专业术语

光子

photon

### 光电效应方程

既然光的电磁理论难以解释光电效应，我们不妨换一个思维角度。当光照射到金属上时，我们不再把光看成是能量连续的电磁波，而是把它看成是以一个个光子形式出现的粒子！这样，光电效应中发出的光电子，就可以认为是由入射光子与金属中电子碰撞后打出来的。

由于离子的束缚，金属内部的电子只有吸收一定的能量，才能从金属内部逸出成为光电子。也就是说，必须对内部电子做功，电子才能脱离离子的束缚而逸出表面，这个功称为金属的逸出功，用符号  $W_0$  表示。电子逸出后，可能还具有一定的动能。根据能量守恒定律，入射光子的能量等于出射光电子的最大初始动能与逸出功之和，即

#### 专业术语

逸出功

work function

$$h\nu = \frac{1}{2}mv_{\max}^2 + W_0 \quad (2.2.2)$$

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

### 光电效应的解释

由于光与金属相互作用时是以光子的形式出现的，金属内部的一个电子一般只能吸收一个光子的能量。如果光子的能量小于电子的逸出功，那么无论光的强度（由光子数目决定）有多大，照射的时间多长，金属内部的电子都不能被激发而逃逸出来。因此光电效应的条件是光子的能量  $\varepsilon = h\nu$  必须大于或至少等于逸出功  $W_0$ ，即

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

这就是光电效应存在极限频率的原因。

那么，遏止电压为什么与入射光的频率有关而与入射光的强度无关呢？由上节的讨论可知，出射光电子的动能是有大有小的。遏止电压实际上对应着光电子的最大初始动能。它们的关系为

$$eU_0 = \frac{1}{2}mv_{\max}^2$$

而爱因斯坦光电效应方程表明，对于某种金属，也就是逸出功  $W_0$  一定的情况下，出射光电子的最大初始动能只与入射光频

率有关，与光的强弱无关，从而也就解释了遏止电压只与频率有关的原因。

### 实践与拓展

1. 以小组活动的方式，设计一个验证爱因斯坦光电效应方程并能测出普朗克常量的实验。比较各组设计的异同。
2. 在网上查阅资料，写一篇关于普朗克和爱因斯坦生平的小论文。

### 资料活页

#### 黑体辐射谱与能量量子化

普朗克的能量量子假说是在研究黑体的热辐射谱的基础上提出来的。所谓“黑体”，是指能够全部吸收所有频率的电磁辐射的理想物体。绝对的黑体实际上是不存在的，但可以用某种装置近似地代替。例如，在一个封闭盒子的壁上开一个小孔，进入这个小孔的辐射在盒子内部不断反射，最后被盒子吸收，这个盒子就可以看作一个黑体，小孔中发射出来的辐射可以近似地看成黑体辐射。在达到热平衡时，黑体内部的温度不再变化，辐射出来的电磁波的强度会随波长发生变化，其变化曲线称为热辐射谱。普朗克在前人工作的基础上，拟合出一个符合黑体辐射实验数据的经验公式，但传统的光的电磁理论——能量只能连续地分布，却无法解释这个公式。普朗克利用能量量子化的思想和热力学理论，才完美地解释了黑体辐射谱。

“量子”一词的含义是指一些最小的基本量。一个物理量的取值是某个最小的基本量的整数倍。一个典型的量子是电子电荷  $e$ ，任何物体所带的电荷都是  $e$  的整数倍。环形超导体包围的磁通量是  $\frac{h}{2e}$  的整数倍， $\frac{h}{2e}$  则称为磁通量子。

### 我们的网站 ([physics.scnu.edu.cn/gzwl](http://physics.scnu.edu.cn/gzwl))

1. 普朗克的生平。
2. 爱因斯坦的生平。

### 练习

1. 电子从汞的表面逸出时需要做的功是  $7.27 \times 10^{-19} \text{ J}$ ，汞产生光电效应的极限频率是多少？能不能用可见光照射汞的表面来产生光电子？
2. 已知金属铯的逸出功是  $3.0 \times 10^{-19} \text{ J}$ ，用波长为  $590 \text{ nm}$  的黄光照射铯，电子从铯表面逸出的最大初动能是多大？
3. 根据表 2-1-2 中铂的极限频率，计算电子要克服阻力做多少功才能从铂的表面逸出？

### 第三节 康普顿效应及其解释

#### 专业术语

康普顿效应

Compton effect



图 2-3-1 康普顿

早在 1920 年以前，人们就已经发现，用 X 射线照射物体时，一部分散射出来的 X 射线的波长会变长，这个现象后来称为**康普顿效应**。按照光的电磁理论，光波波长在散射前后应该不变。可见，正如在光电效应中一样，光的电磁理论再次遇到了困难。

1923 年，美国物理学家康普顿 (A. H. Compton, 1892—1962) 借助爱因斯坦的光子假说，用光子与物体中自由电子的弹性碰撞解释了散射光的波长改变的现象。他还测量了 X 射线在石墨中散射后波长的改变，测量值与理论推测完全一致。

光电效应揭示出光的粒子性，每个光子携带的能量为  $\varepsilon=h\nu$ ，爱因斯坦进一步提出光子的动量应为

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (2.3.1)$$

式中  $\lambda$  为光波的波长。

康普顿认为，散射后的 X 射线波长改变，是 X 射线光子和物质中的自由电子发生碰撞的结果。相对 X 射线光子的能量 (约 1000eV) 而言，物质中电子的动能 (约 10eV) 是很小的，电子可以近似看做是静止的。如图 2-3-2 所示。碰撞前后光子与电子的总能量守恒，总动量也守恒。电子碰撞前为静止，碰撞后获得了一定的能量和动量，减小了光子原有的能量和动量，依据 (2.3.1) 式可知，散射光的波长也就变长了。

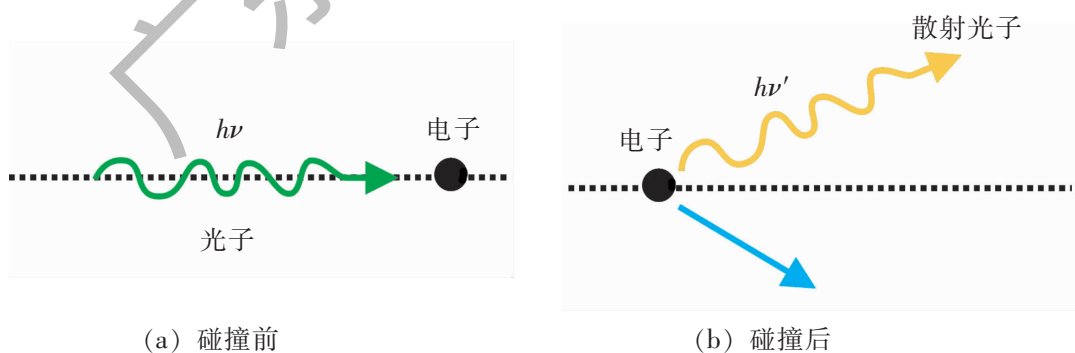


图 2-3-2 光子和电子的碰撞

康普顿从理论上严格地求解了上述的碰撞问题。他得到的结论和实验的结果完全吻合。

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




 讨论与交流

1. 康普顿效应中散射光的波长是否只能变长, 不能变短? 如果碰撞前的电子不是静止的, 而是有一定的动能的, 结果又会怎样?

2. 光电效应和康普顿效应都体现了光的粒子性, 而我们从前面所学习的光学内容已知道, 光也可以产生干涉和衍射, 这是光的波动性, 那么你认为光究竟应该是粒子还是波?

 资料活页

## 对光的本质的认识



在 17 世纪, 牛顿认为, 光是光源发射出的一种物质微粒. 当时的荷兰物理学家惠更斯则认为, 光是在空间传播的某种波. 光的微粒说和波动说都能解释当时所观察到的光的反射和折射等光学现象. 但由于牛顿在科学界的崇高威望, 光的微粒说一直被更多人推崇. 直到 19 世纪, 由于光的干涉和衍射现象的发现, 光的波动说开始被人们广泛接受. 特别是在麦克斯韦建立电磁理论以后, 人们更清楚地认识到, 光是一种电磁波. 牛顿的微粒说被抛弃了. 可是, 光电效应和康普顿效应又让光的微粒说以一种新的形式呈现出来. 由此我们看到, 人类对自然界的认识是螺旋式上升并且一步步接近真理的. 同时我们也认识到, 自然科学的真理, 很多时候会与人类的直接经验相违背.

 我们的网站 ([physics.scnu.edu.cn/gzwl](http://physics.scnu.edu.cn/gzwl))

康普顿的生平.

 练习

1. 什么是康普顿效应? 康普顿效应揭示了什么?
2. 试求波长为 1500 nm 的红外线和波长为 0.15 nm 的 X 射线的光子的能量和动量.

## 第四节 光的波粒二象性

光的干涉和衍射实验表明，光是一种电磁波，具有波动性。光电效应和康普顿效应则表明，光在与物体相互作用时，是以一个个光子的形式出现的，具有粒子性。那么，光到底是粒子还是波呢？下面，我们通过光的双缝干涉实验来研究这个问题。

### 光的波粒二象性的本质

如图 2-4-1 所示，由点光源  $S$  发出的光经双狭缝  $S_1$  和  $S_2$  后到达感光片  $D$ 。我们知道，经过缝  $S_1$  和经过缝  $S_2$  的两部分光会产生干涉，结果将在感光片上形成明暗相间的干涉条纹。这是光的波动性的表现。

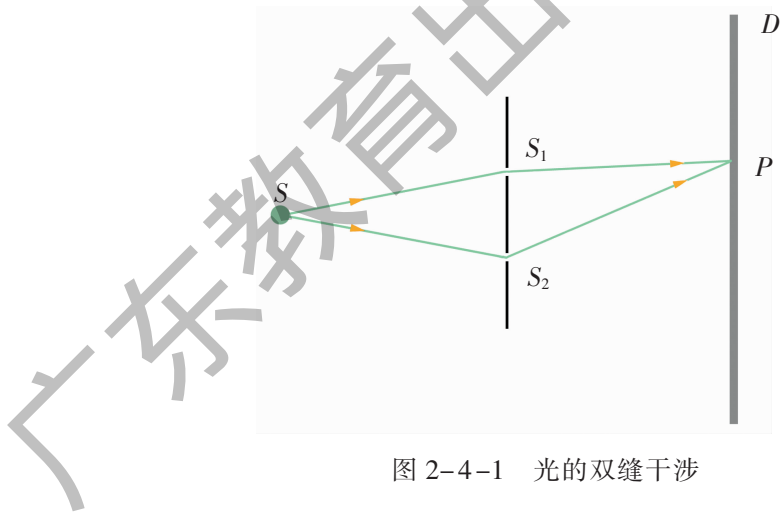


图 2-4-1 光的双缝干涉

但是，上述光的干涉并没有完全排除光是粒子的可能性。如果我们把从  $S$  点发出的光看成是由大量光子组成的，原则上我们还可以这样说：部分光子经过了缝  $S_1$ ，部分光子经过了缝  $S_2$ ，然后两部分光子相互干涉导致了干涉结果。为了排除这种可能性，我们换一种方法再做上述实验。

我们将光源  $S$  的强度降低，直到入射光减弱到没有两个光子同时存在的程度，前一个光子已经消失在感光片上，后一个光子才从光源出发。记录很短一段时间，即把感光片冲洗出来，这时感光片上呈现杂乱分布的几个亮点，如图 2-4-2 (a) 所示。每个亮点都是一个光子在感光片上留下的记录。这显示出了光的粒子性。然后，换另一感光片记录光子，适当增加记录时间，我们会惊奇地发现，亮点在感光片上形成模糊的亮纹，如图

2-4-2 (b) 所示. 光子主要落在感光片的亮纹处, 这就是干涉条纹. 记录时间越长, 干涉条纹越明显, 图 2-4-2 (c) 就是长时间记录形成的清晰的干涉图样. 干涉条纹再次显示出光的波动性.



(a) 短时间曝光

(b) 稍长时间曝光

(c) 长时间曝光

图 2-4-2 弱光干涉图样

由于每次穿过双缝的只有一个光子, 它不可能跟其他光子产生干涉. 但光的干涉还是发生了. 可见, 波动性是每一个光子的属性. 光既有粒子性, 又有波动性, 单独使用波或粒子的解释都无法完整地描述光的所有性质. 人们就把这种性质称为**波粒二象性**.

**专业术语**

波粒二象性

wave-particle duality

### 讨论与交流

做一个“大脑风暴”游戏: 如果把单个光子看成是粒子, 就无法解释图 2-4-2 (c) 的干涉结果; 如果把单个光子看成是波, 无法解释图 2-4-2 (a) 记录的结果. 光的波粒二象性让我们陷入了一个两难的境地. 请对此说说你的想法.

大脑风暴游戏规则: 在思维不受任何约束的气氛下, 每个人发挥想象力自由联想, 把想法说出来.

### 概率波

在上述实验中, 每个光子按照一定的概率落在感光片的某一点上. 概率大的地方落下的光子多, 形成亮纹; 概率小的地方落下的光子少, 形成暗纹. 所以, 干涉条纹是光子落在感光片上各点的概率分布的反映. 这种概率分布就好像波干涉时强度的分布. 从这个意义上讲, 有人把对光的描述说成是**概率波**.

可见, 光子到达感光片时就像粒子一样, 而光子到达感光片的几率分布则像波的强度的分布. 如果我们仍然试图用波或粒子的语言来描述光的本质, 就会不断地遇到问题. 事实上, 在涉及光的量子现象时, 再去追究光到底是波还是粒子已经没有意义了. 进入一个新的领域, 就会需要有一种新的描述语言. 在光的量子化现象的领域中, 描述光性质的最恰当的语言是**概率波**.



1. 请对光的波粒二象性发表一下你的见解，写一篇小论文.
2. 下列说法中正确的是 ( ).
  - A. 光的波粒二象性学说彻底推翻了麦克斯韦的光的电磁说
  - B. 在光的双缝干涉实验中，暗条纹的地方是光子永远不能到达的地方
  - C. 光的双缝干涉实验中，大量光子打在光屏上的落点是有规律的，暗纹处落下光子的概率小
  - D. 单个光子具有粒子性，大量光子具有波动性
  - E. 光的波动性是因为光子之间的相互作用的结果

广东教育出版社

## 第五节 德布罗意波

### 德布罗意波假说

既然被人类直觉经验普遍认为是一种波的光，原来也具有粒子性，那么反过来，人类直觉经验中的实物粒子，是否也会具有波动性呢？第一个表达出这种想法的，是法国物理学家德布罗意 (L. de Broglie, 1892—1987)。1924年，德布罗意在他的博士论文中提出了一个大胆的假设：任何一个实物粒子都和一个波相对应。这种波后来被称为**德布罗意波**，也称为物质波。参照光子的动量与光波波长的关系，德布罗意假设实物粒子的德布罗意波的波长与其动量之间的关系为

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (2.5.1)$$

式中  $\lambda$  是德布罗意波长， $p$  是相应的实物粒子的动量。

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

我们知道，当波遇到一个大小与该波长相仿的障碍物时，会发生衍射。比如，一束平行光通过一个线度与波长相近的小孔，在边缘会产生一圈一圈明暗相间的光环。如果实物粒子的德布罗意波真的存在，这个实物粒子有没有可能发生衍射呢？

以电子为例，电子的质量为  $9.1 \times 10^{-31}$  kg，假设电子运动的速度大小为  $4.0 \times 10^6$  m/s，根据 (2.5.1) 式可以算出电子对应的德布罗意波长为

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

也就是说，要让电子产生衍射，就需要让一束电子穿过非常小的孔，孔的线度大约为  $2\text{\AA}$  左右。晶体内部的原子（离子或分子）在空间呈周期性排列，在每一层晶面上就构成一定形状的网格，每一个网格都相当于一个这样的小孔。所以，电子束在晶体上反射可能会发生衍射。

### 电子衍射

美国工程师戴维孙 (C. J. Davisson, 1881—1958) 通过对一



图 2-5-1 德布罗意

#### 专业术语

德布罗意波  
de Broglie wave

次实验故障进行认真分析，并不断地进行实验，最后终于在1927年获得了电子束在晶体上的衍射图样。几乎同时，英国物理学家汤姆生（G. P. Thomson, 1892—1975）也独立地发现了电子在晶体上的衍射现象。图 2-5-2 是电子束在单晶  $\text{MnO}_3$  上的电子衍射图样，图 2-5-3 是电子束在多晶 Au 上的电子衍射图样。

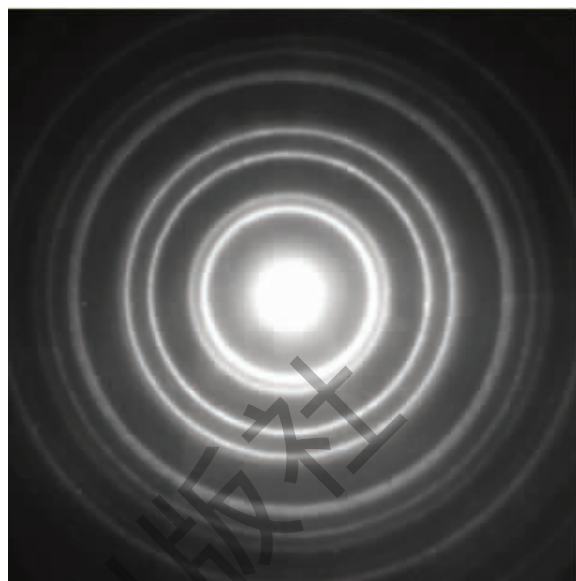
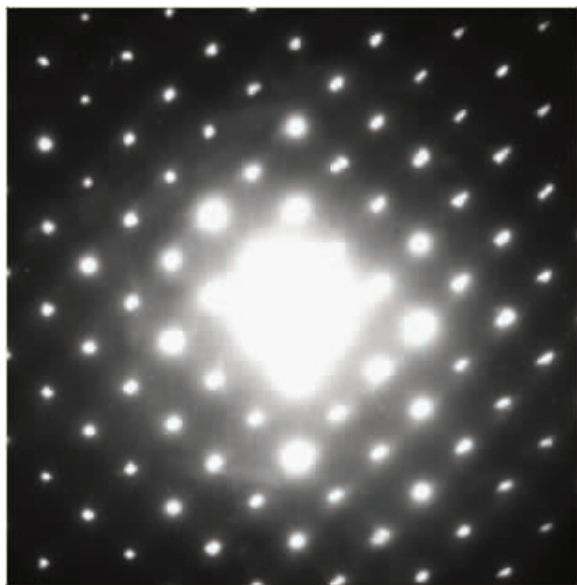


图 2-5-2 电子束在单晶  $\text{MnO}_3$  上的电子衍射图样

图 2-5-3 电子束在多晶 Au 上的电子衍射图样

电子衍射的发现证明了德布罗意波假说，德布罗意因此获得了1929年的诺贝尔物理学奖。而戴维孙和汤姆生则共同获得1937年的诺贝尔物理学奖。

电子不仅会发生衍射，还会发生干涉。实验表明，微弱电子束的干涉图样和弱光干涉图样（图 2-4-2）是非常相似的。由此可见，实物粒子的确具有波动性。

实验证明，不仅仅是电子，其他一切微观粒子也都具有波动性。同时，各种实物粒子当然也具有粒子性，这就是说实物粒子也具有与光一样的波粒二象性。总的来讲，波粒二象性是包括光子在内的一切微观粒子的共同特征，和光子一样，对微观粒子运动状态的最准确的描述是概率波。

### 讨论与交流

宏观物体是不是也能显示出波动性呢？考虑一颗质量为 10 g 的子弹，速率为 200 m/s，它对应的德布罗意波长是多少？你认为有没有可能让一束这样的子弹打在靶上而出现干涉或衍射的现象呢？

### 电子云

原子中的电子在原子核的周围运动，在空间各点出现的概率是不同的。当原子处于稳定状态时，电子会形成一个稳定的

概率分布. 由于历史上的原因, 人们常用一些小圆点来表示这种概率分布, 概率大的地方小圆点密一些, 概率小的地方小圆点疏一些, 这样的概率分布图称为**电子云**.

氢原子的原子核周围只有一个电子. 最低的能量状态称为**基态**, 基态氢原子的电子云如图 2-5-4 所示.

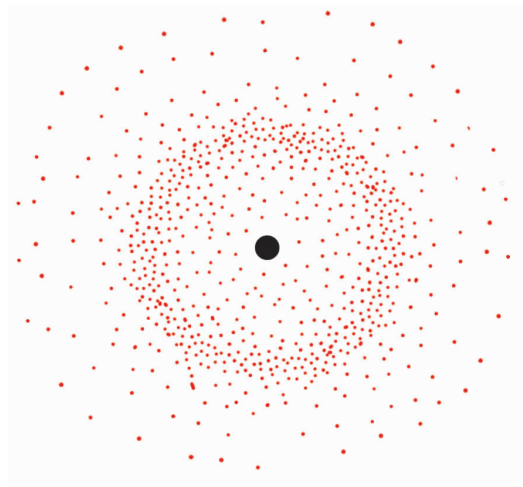


图 2-5-4 基态氢原子的电子云

可见, 对微观粒子的量子描述和对宏观物体的经典描述是完全不同的. 经典描述能够给出物体在任一时刻的精确位置和速度, 从而能够完全确定物体运行的轨迹, 而量子描述只能给出微观粒子在空间各点出现的概率分布, 无法给出微观粒子运行的轨迹. 因此, 在讨论微观粒子的运动时, 轨迹的概念变得毫无意义了.

### 不确定性关系

为什么微观粒子的运动状态不能像宏观物体的运动那样用精确的轨迹来描述呢? 这是因为微观粒子具有波动性. 例如, 光的双缝干涉使得每个光子以一定的概率落在感光片的某个点上. 有人提出这样一种想法, 如果在光子穿过双缝的一瞬间, 能够同时确定光子的位置和动量, 那么根据牛顿运动定律, 就可以很容易确定随后光子运动的轨迹了. 这就无须引入概率波来描述光子的状态, 但我们能否同时确定光子的位置与动量呢?

实验发现, 对光子位置的测量越精确, 其动量的不确定性就越大, 反之亦然. 如果用  $\Delta x$  表示微观粒子位置的不确定性, 用  $\Delta p$  表示微观粒子在  $x$  方向上的动量的不确定性, 则两者之间的关系为

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

式中  $h$  为普朗克常量. 上式称为微观粒子的**不确定性关系**. 它意味着微观粒子的坐标和动量不可能同时完全精确地确定.

### 专业术语

电子云

electron cloud

基态

ground state

### 专业术语

不确定性关系

uncertainty relation

微观粒子的波粒二象性及不确定性关系，在本质上是一致的。它们都导致了一个共同的结果：微观粒子运动的状态，不能像宏观物体的运动那样通过确定的轨迹来描述，而是只能通过概率波作统计性的描述。

### 讨论与交流

宏观物体的位置与动量之间也存在不确定性关系吗？如果将  $\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$  式应用到一个宏观物体上，是否还有意义？为什么？

### 资料活页

#### 德布罗意波假设的提出

德布罗意在他的博士论文中提出了实物粒子的波动性假设。但是，由于德布罗意波是如此的玄妙和不可思议，德布罗意波并没有得到广泛的认可。后来，德布罗意的论文被他的导师朗之万 (P. Langevin, 1872—1946) 推荐给爱因斯坦，他的思想立刻受到爱因斯坦的青睐。德布罗意推广了爱因斯坦的光子假说，把光子和实物粒子统一在共同的波粒二象性基础上。由于得到爱因斯坦的肯定，德布罗意波很快受到物理学界的重视。1926年，德布罗意波此时虽然还没有被实验证明，但已经成为量子力学创始人之一的薛定谔 (E. Schrödinger, 1887—1961) 建立量子力学波动方程的重要理论基础。

<http://physics.scnu.edu.cn> 我们的网站

德布罗意的生平。

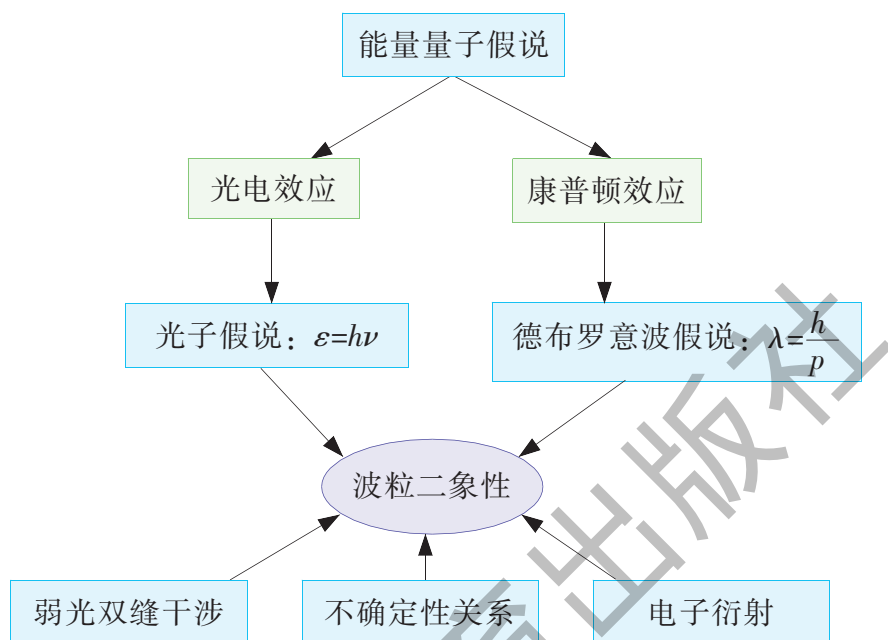
### 练习

1. 我们说电子具有波动性，并不是说电子沿着波浪形的曲线前进。那么，波动性表现在哪些方面？
2. 估算运动员跑步时的德布罗意波的波长，说明为什么我们观察不到运动员的波动性。
3. 求经过 10 000 V 电压加速的电子的德布罗意波的波长。
4. 电子位置的不确定量为  $5.0 \times 10^{-2}$  nm 时，其速率的不确定量为多少？

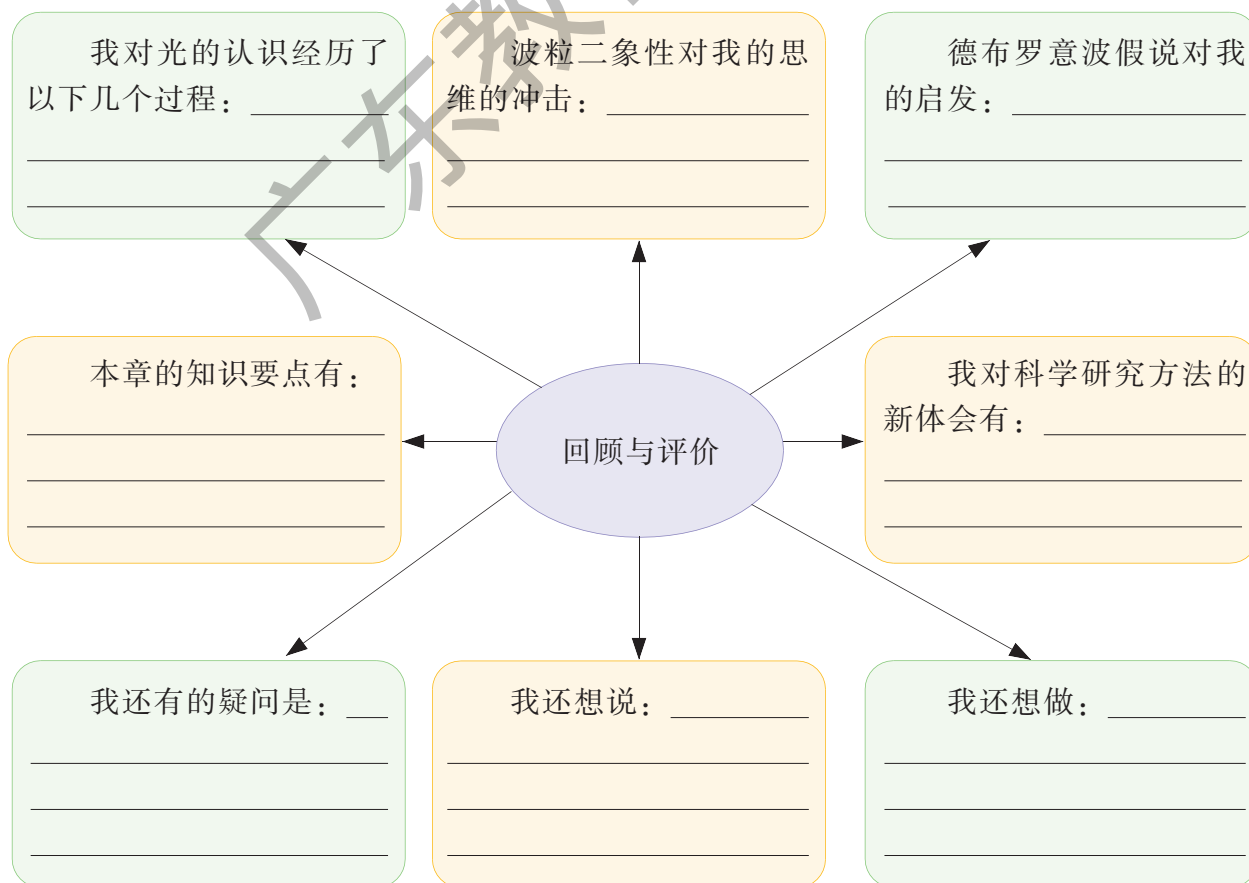


# 本章小结

## 一、知识结构



## 二、回顾与评价



## 习 题 二

1. 硅光电池是利用光电效应原理制成的器件，下列表述中正确的是 ( ).
  - A. 硅光电池是把光能转化为电能的一种装置
  - B. 硅光电池中吸收了光子能量的电子都能逸出
  - C. 逸出的光电子的最大初动能与入射光的频率无关
  - D. 任意频率的光照射到硅光电池上都能产生光电效应
2. 假设一个沿着一定方向运动的光子和一个静止的自由电子相互碰撞以后，电子向某一个方向运动，光子沿另一方向散射出去，则这个散射光子跟原来的光子相比 ( ).
  - A. 频率变大
  - B. 速度变小
  - C. 光子能量变大
  - D. 波长变长
3. 如图 2-1 所示，是工业生产中大部分光电控制设备（如夜亮昼熄的路灯）用到的光控继电器的示意图，它由电源、光电管、放大器、电磁继电器等几部分组成。

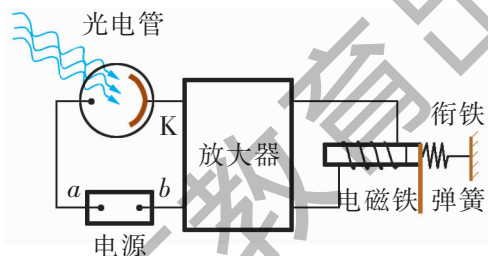


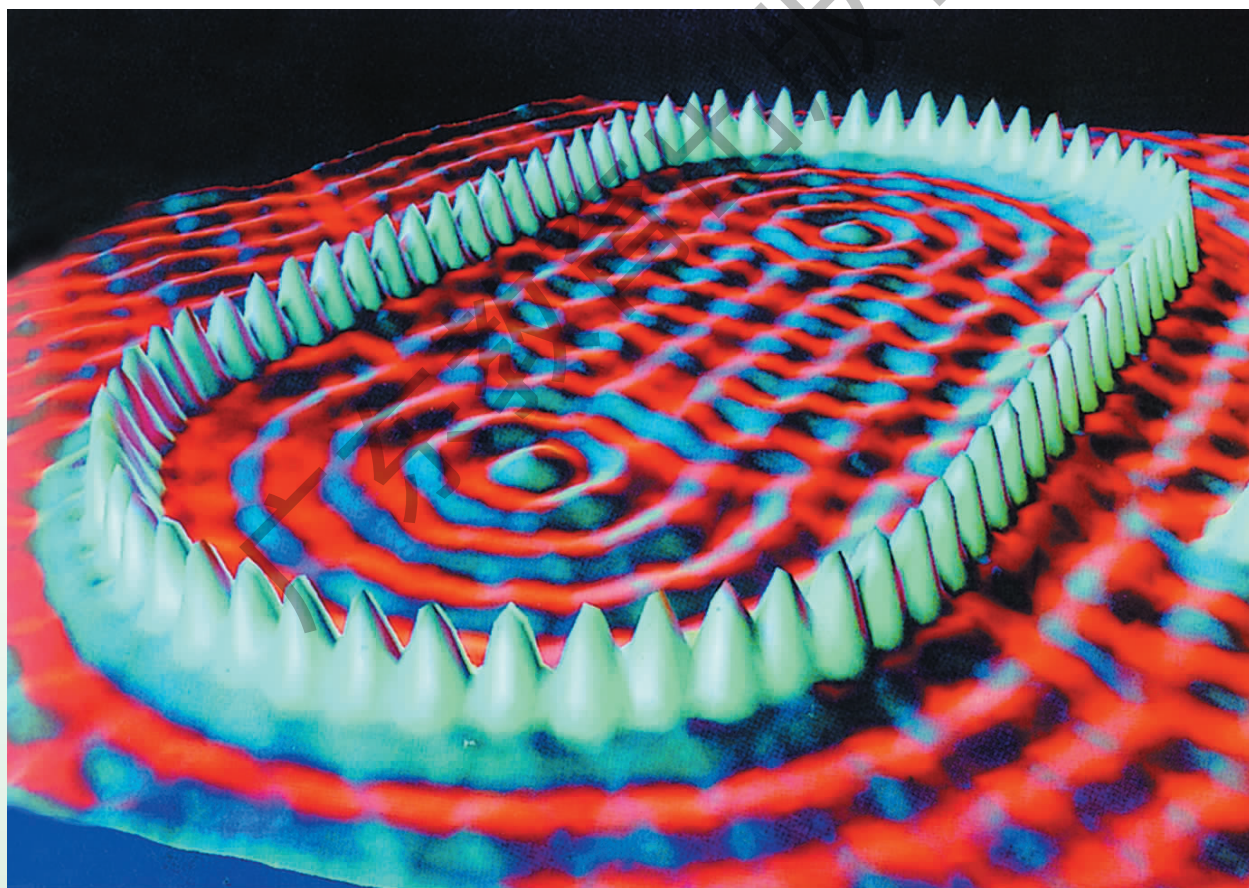
图 2-1

- (1) 示意图中， $a$  端应是电源\_\_\_\_\_极。
- (2) 光控继电器的原理是：当光照射光电管时\_\_\_\_\_。
- (3) 当用绿光照射光电管阴极  $K$  时，可以发生光电效应，则下列说法中正确的是 ( ).
  - A. 增大绿光照射强度，光电子最大初动能增大
  - B. 增大绿光照射强度，电路中的光电流增大
  - C. 改用波长比绿光波长大的光照射光电管阴极  $K$  时，电路中一定有光电流
  - D. 改用频率比绿光频率大的光照射光电管阴极  $K$  时，电路中一定有光电流
4. 某激光管以  $P=60\text{ W}$  的功率发射波长  $\lambda=6.63\times 10^{-7}\text{ m}$  的光束，求：
  - (1) 该管在  $1\text{ s}$  内发射出多少个光子？
  - (2) 若光束全部被某黑体表面吸收，那么该黑体表面所受到光束对它的作用力  $F$  为多大？
5. 已知锌的逸出功为  $3.34\text{ eV}$ ，用某单色紫外线照射锌板时，逸出光电子的最大速度为  $10^6\text{ m/s}$ ，求该紫外线的波长  $\lambda$ 。
6. 查阅有关资料，列出本章中重大发现的年代。

# 第三章

## 原子结构之谜

我们知道，物体是由大量原子组成的，原子本身又由更小的成分——电子及原子核所组成。可是，人们真的看见过原子吗？人们真的打开过原子而看清了它们的结构了吗？如果没有，那么科学家又是如何推断出原子结构的呢？你是否也愿意像科学家一样，借助已有的知识，发挥大胆的想法，去探索微观世界的奥秘呢！



## 第一节 敲开原子的大门

### 专业术语

原子  
atom

相当长的一段时间内，人们都以为原子就是组成物体的最小微粒，原子是“不可分割的”。意识到原子内部其实还有着更深层次的结构，始于英国科学家汤姆生（J. J. Thomson, 1856—1940），他在对阴极射线等现象的研究中发现了电子，从而敲开了原子的大门！

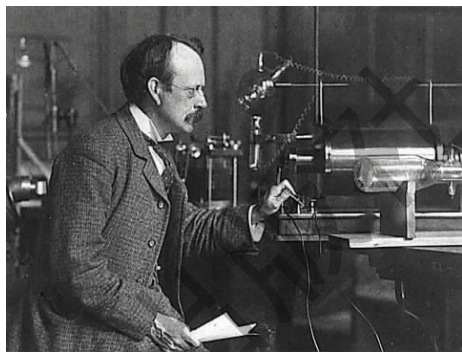


图 3-1-1 正在做实验的汤姆生

### 探索阴极射线

1858年，德国科学家普吕克尔（J. Plucker, 1801—1868）发现了阴极射线。在一个被抽成真空的玻璃管两端加上高电压，这时阴极会发出一种射线，使正对阴极的玻璃管壁上出现绿色荧光。这种奇妙的射线被称为阴极射线（如图 3-1-2）。阴极射线究竟是什么？是原子，还是更小的物质微粒？这个问题引起了科学家们的普遍关注。有人认为阴极射线类似于一种电磁波，也

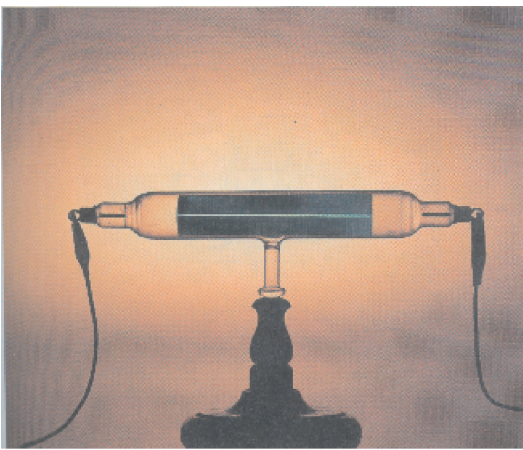


图 3-1-2 神奇的阴极射线

有人认为它是由带负电的物质微粒组成，但任何一方也拿不出充分的证据。这场关于阴极射线本质的争论引起了汤姆生的注意。

汤姆生设计了图 3-1-3 所示的阴极射线管来测定阴极射线的电荷。

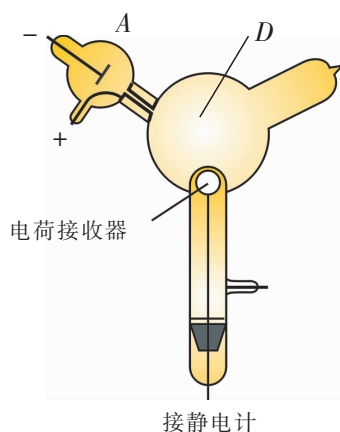


图 3-1-3 测定阴极射线的电荷

这个管子的特别之处在于其侧面有个电荷接收器，当阴极  $A$  产生的射线进入大真空管  $D$  时，可以看到射线对面的玻璃壁上有荧光出现，这时没有电荷进入电荷接收器。当在大真空管中加上磁场，射线就会偏转而被电荷接收器所接收。收集到的电荷经静电计检验为负电荷。汤姆生又做了阴极射线在电场中偏转的实验，均表明阴极射线本质上是由带负电的微粒组成的。

为了进一步确定阴极射线的成分，汤姆生决定测量阴极射线中带电粒子的荷质比，即电量和质量的比值。他的基本思想是，一个质量为  $m$ 、电荷为  $e$  的带电粒子以速率  $v$  垂直进入磁场  $B$  中，如果粒子仅受磁场力作用，将做圆周运动，向心力即为洛伦兹力：

$$m \frac{v^2}{r} = evB$$

只要确定了粒子运动的速率及半径，就可以测出荷质比。为此，他设计了如图 3-1-4 所示的实验装置。平行板  $M$ 、 $N$  间产生竖直向上的电场  $E$ ，在垂直电场向外的方向上加一磁场  $B$ ，适当地调节电场和磁场的强度可以使射线中带电粒子所受的电场力和洛伦兹力达到平衡，从而确定其速率。然而，上式中的半径  $r$  不容易测量，有没有其他方法呢？

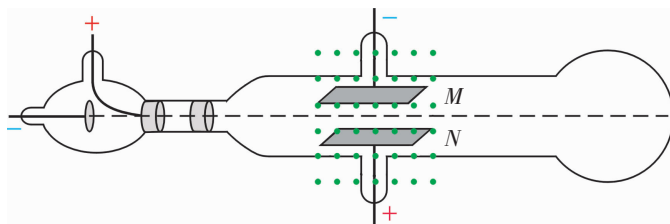


图 3-1-4 测定荷质比

### 讨论与交流

设平行板  $M$ 、 $N$  间的间距为  $h$ ，板的水平长度为  $d$ 。首先使阴极射线仅受电场作用并达到最大偏转（如图 3-1-5），测出此时的场强  $E$ ，随后保持  $E$  不变，外加磁场使射线恢复水平不再偏转，测出此时的磁感应强度  $B$ 。

1. 请证明粒子的初始速率  $v$  为：

$$v = \frac{E}{B}$$

2. 请证明射线粒子荷质比的表达式为：

$$\frac{e}{m} = \frac{Eh}{B^2d^2}$$

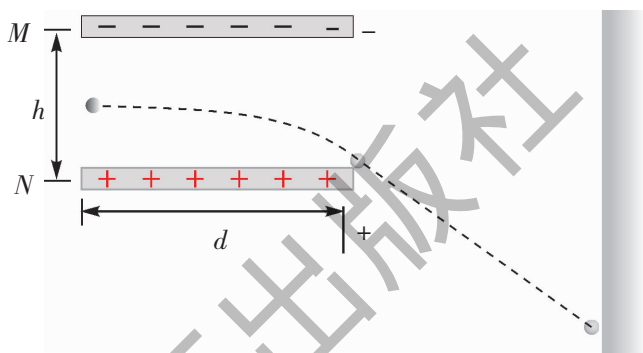


图 3-1-5 使射线达到最大偏转

上述实验设计中最妙的地方在于：通过使阴极射线在电场作用下达到最大偏转，从而将不易测量的物理量半径  $r$  转换为容易测量的平行板间距  $h$  和平行板长度  $d$ 。

汤姆生计算出的荷质比大约比当时已知的质量最小的氢离子的荷质比大 2000 倍。这有两种可能：或者这种带电粒子的电荷很大，或者它的质量很小。

### 电子的发现

#### 专业术语

电子

electron

在《选修 3-1》教材中第一章第五节的资料活页中介绍了元电荷的测定——密立根油滴实验。

汤姆生发现，对于不同的放电气体，或者用不同的金属材料制作电极，都测得相同的荷质比，随后又发现在气体电离和光电效应等现象中，可从不同物体中逸出这种带电粒子，这表明它是构成各种物体的共同成分。随后，汤姆生直接测量出粒子的电荷，发现该粒子的电荷与氢离子的电荷大小基本上相同，说明它的质量比任何一种分子和原子的质量都小得多，至此，汤姆生完全确认了电子的存在。

后来，美国科学家密立根又精确地测定了电子的电量：

$$e = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$$

根据荷质比，可以精确地计算出电子的质量为：

$$m = 9.1094 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

由于发现电子的杰出贡献，汤姆生在 1906 年获得诺贝尔物理学奖。电子的发现打破了传统的“原子不可分”的观念，使人类对自然世界的认识又向前迈进了一步。

### 实践与拓展

查阅资料，看看还有哪些测定荷质比的方法。

### 资料活页

#### 早期的原子观

早在公元前 4 世纪，古希腊的哲学家德谟克利特（Democritus，约前 460—前 370）就提出“原子”这一概念。他认为任何物体都是由大量不可再分的微粒构成，并把这种微粒起名为原子，希腊语意思为“不可分割”。他的这一观点完全是靠推测得来，没有什么科学根据，所以没有得到多少人的认同。直到 19 世纪，科学家们才断定他们终于找到了德谟克利特所预言的那种不可再分的物质基础。英国化学家道尔顿（J. Dalton，1766—1844）提出：在化学反应中，每种单质粒子的种类及其数目不变，只能重新排列组成新物体。于是他将原子这一哲学术语变为阐释物体终极粒子的一个概念，并且认为原子是不可再分的。在此基础上科学家建立了各种元素的原子组成的原子体系。虽然道尔顿的观点在我们现在看来是不正确的，但它是人类认识原子的基础，在当时为科学的发展作出了重大的贡献。

#### http 我们的网站 (physics.scnu.edu.cn/gzwl)

1. 自阴极射线发现以来，有不少人从事阴极射线的研究，其中包括一些著名的科学家，如赫兹等，但都没有发现电子，有兴趣了解其中的原因吗？

2. 汤姆生的生平简介。

3. 密立根油滴实验。

### 练习

1. 如图 3-1-6 为密立根测量电子电量实验的示意图，油滴从喷雾器喷出后，落到两平行板间，油滴由于摩擦而带电，调节两极板间的电压，可使油滴悬浮。通过显微镜观察到某个半径  $r = 1.6 \times 10^{-4} \text{ cm}$  的油滴恰静止在电场中，此时两金属板间匀强电场的电场强度  $E = 1.9 \times 10^5 \text{ N/C}$ 。已知油的密度为  $\rho = 0.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。求该油滴所带的电荷量是元电荷的多少倍？（取  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ）

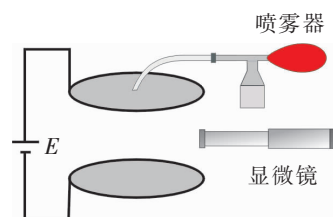


图 3-1-6 密立根油滴实验

## 第二节 原子的结构

### 专业术语

原子结构

atomic structure

模型可以帮助我们理解一些无法直接观察的事物。一个好的原子模型应该能够解释所有的关于原子和物体的信息。当获得越来越多的信息时，模型也会慢慢被修正。

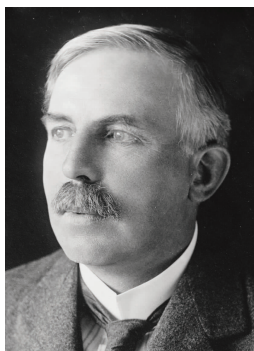


图 3-2-2 卢瑟福

### 专业术语

$\alpha$  粒子散射实验

alpha particle scattering experiment

$\alpha$  粒子后来被证明是氦原子核，带正电，由两个中子和两个质子组成，其质量约为氢原子的 4 倍，电子的 7300 倍。

电子的发现大大激发了人们研究原子内部结构的热情。由于原子呈电中性，既然电子带负电，那么原子内部一定还有带正电的部分。汤姆生首先提出了一种原子结构的模型——葡萄干布丁模型。

他设想原子是一个球体，带正电的部分均匀地分布在其中，质量很小的电子则像布丁中的葡萄干一样镶嵌在内（图 3-2-1）。汤姆生的葡萄干布丁模型能够解释一些实验事实，例如镶嵌在原子中的电子在平衡位置附近作简谐振动，可以定性地解释某些光辐射。汤姆生的模型后来被卢瑟福（E. Rutherford, 1871—1937）的  $\alpha$  粒子散射实验所否定。

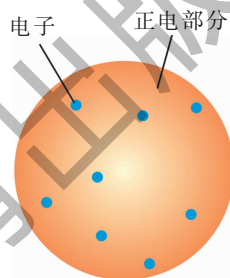


图 3-2-1 葡萄干布丁模型

### $\alpha$ 粒子散射实验

1909—1911 年，英国物理学家卢瑟福指导他的助手进行了  $\alpha$  粒子散射实验。实验装置的示意图，如图 3-2-3 所示。

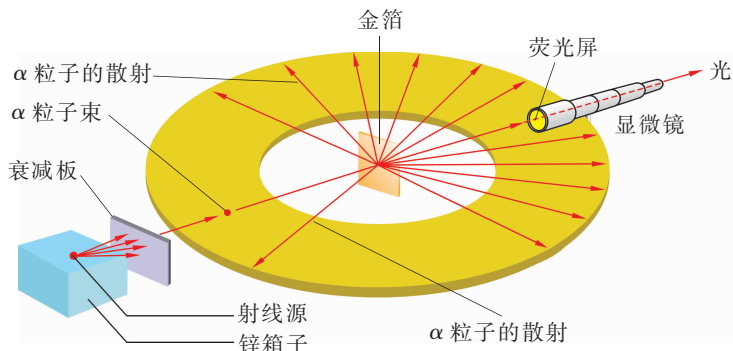


图 3-2-3  $\alpha$  粒子散射实验

整个实验在真空中进行。高速的  $\alpha$  粒子流垂直射到很薄的金箔上，由于受到金原子中带电微粒的库仑力作用，一些  $\alpha$  粒子通过金箔后必然会改变原来的运动方向，产生偏转。当  $\alpha$  粒子穿



过金箔后，打在荧光屏上产生闪光，通过显微镜可以观察到。

实验结果出人意料：绝大多数  $\alpha$  粒子穿过金箔后仍沿原来的方向前进，但少数  $\alpha$  粒子发生了较大的偏转，并且有极少数  $\alpha$  粒子的偏转超过了  $90^\circ$ ，有的甚至几乎达到  $180^\circ$ ！卢瑟福生动地描述道：这简直不可思议！这就好像你对着一张薄薄的纸射出一颗 15 英寸口径的炮弹，却被反射回来的炮弹击中一样。

### 讨论与交流

原子结构的葡萄干布丁模型能否解释  $\alpha$  粒子大角度散射？请你从以下三个方面去考虑：

1.  $\alpha$  粒子出现大角度散射有没有可能是与电子碰撞后造成的？
2. 按照葡萄干布丁模型， $\alpha$  粒子在原子附近或穿越原子内部后有没有可能发生大角度偏转？
3. 你认为原子中的正电荷应如何分布，才有可能造成  $\alpha$  粒子的大角度偏转？为什么？

### 原子的核式结构的提出

为什么  $\alpha$  粒子会出现大角度散射呢？卢瑟福认为  $\alpha$  粒子一定是受到原子内部正电荷产生的极强的电场斥力作用，运动方向才会发生这样大的改变，只有原子的正电荷和几乎全部质量都集中在原子中心的一个很小的核上才有这种现象。

1911 年，卢瑟福提出了原子的核式结构的模型（图 3-2-4）：原子的中心有一个带正电的原子核，它几乎集中了原子的全部质量，而电子则在核外空间绕核旋转。

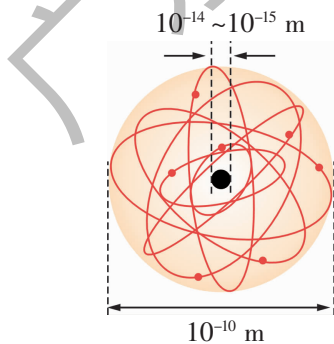


图 3-2-4 原子核式模型

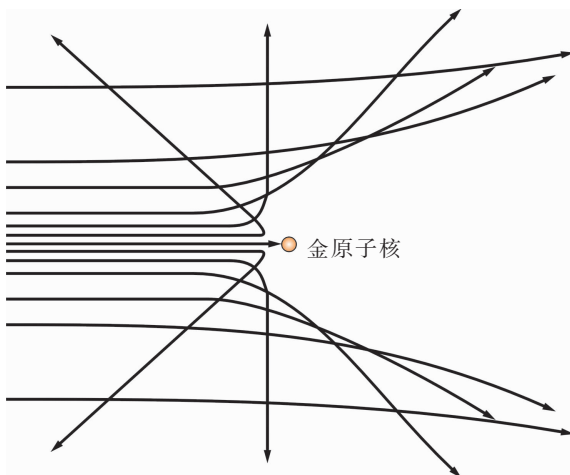
按照这个结构，大多数  $\alpha$  粒子都是“侵入”金原子核和电子之间的空间里，它们受到的库仑力很小，运动方向的改变也就很小。只有极少数的  $\alpha$  粒子会非常接近金原子核，这时它们之间强烈的斥力就迫使  $\alpha$  粒子发生较大的偏转，甚至被弹回，如下页图 3-2-5。

原子核的质量几乎集中了原子的全部质量，但它的半径

“极少数”在这里是指大约每 8000 个  $\alpha$  粒子就有一个发生了大角度散射。

原子结构就像一个“黑箱”，里面的信息是无法直接获取的。研究黑箱问题的一般方法是有目的地向黑箱输入一些信息，观测黑箱反馈回来的输出信息，进而推断出黑箱内部的结构和运行机制。

微观粒子的一维碰撞可以帮助我们推断是否有未观察到的粒子，二维或三维碰撞中散射角的分布，还可以帮助我们了解微观粒子相互作用的形式。

图 3-2-5  $\alpha$  粒子散射示意图

却非常小，原子半径大约是  $10^{-10}$  m，而原子核的半径约为  $10^{-15} \sim 10^{-14}$  m，仅相当于原子半径的万分之一！形象地说，假设原子像足球场那么宽阔，原子核的半径则只相当于一个硬币的宽度。可见原子内部是多么空旷。

### 讨论与交流

请比较一下太阳系与原子的结构，为什么我们把原子的核式结构称为一种“模型”，而太阳系（如图 3-2-6）的行星结构却不叫模型呢？它们最本质的区别是什么？



图 3-2-6 太阳系

### 实践与拓展

已知氢原子核的质量为  $1.6726 \times 10^{-27}$  kg，估算一下氢原子核的密度。你有没有见过如此大密度的物体？查阅资料，看看宏观世界还有什么物体具有如此大的密度？

### http 我们的网站 ([physics.scnu.edu.cn/gzwl](http://physics.scnu.edu.cn/gzwl))

1.  $\alpha$  粒子散射的模拟实验。
2. 卡文迪许 (Cavendish) 实验室。
3. 原子模型的历史演变。


**练习**

1. 图 3-2-7 的 4 个选项中,  $O$  点表示某原子核的位置, 曲线  $ab$  和  $cd$  表示经过该原子核附近的  $\alpha$  粒子的运动轨迹, 正确的图是( ).

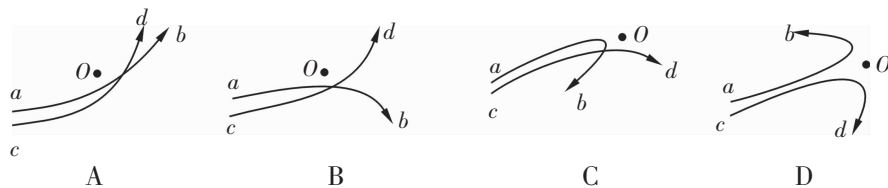


图 3-2-7

2. 卢瑟福是如何由  $\alpha$  粒子散射实验得出原子的核式结构的?  
 3. 为什么在计算电子和原子核之间的引力作用时, 可以不考虑万有引力?

4. 如果  $\alpha$  粒子以速度  $v$  与电子发生弹性正碰 (假定电子原来是静止的), 求碰撞后  $\alpha$  粒子的速度变化了多少? 并由此说明: 为什么原子中的电子不能使  $\alpha$  粒子发生明显的偏转?

广东教育出版社

## 第三节 氢原子光谱

### 专业术语

原子光谱

atomic spectrum

早在人们清楚地了解原子结构之前就已经发现，某种原子的气体通电后可以发光并产生固定不变的光谱。这种光谱被称之为**原子光谱**。原子光谱是了解原子性质的最重要的直接证据。

### 巴耳末系

### 观察与思考

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

分光镜是一种用于观察物质光谱的仪器，其原理是利用不同频率的光折射角不同，将复色光分解成若干单色光。

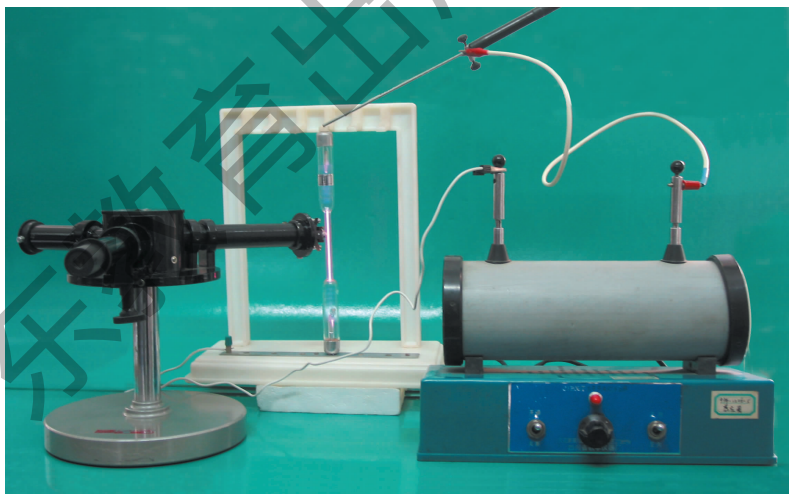


图 3-3-1 观察氢原子光谱

图 3-3-2 为氢原子光谱图。在可见光区内，氢原子光谱有四条谱线，它们分别用符号  $H_{\alpha}$ 、 $H_{\beta}$ 、 $H_{\gamma}$  和  $H_{\delta}$  表示。这四条谱线的波长分别为 656.3 nm、486.1 nm、434.1 nm 和 410.2 nm。可见，氢原子受激发只能发出几种特定频率的光，它的光谱是几条分立的亮线，就像不等距的“阶梯”。这些谱线之间到底有什么规律呢？

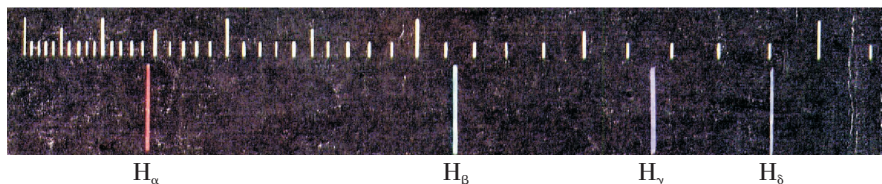


图 3-3-2 氢原子光谱

1885年，瑞士的一位中学数学教师巴耳末（J. J. Balmer, 1825—1898）发现这四条光谱的波长可以用一个很简单的数学公式表示。这个公式称为巴耳末公式：

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

式中的常数  $R$  称为里德伯常量，对于氢原子，实验测得  $R$  的值为  $1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 。



图 3-3-3 巴耳末

**讨论与交流**

利用巴耳末公式将理论计算值与实验测得的四条谱线的波长作比较。客观的物理规律竟然可以用如此简洁的数学形式表述出来，对此你有什么看法？

$n$  大于 6 的符合巴耳末公式的光谱线（大部分在紫外区）随后也被观测到了，可见这个公式确实反映了氢原子内在的某种规律。人们把一系列符合巴耳末公式的光谱线统称为巴耳末系。

**专业术语**

里德伯常量  
Rydberg constant

**氢原子光谱的其他线系**

自从发现巴耳末系后，人们又在紫外区、红外区及近红外区发现了氢原子的其他线系，这些线系也和巴耳末系一样可以用一个简单的公式表示。它们分别是：

莱曼系（在紫外区）： $\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 2, 3, 4 \dots$

帕邢系（在近红外区）： $\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 4, 5, 6 \dots$

布喇开系（在红外区）： $\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 5, 6, 7 \dots$

普丰德系（在红外区）： $\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 6, 7, 8 \dots$

这些线系（如图 3-3-4）可用一个统一的公式表示为

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

式中的  $m$  和  $n$  均为正整数，且  $n > m$ 。此式称为广义巴耳末公式，也可以表示为

$$\frac{1}{\lambda} = T(m) - T(n)$$

式中  $T(m) = \frac{R}{m^2}$ ,  $T(n) = \frac{R}{n^2}$  称为光谱项，氢原子光谱中

**专业术语**

巴尔末系  
Balmer series  
莱曼系  
Lyman series  
帕邢系  
Paschen series  
布喇开系  
Brackett series  
普丰德系  
Pfund series

**专业术语**

光谱项  
spectral term

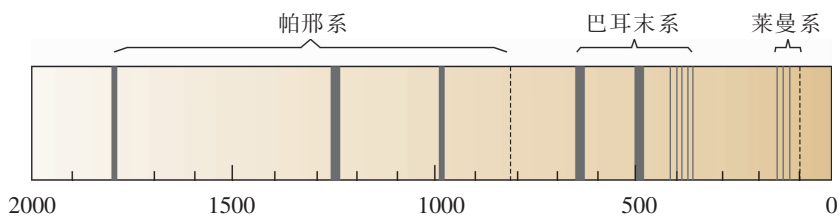


图 3-3-4 三个线系（单位：nm）

谱线波长的倒数可以表示为两光谱项之差。

### 原子光谱

氢原子光谱只是众多原子光谱中最简单的一种，图 3-3-5 列出了钠、氦、氖和汞原子的光谱。

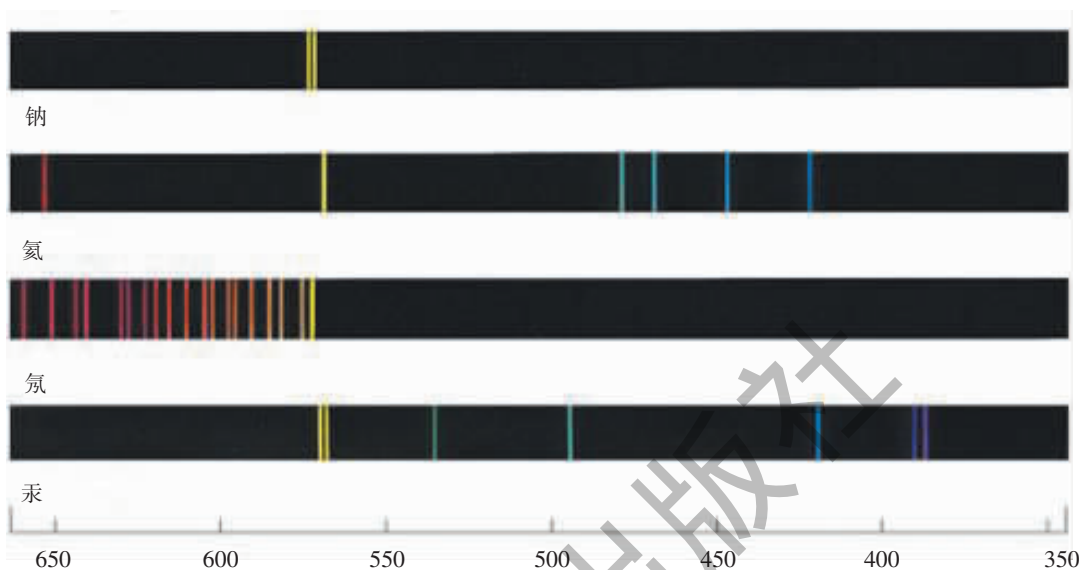


图 3-3-5 钠、氦、氖和汞原子的光谱 (单位: nm)

科学家观察了大量的原子光谱，发现每种原子都有自己特定的原子光谱。不同的原子，其原子光谱均不相同，因而，原子光谱被称为原子的“指纹”。我们可以通过对光谱的分析鉴别不同的原子，确定物体的化学组成并发现新元素。

和氢原子一样，其他原子谱线的波长的倒数的也可以表示为两个光谱项之差，所不同的是，它们的光谱项的形式要复杂一些。

### 实践与拓展

巴耳末在研究氢原子光谱各谱线波长之间的规律时，运用了一种数学方法——不完全归纳法。查阅相关资料，就“数学在物理学中的作用”写一篇心得。

### 资料活页

#### 光谱分析及应用

氦元素最早是从太阳上发现的，太阳距离我们如此的遥远，我们怎么知道它的元素构成呢？这是因为各种元素的原子都有特定的光谱，我们通过对太阳光谱进行分析，然后与各种原子的光谱对照，就可以鉴别和发现元素。

可以用作光谱分析的原子光谱主要有两种：一种是明线光谱，它是稀薄气体发光直接产生的；另外一种吸收光谱，它是当白光通过物质时，某些波长的光被物质吸收后产生的。实验表明：原子的吸收光谱中的每一条暗线都跟该原子的明线光谱中的一条明线相对应。即原子只能释放出某种特定频率的光，也只能吸收某种特定频率的光，而且释放的光和吸收的光的频率是相同的。图 3-3-6 是氢原子的明线光谱和吸收光谱。



图 3-3-6 氢的明线光谱和吸收光谱

光谱分析十分灵敏，即便某种元素在物体中的含量只有三百万分之一毫克，也足以将它的谱线显示出来。于是人们就利用光谱分析来检测物体是不是达到纯度的要求，这一点对于半导体材料显得尤为重要。

光谱分析还广泛地被应用于天文学上。人们在研究星球运动时，把运动恒星的光谱线与太阳这种不运动的光源光谱进行比较，可以显示出这些微小的频率改变。根据光的多普勒效应，如果光谱向红端移动（即频率变小，波长变长），则说明恒星在远离我们；如果光谱向紫端移动（即频率变大，波长变短），则说明恒星在向我们奔来。1868 年，英国天文学家哈金斯通过对天狼星光谱中氢谱线的分析，发现该谱线出现了红移，由此求出了天狼星以 47 km/s 的速度远离我们而去。另外，光谱分析还帮助我们得知遥远星球的化学组成。

<http://physics.scnu.edu.cn/gzwl> 我们的网站

1. 巴耳末是如何得出巴耳末公式的？
2. 分光镜的构造与原理。
3. 太阳元素的发现。

 练习

1. 计算氢原子中巴耳末系的最短波长和最长波长各是多少？
2. 你还记得阿基米德检验金皇冠的故事吗？他是用什么办法检验的？你觉得这种办法可靠吗？能否使用光谱分析的方法来检验金皇冠？请查阅相关资料，提出一种方案。

## 第四节 原子的能级结构

### 专业术语

能级

energy level

跃迁

transition

氢原子光谱的各谱线波长之间的规律是找到了，但为什么氢原子发出的光谱是不连续的？形成原子光谱的原因又是什么呢？

### 能级结构猜想

在氢气放电过程中，辐射出光的同时，氢原子的能量也在减少，而能量的减少对应于原子从一个状态变化到另外一个状态。如果能量是连续减少的，那么形成的光谱必定是连续谱。但是氢原子光谱是分立的，因此我们猜想原子内部的能量也是不连续的。

我们把原子内部不连续的能量称为原子的**能级**，并把原子从一个能级变化到另一个能级的过程叫做**跃迁**。处于高能级的原子会自发地向低能级跃迁，并且在这个过程中辐射光子 [图 3-4-1 (a)]。假定原子在跃迁前后的能级分别为  $E_m$  和  $E_n$ ，根据能量守恒定律，并结合爱因斯坦的光量子学说可以得到辐射出光子的能量为

$$h\nu = E_m - E_n \quad (3.4.1)$$

反之，原子吸收了特定频率的光子或者通过其他途径（如受到高速电子的轰击）获得能量时便可以从低能级向高能级跃迁 [图 3-4-1 (b)]，同样也遵循上面的规律。

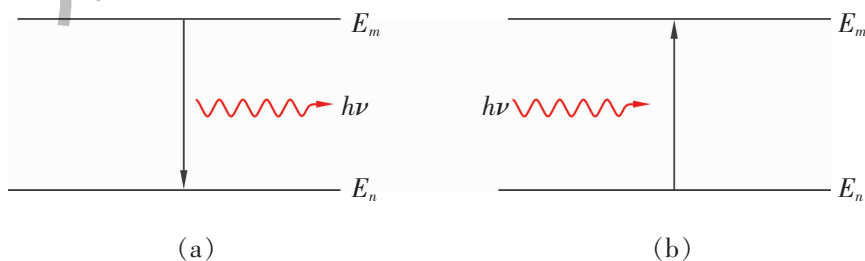


图 3-4-1 原子的跃迁

为了将上述猜想与实验结果进行比较，我们还需要知道原子能级的具体表达式。

### 氢原子的能级

由上一节的  $\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$  式我们知道，氢原子辐射光谱的波长取决于两光谱项之差；而  $h\nu = E_m - E_n$  则揭示出氢原子辐射光



的频率取决于两能级之差. 能级与光谱项之间会有什么关系吗?

**讨论与交流**

比较  $\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$  与  $h\nu = E_m - E_n$  两个式子, 利用光的波长、频率与波速的关系  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , 能否得出氢原子能级的表达式? 如何解释你所得到的结果?

最先得出氢原子能级表达式的, 是丹麦物理学家玻尔 (N.Bohr, 1885—1962), 他在吸取前人思想的基础上, 通过大胆的假设, 推导出氢原子的能级满足:

$$E_n = -\frac{Rhc}{n^2}, \quad n=1, 2, 3 \dots$$

式中  $R$  为里德伯常量,  $h$  为普朗克常量,  $c$  为光速,  $n$  是正整数. 这个式子表明, 氢原子的能量是不连续的, 只能取一些定值, 也就是说氢原子的能量是量子化的, 因此  $n$  也被称为能量量子数.

根据上式可以计算出氢原子对应不同量子数  $n$  的能级, 如图 3-4-2 所示, 每条横线代表一个能级, 两条横线间的距离表示能级的间隔亦即能量差. 在正常状态下, 氢原子处于最低的能级  $E_1$  ( $n=1$ ), 这个最低能级对应的状态称为**基态**, 氢原子在基态的能量为  $-13.6 \text{ eV}$ .

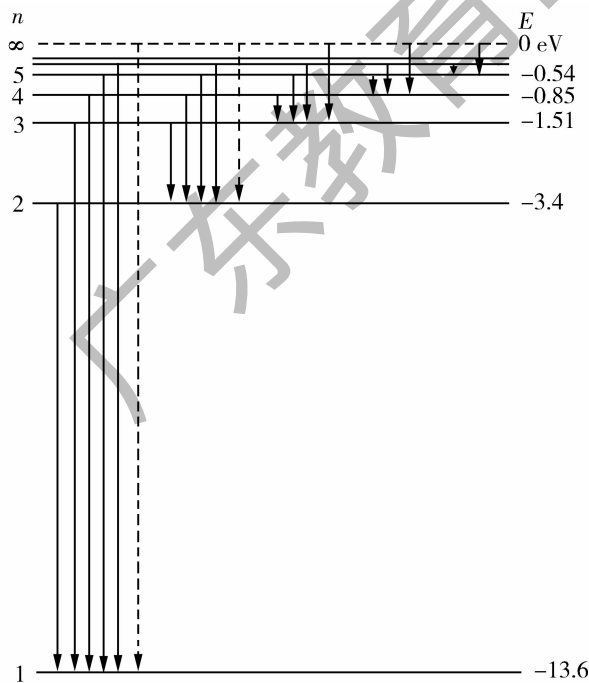


图 3-4-2 氢原子的能级示意图

当电子受到外界激发时, 可从基态跃迁到较高的能级  $E_2, E_3 \dots$  上, 这些能级对应的状态称为**激发态**. 处于激发态的氢原子是不稳定的, 它会向较低的能级跃迁, 跃迁时释放出来的能量以光子形式向外辐射, 这就是氢原子发光现象, 原子辐射出的光子的能量等于两能级间的能量差.

选取电子处于无穷远处时氢原子的能量为零, 则氢原子在其他状态下的能量为负值.

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

**专业术语**

激发态  
excited state

能级间的跃迁产生不连续的谱线，从不同能级跃迁到某一特定能级就形成一个线系，比如：巴耳末系就是氢原子从  $n=3, 4, 5\cdots$  能级跃迁到  $n=2$  的能级时辐射出的光谱（如图 3-4-3）。

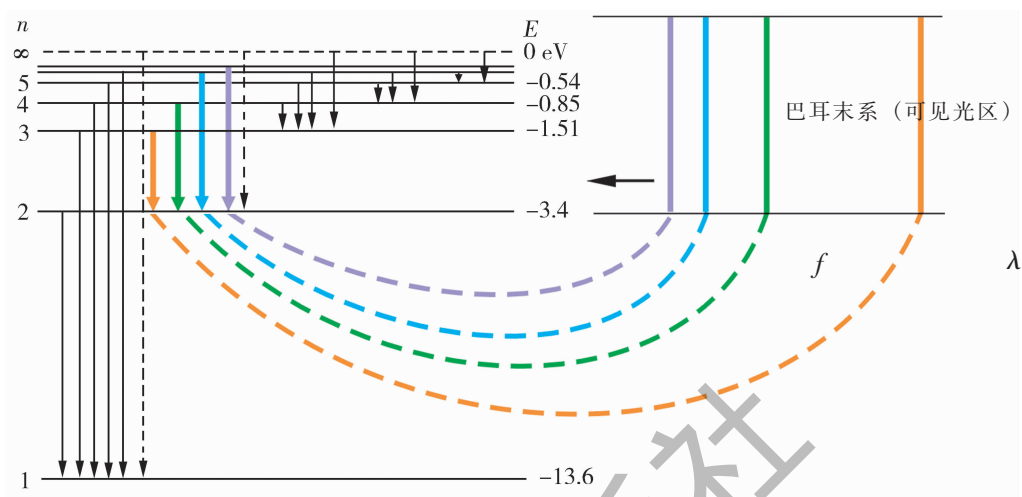


图 3-4-3 原子跃迁与巴耳末系

### 讨论与交流

如图 3-4-4，能否将原子的能级跃迁与上下楼梯时势能的变化进行比较？请考虑：什么情况下楼梯会趋向于连续的斜面？再与图 3-4-2 比较，猜想：氢原子能量在什么情况下量子效应最明显？什么情况下趋向于经典中的连续能量？这与量子数  $n$  的大小有关吗？

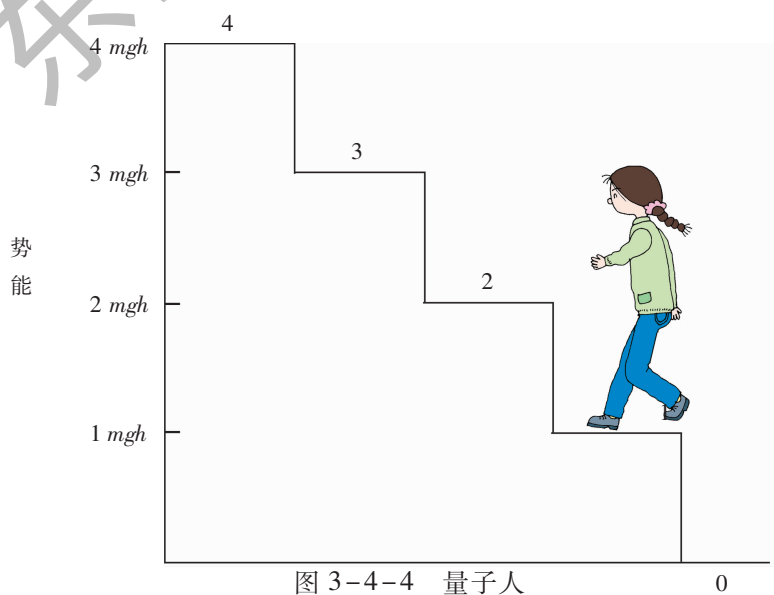


图 3-4-4 量子人

### 实践与拓展

原子的能级结构于 1914 年被德国物理学家弗兰克和赫兹所做的著名实验所证实。查找资料了解这个实验。

资料活页

量子力学的先驱——玻尔

玻尔，丹麦理论物理学家，哥本哈根学派的创始人。1913年，玻尔吸取了普朗克、爱因斯坦的量子概念，考虑氢原子中电子圆形轨道运动，提出原子结构的玻尔理论。理论的两条基本假设是：①定态假设。原子系统中存在具有确定能量的定态，原子处于定态时，电子绕核运动不辐射也不吸收能量。原子的定态可通过经典力学和角动量量子化条件得出。②跃迁假设。原子系统从一个定态跃迁到另一个定态，伴随着光子的发射和吸收。由此，他导出氢原子光谱的巴耳末公式，其中的里德伯常量不再是一个经验常量，而是由基元电荷、电子质量、普朗克常量、真空光速等基本物理常量确定的量。



图 3-4-5 玻尔

玻尔的理论成功地解释了氢原子光谱，但是对于多电子的原子却遇到困难。究其原因，是由于牛顿力学在微观世界是不适用的。尽管如此，玻尔的这些假说启发了当时的物理学家，发挥了承前启后的作用，推动了量子力学的创立。

玻尔谦虚好学，他善于和各种不同学术观点的学者交流。比如说他常常和爱因斯坦就学术上的问题进行辩论和探讨，有时争得面红耳赤，互不相让。在不确定性关系的看法上，爱因斯坦认为是“未能测准”，玻尔认为是“不可测准”，谁也说服不了谁。然而两位科学家在学术争论时，既相互尊重又互不相让的认真态度，却成为科学史上的佳话。

<http://physics.senu.edu.cn/gzwl> 我们的网站

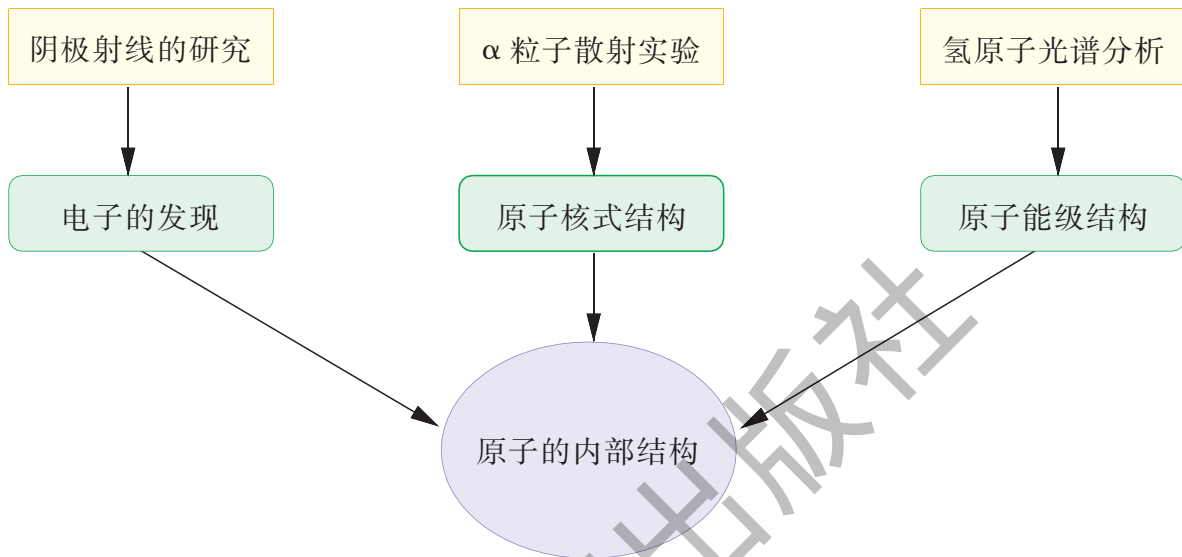
1. 玻尔与爱因斯坦的争论。
2. 弗兰克—赫兹实验。
3. 哥本哈根学派。

练习

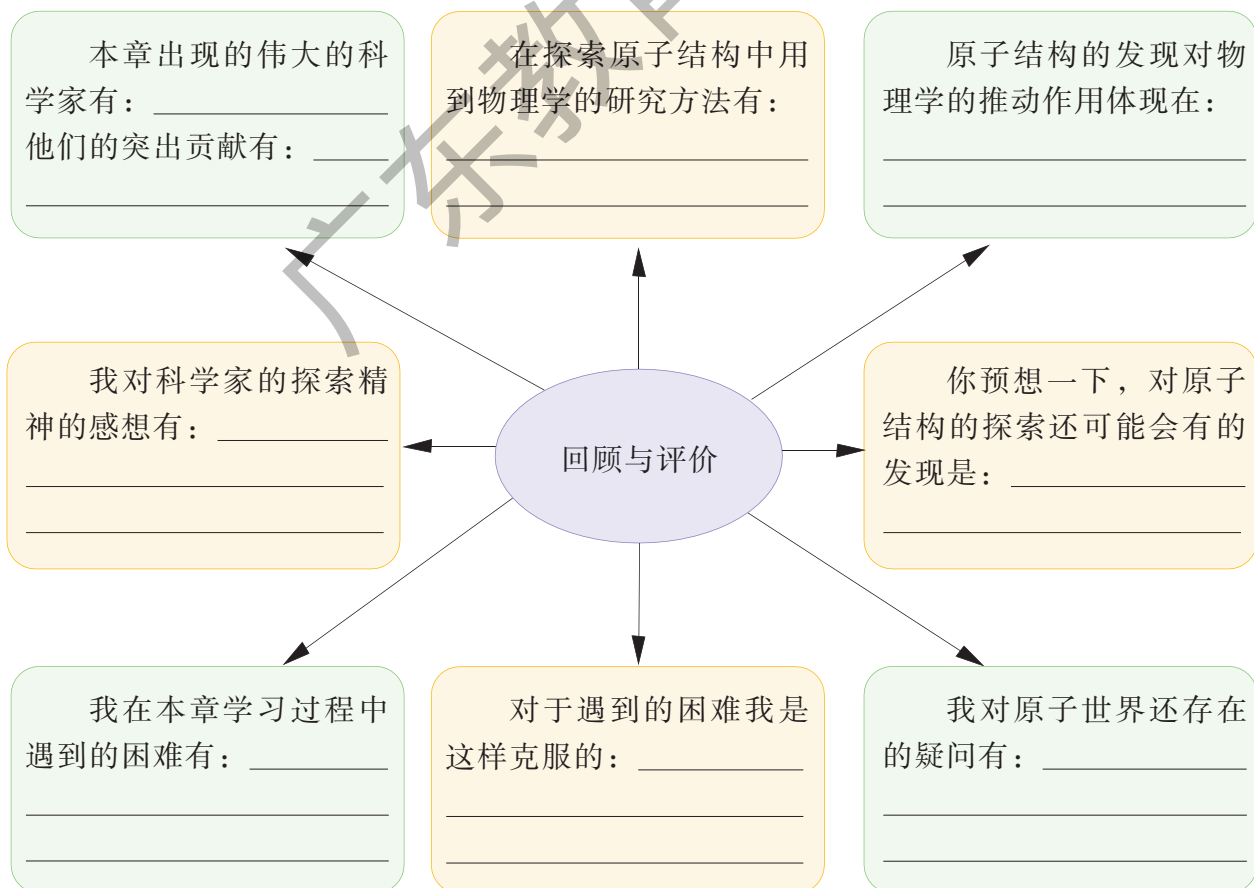
1. 解释原子的发光现象，并思考为什么各种原子的光谱均不相同。
2. 大量原子从  $n=5$  的激发态向低能级跃迁时，产生的光谱线可能有多少条？
3. 处于基态的氢原子在某种单色光照射下，只能发出频率为  $\nu_1$ 、 $\nu_2$  和  $\nu_3$  的三种光，且  $\nu_1 < \nu_2 < \nu_3$ ，则该照射光的光子能量为多少？
4. 氢原子从  $n=1$  的状态跃迁到  $n=4$  的状态，它所吸收的光子的波长是多少？这是不是可见光？
5. 氦原子失去一个核外电子后形成类氢结构的氦离子。氦离子的能级由下式给出： $E_n = -\frac{54.4}{n^2} \text{ eV}$ ，试画出氦离子的能级示意图。

## 本章小结

### 一、知识结构



### 二、回顾与评价



## 习 题 三

1. 在用  $\alpha$  粒子轰击金箔的实验中, 使  $\alpha$  粒子发生散射的主要作用力是 ( ).
  - A.  $\alpha$  粒子与原子核间的库仑力
  - B.  $\alpha$  粒子与原子中电子的库仑力
  - C.  $\alpha$  粒子与原子核和电子的库仑力两者都很重要
  - D.  $\alpha$  粒子和原子间的万有引力
2. 氢原子由  $n=1$  的状态激发到  $n=4$  的状态, 在它回到  $n=1$  的状态的过程中, 有以下说法:
  - ①可能激发的能量不同的光子只有 3 种
  - ②可能发出 6 种不同频率的光子
  - ③可能发出的光子的最大能量为 12.75 eV
  - ④可能发出光子的最小能量为 0.85 eV
 其中正确的说法是 ( ).
  - A. ①③
  - B. ②④
  - C. ①④
  - D. ②③
3. 用能量为 12.3 eV 的光子去照射一群处于基态的氢原子, 受光子照射后, 下列关于氢原子跃迁的说法中正确的是 ( ).
  - A. 原子能跃迁到  $n=2$  的能级上去
  - B. 原子能跃迁到  $n=3$  的能级上去
  - C. 原子能跃迁到  $n=4$  的能级上去
  - D. 原子不能跃迁到其他能级上去
4. 卢瑟福通过\_\_\_\_\_实验, 发现了原子中间有一个很小的核, 并由此提出了原子的核式结构模型. 图 3-1 平面示意图中的四条线表示  $\alpha$  粒子运动的可能轨迹, 请在图中补充完成中间两条  $\alpha$  粒子的运动轨迹.

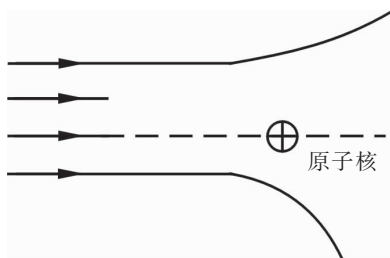


图 3-1

5. 原子丢失电子的过程叫做电离. 有一个电子与一个基态氢原子碰撞, 刚好使这个氢原子电离, 这个电子的动能是多少?
6. 当用能量为 12.6 eV 的电子轰击未激发的氢原子时, 试求这些氢原子所能达到的最高能态.
7. 原子从一个能级跃迁到另一个较低的能级时, 有可能不发射光子, 例如在某种条件下, 铬原子的  $n=2$  能级上的电子跃迁到  $n=1$  能级上时并不发射光子, 而是将相应的能

量转交给  $n=4$  能级上的电子，使之能脱离原子，这个现象叫做俄歇效应，以这种方式脱离了原子的电子叫做俄歇电子，已知铬原子能级公式可简化为  $E_n = -\frac{A}{n^2}$ ，式中  $n=1, 2, 3 \dots$  表示不同能级， $A$  是正的已知常数，上述俄歇电子的动能是多少？

8. 如图 3-2 所示的阴极射线管，管内的阴极  $K$  发出的电子（不计初速、重力和电子间的相互作用）经加速电压加速后，穿过  $A'$  中心的小孔沿中心轴  $O_1O$  的方向进入到两块水平正对放置的平行极板  $P$  和  $P'$  间的区域。当极板间不加偏转电压时，电子束打在荧光屏的中心  $O$  点处，形成了一个亮点；加上偏转电压  $U$  后，亮点偏离到  $O'$  点， $O'$  与  $O$  点的竖直间距为  $d$ ，水平间距可忽略不计。此时，在  $P$  和  $P'$  间的区域，再加上一个方向垂直于纸面向里的匀强磁场。调节磁场的强弱，当磁感应强度的大小为  $B$  时，亮点重新回到  $O$  点。已知极板水平方向的长度为  $L_1$ ，极板间距为  $b$ ，极板右端到荧光屏的距离为  $L_2$ 。

- (1) 求打在荧光屏  $O$  点的电子速度的大小。
- (2) 推导出电子的荷质比的表达式。

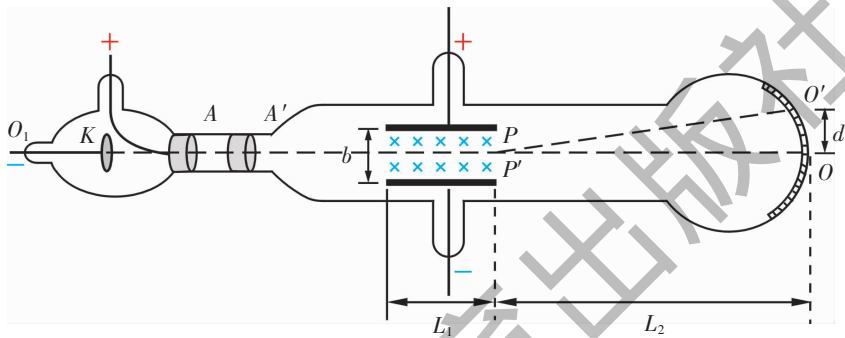


图 3-2

# 第四章

## 原子核

当你面对图中那宏伟壮丽的蘑菇云时，你是否被它所展现出的气势深深地震撼？遥想当年我们的祖先——一群用兽皮树叶遮体的古人，在躲避风雨雷电侵袭时曾经对大自然是那样的敬畏和无奈。今天，当人类已经拥有如此巨大的力量时，你又是否知道，这成就其实来源于对那小小原子核的认识？

神秘的原子核内，究竟蕴藏着什么样的奥秘呢？



## 第一节 走进原子核

我们已经知道，原子核的直径几乎只有原子直径的万分之一，是否这就是最小的物体了呢？在这小小的原子核内部，会不会仍然有着复杂的结构？对这些问题的深入研究，是从天然放射现象的发现开始的。

### 放射性的发现

1896年法国物理学家亨利·贝克勒尔（A. H. Becquerel, 1852—1908）发现，铀和含铀的矿物都能够发出看不见的射线，这种射线可以使包在黑纸里的照相底片感光。物质放射出射线的性质，叫做**放射性**，具有放射性的元素叫**放射性元素**。

在贝克勒尔的建议下，玛丽·居里（M. S. Curie, 1867—1934）和她的丈夫皮埃尔·居里（P. Curie, 1859—1906）对铀和各种含铀的矿石进行了深入的研究，并且发现了两种放射性更强的新元素。玛丽·居里为了纪念她的祖国波兰，把其中一种元素命名为钋（读作“pō”，元素符号是Po），另一种元素命名为镭（元素符号是Ra）。

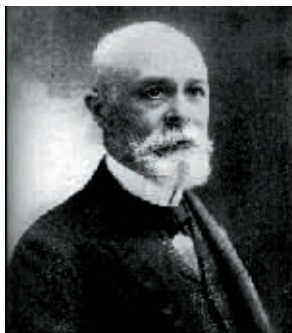


图 4-1-1  
亨利·贝克勒尔

#### 专业术语

放射性

radioactivity

放射性元素

radioactive element

天然放射性元素

natural radioactive element



图 4-1-2 居里夫妇

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



**性元素.**放射性的发现揭示了原子核结构的复杂性,从而促进了人类对微观结构更为深入的认识.

### 原子核的组成

1919年,卢瑟福用 $\alpha$ 粒子轰击氮核时,发现了一种新粒子,这种粒子带有一个单位的正电荷,其质量与氢原子的质量相近.随后人们又用类似的方法从氟、钠、铝等原子核中打出了同样的粒子,人们把这种粒子命名为**质子**,并由此可以断定,质子是原子核的组成部分.

原子核中除了质子以外,还会不会有其他粒子呢?卢瑟福提出一种猜想:如果原子核只是由质子组成,它的电荷数应该与质量数相等.而实际上绝大多数原子核的电荷数只是质量数的一半或者还少一些.

因此,原子核内应该还存在着质量跟质子差不多的不带电的中性粒子,卢瑟福把他预言的这种粒子称为**中子**.后来他的学生查德威克(J. Chadwick, 1891—1974)在研究用射线轰击铍而产生的一种能量较高、贯穿能力很强的中性粒子时,终于证实这就是卢瑟福所预言的中子.精确的测量表明,中子的质量非常接近于质子的质量,只比后者大千分之一.

发现中子以后,科学家们很快达成了共识:原子核是由中子和质子组成的,中子与质子的质量几乎相等.由于原子核的质量几乎等于单个核子质量的整数倍,我们把这个倍数叫做原子核的质量数,原子核的质量数就是核内的核子数.一个质量数为 $A$ 、电荷数为 $Z$ 的原子核包含 $Z$ 个质子和 $(A-Z)$ 个中子.组成原子核的中子和质子统称为**核子**.原子核常用符号 ${}^A_ZX$ 表示,其中 $X$ 为元素符号.

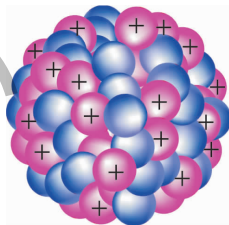


图 4-1-4 原子核示意图

#### 专业术语

质子

proton

中子

neutron

核子

nucleon

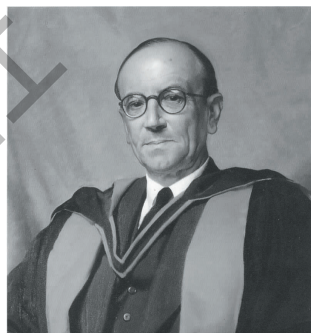


图 4-1-3 查德威克

质子用符号  $p$  表示, 其质量为  $m_p=1.6726\times 10^{-27}$  kg  
中子用符号  $n$  表示, 其质量为  $m_n=1.6749\times 10^{-27}$  kg

### 讨论与交流

阅读本节的资料活页,从中得到什么启发?在物理学中,到底是理论重要,还是实验更重要?请谈谈你的看法.



### 中子的发现

1932年1月，法国科学家约里奥·居里夫妇发现在来自钋源的 $\alpha$ 粒子的轰击下，铍会放射出很强的不带电的粒子。他们认为这种中性粒子是能量很高的光子。当他们的实验结果公布以后，卢瑟福的学生查德威克立即在剑桥的卡文迪许实验室重复了同样的实验，发现这种中性射线与 $\gamma$ 射线不同，其速度不到光速的十分之一，并通过动量守恒与能量守恒计算出其质量近似等于质子的质量，卢瑟福在1920年预言的中子终于被发现了。查德威克于1932年2月17日在《自然》杂志上发表了这一结果，并将这一中性粒子命名为中子。中子的发现，不仅使卢瑟福的原子核式模型结构近于完美，而且还使人们得到了一种不带电的“子弹”以代替 $\alpha$ 粒子，为原子的人工蜕变实验开辟了广阔的道路，并且打开了核能实际应用的大门。查德威克因此而荣获了1935年诺贝尔物理学奖。发现这一实验的约里奥·居里夫妇与诺贝尔奖失之交臂，虽然他们为这一实验拍摄了上万张胶片，付出了无数的辛苦。其失败的重要原因因为他们没有去参加卢瑟福在法国所作的关于存在中子的报告会，他们认为与其听一次学术讲演，还不如在实验室里做一次实验，因而在他们的头脑中根本没有中子的概念。不过事后约里奥·居里说：“大多数物理学家，包括我们自己在内，没有注意到这个假设。但是它一直存在于查德威克工作所在的卡文迪许实验室的空气里。因此在那儿发现了中子是合情合理的，同时也是公道的。”这也反映出他们宽广的胸怀和高尚的品质。

http://我们的网站 (physics.scnu.edu.cn/gzwl)

1. 质子和中子的发现。
2. 杨振宁谈贝克勒尔发现放射性。

#### 练习

1. 钋 209 是常用的 $\alpha$ 粒子放射源，查一查元素周期表，看看它的原子核里有几个质子和几个中子。
2.  $\alpha$ 粒子是氦原子核，它是由几个质子和几个中子组成的？
3. 用 ${}_Z^AX$ 的符号形式表示以下粒子。
  - (1) 30个质子、34个中子组成的锌原子核。
  - (2) 钾 40。
  - (3) 中子、质子。
4. 人们认识到原子核内部有复杂的结构是从什么现象开始的？为什么？

## 第二节 放射性元素的衰变

原子核的放射性现象预示着核内部有着更深层次的结构，进一步的研究首先是要确定这些放射线的本质。

### 原子核的衰变



#### 观察与思考

云室是一种探测放射线的装置。放射线进入云室后，从室内气体中飞过，可使沿途的气体分子电离，过度饱和的酒精蒸汽，会凝结在这些带有电荷的离子上，从而显示出放射线运动的轨迹。请观察云室中放射线的轨迹，并思考，为什么不同的放射线有的粗而直，有的细而弯？



甲  $\alpha$  粒子



乙  $\beta$  粒子

图 4-2-1 粒子在威耳逊云室中的径迹

#### 专业术语

衰变

decay

由于电子的质量比核子的质量小得多，衰变过程中可以近似地认为电子的质量数为零。

放射性物体放出的射线常见的有三种： $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线和 $\gamma$ 射线。 $\alpha$ 射线是高速运动的 $\alpha$ 粒子流， $\alpha$ 粒子的电荷数是2，质量数是4，实际上就是氦原子核。 $\alpha$ 粒子的速度可达光速的 $\frac{1}{10}$ ，具有很高的动能，很容易使气体电离，但因为它在碰撞时很容易损失能量，所以贯穿物体的本领很小。 $\beta$ 射线是高速运动的电子流，速度可达光速的99%，但电离作用较弱，贯穿本领较强。 $\gamma$ 射线不带电，它是频率很高的电磁波，波长很短，在 $10^{-10}$  m以下，其电离作用最小，贯穿本领却最强，甚至能穿透几厘米厚的铅板。

上述三种射线都是从原子核里放射出来的。原子核放出 $\alpha$ 粒子或 $\beta$ 粒子后，会变成新的原子核。我们把一种元素经放射过程

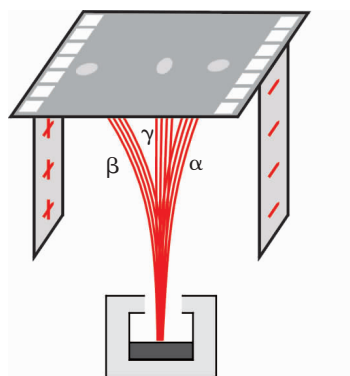


图 4-2-2 三种射线在电场中偏转

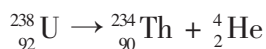
变成另一种元素的现象，称为原子核的**衰变**。

例如铀 238 的原子核放出一个  $\alpha$  粒子后，核的质量数减少 4，电荷数减少 2，成为新核，这个新核就是钍 234 原子核。这个过程就是  $\alpha$  衰变。衰变中产生的钍 234 也具有放射性，它能放出一个  $\beta$  粒子而变为镤 234。这个过程就是  $\beta$  衰变。 $\beta$  衰变后，原子核质量数不变，电荷数增加 1。

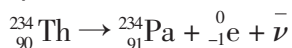
$\bar{\nu}$  代表反中微子，它是一种中性粒子，与电子相比，它的质量近似为零。

上述两个衰变过程可用衰变方程来表示。

铀 238 原子核的  $\alpha$  衰变方程为：



钍 234 原子核的  $\beta$  衰变方程为：



在这两个衰变过程中，衰变前的质量数之和等于衰变后的质量数之和；衰变前的电荷数之和也都等于衰变后的电荷数之和。大量的观察表明，原子核在发生衰变时，**电荷数和质量数总是守恒的**。

放射性的原子核在发生  $\alpha$  衰变或  $\beta$  衰变后产生的新核往往处于高能级，这时它要向低能级跃迁，并辐射  $\gamma$  光子。因此， $\gamma$  射线是伴随  $\alpha$  射线或  $\beta$  射线产生的。当放射性物质连续发生衰变时，有的原子核发生  $\alpha$  衰变，有的发生  $\beta$  衰变，如果还伴随着  $\gamma$  辐射，这时射线中就会同时具有  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  三种射线。

### 半衰期

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

#### 专业术语

半衰期

half-life

平均寿命

mean lifetime

如果用  $m_0$  表示放射性元素衰变前的质量，经过  $t$  时间后剩余的放射性元素的质量为  $m$ ，则实验表明，衰变规律可以写为：

$$m = m_0 \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \quad (4.2.1)$$

对一定量的某种放射性元素，有些核先衰变，有些核后衰变，每个核的存活时间是不一样的。放射性核素的平均存活时间称为**平均寿命**，记为  $\tau$ 。根据放射性衰减规律，半衰期与平均寿命之间的关系为：

$$T_{1/2} = 0.693 \tau$$

**例题** 碳 14 的半衰期是 5730 年。现有一份古代生物遗骸，其中碳 14 在碳原子中所占的比例只相当于现代生物中的  $\frac{1}{4}$ ，请推算生物的死亡时间。

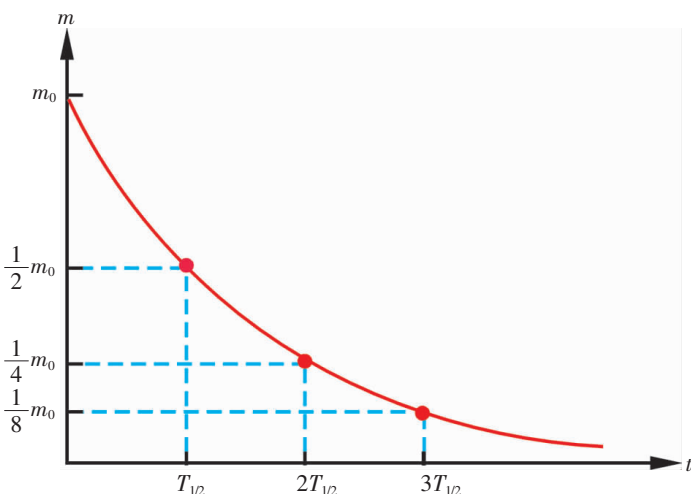


图 4-2-3 衰变曲线

**解：**生物遗骸的碳 14 在碳原子中所占的比例只相当于现代生物中的  $\frac{1}{4}$ ，说明遗骸中碳 14 经历了漫长时间的衰变，剩余的碳 14 的质量是开始时的  $\frac{1}{4}$ 。

$$\text{因此有： } m = m_0 \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} = \frac{m_0}{4}$$

$$\text{所以 } t = 2T_{1/2} = 11\,460 \text{ (年)}$$

碳 14 的半衰期非常长，人们利用它可以推算出大约 3 万年之内的事件发生的时间段。

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

放射性元素衰变的速率由核本身的因素决定，与原子所处的物理状态或化学状态无关。例如，一种放射性元素，不管它以单质存在还是以化合物的形式存在，或者对它加压，或者增高它的温度，都不能改变其半衰期。

### 讨论与交流

铀 238 的半衰期长达  $4.5 \times 10^9$  年，它的平均寿命为多少？对某一个确定的铀 238 原子核，我们能够准确预言它会在什么时候衰变吗？为什么？

 资料活页

## 考 古 钟

在考古研究中,有一种“考古钟”,它能够帮助人们确定古代遗址和古生物的年龄.当然这不是普通的钟,这种“钟”就是古生物自己.这种“钟”是这样“生产”出来的:从星际空间射来的宇宙射线在穿入地球的大气层时,其中的中子和空气中的氮核撞到了一起,这时氮核“抓住”中子不放,放出一个质子,使自己“摇身一变”成为放射性同位素碳 14.

从古到今,不管是白天或者黑夜,无论春、夏、秋、冬,宇宙射线不断地向地球辐射,因此碳 14 也就不断地产生;又因为碳 14 不稳定,它在不断地发生衰变而减少,这样一来,就使得大气中碳 14 的含量一直保持恒定.碳 14 与氧化合后生成的放射性二氧化碳在光合作用下与稳定的二氧化碳一同被植物吸收到体内,如果动物吃了植物,碳 14 就又进入到动物体内.由于碳 14 的来源没有什么变化,所以在生物体内放射性碳 14 和稳定性碳的比例保持着与大气相同的比例.一旦生物死亡,停止了与外界的交流,原来生物体内的碳 14 就得不到补充,只会因衰变而逐步减少.这时,也就是“考古钟”开始走动了.我们知道碳 14 的半衰期是 5730 年.也就是说每经过 5730 年,这个生物遗骸中的碳 14 就减少一半.于是,只要测定出生物遗骸中碳 14 的含量,就可以推算出生物死亡的时间.这就是所谓的“考古钟”,它可以推算出大约三万年之内的事件发生时间.

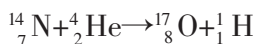
 练习

- 带电的验电器在放射线照射下电荷会很快消失,说明原因.
- 天然放射现象放出的三种射线, $\alpha$ 射线、 $\beta$ 射线和 $\gamma$ 射线,它们各自具有什么特点?
- 钋 209 是常用的 $\alpha$ 射线源,查一查元素周期表,它经过 $\alpha$ 衰变后变成什么元素?写出衰变方程.
- 碳 14 衰变后成为氮 14,此衰变过程中会放出何种射线?写出衰变方程.
- ${}_{90}^{232}\text{Th}$ (钍)经过一系列 $\alpha$ 和 $\beta$ 衰变,变成 ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ (铅),则( ).
  - 铅核比钍核少 8 个质子
  - 铅核比钍核少 16 个中子
  - 共经过 4 次 $\alpha$ 衰变和 6 次 $\beta$ 衰变
  - 共经过 6 次 $\alpha$ 衰变和 4 次 $\beta$ 衰变
- 放射性同位素 ${}_{11}^{24}\text{Na}$ 的样品经过 6 小时后还剩下 $\frac{1}{8}$ 没有衰变,求它的半衰期.

## 第三节 放射性同位素

### 核反应

除了天然放射性元素会产生自发核衰变外，还可以利用天然放射性的高速粒子或利用人工加速的粒子去轰击原子核，以产生新的原子核，这个过程叫做**核反应**。在核反应过程中，原子核的质量数和电荷数会发生变化，同时伴随着能量的释放或吸收，所放出或吸收的能量叫做**反应能**，这个过程可以用一个核反应方程来表述。例如，前面提到的卢瑟福用 $\alpha$ 粒子轰击氮核而发现了质子的反应方程可以写为：



用 $\alpha$ 粒子轰击铍从而发现了中子的核反应方程可以写为：



无论是核衰变还是核反应，方程两边总的质量数和电荷数是守恒的。



### 讨论与交流

核反应与我们学习的化学反应有什么本质的区别？

### 放射性同位素

原子核的质子数决定了核外电子的数目，核外电子的数目不同，其分布情况也不同，进而导致元素的化学性质不同。同种元素的原子，因为其质子数相同，核外电子数相同，所以有相同的化学性质，但是它们的中子数可以不同。这些具有相同质子数而中子数不同的原子，在元素周期表中处于同一位置，因而互称**同位素**。通常说的氕( ${}_{1}^{1}\text{H}$ )、氘( ${}_{1}^{2}\text{H}$ )和氚( ${}_{1}^{3}\text{H}$ )就是同位素。

1934年，约里奥·居里(F. J. Curie, 1900—1958)和伊丽芙·居里(I. J. Curie, 1897—1956)夫妇在用 $\alpha$ 粒子轰击铝箔时，除探测到预料中的中子外，还探测到了正电子。让居里夫妇感到意外的是，拿走 $\alpha$ 放射源以后，铝箔虽不再发射中子，但仍继续发射正电子，而且这种放射性随时间衰减的规律跟天然放射性一样，也有一定的半衰期。

#### 专业术语

核反应

nuclear reaction

反应能

reaction energy

#### 专业术语

同位素

isotope

正电子是物理学家在1932年发现的，它的质量与电量跟负电子相同，电性则正好相反，是带一个单位的正电荷。

## 专业术语

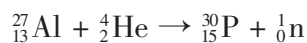
放射性同位素

radioactive isotope



图 4-3-1 约里奥·居里夫妇

原来，铝核被  $\alpha$  粒子击中后发生了下面的反应：



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



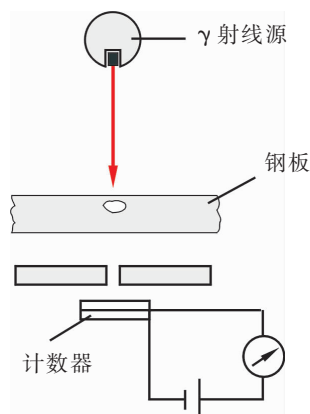
$\nu$  代表中微子，它是一种中性粒子，与电子相比，它的质量近似为零。

具有放射性的同位素，叫做**放射性同位素**。用人工方法得到放射性同位素，这是一个很重要的发现。后来用质子、氦核、中子和  $\gamma$  光子轰击原子核，也得到了各种放射性同位素。天然放射性同位素只不过六十几种，而今天人工制造的放射性同位素已达一千多种，每种元素都有了放射性同位素。放射性同位素在地质、冶金、石油工业、农业、医学、考古等领域内得到了广泛的应用。

## 放射性同位素的应用

放射性同位素的应用主要分为三类：

射线的应用：放射性辐射对物体会产生各种作用，可用来达到不同的目的。例如工业上利用  $\gamma$  射线的穿透性来检查金属内部的伤痕，即所谓无损的  $\gamma$  探伤（如图 4-3-2）。

图 4-3-2  $\gamma$  射线探伤示意图



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

农业上用剂量不大的 $\gamma$ 射线照射植物（棉花、白菜、萝卜等）的种子能使产量显著增加。利用射线还可以防治害虫。射线照射能使其幼虫失去发育能力，大剂量的照射能直接杀死害虫。射线照射还能引起生物遗传基因发生突变以培育良种。



图 4-3-3 辐射培育的鲁棉一号



图 4-3-4 辐射培育的小麦新品种

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

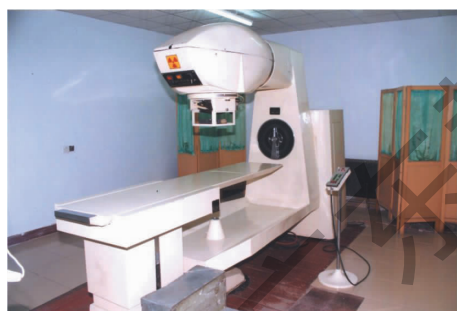


图 4-3-5 钴 60 全身肿瘤放射治疗机



图 4-3-6 伽玛辐射仪

示踪原子的应用：由于放射性元素能放出某种射线，可用探测仪器对它们进行追踪，因而可利用它们进行踪迹显示。人们把作为这种用途的放射性同位素叫做示踪原子。

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

半衰期的应用：在地质和考古工作中，利用放射性衰变的半衰期来推断地层或古代文物的年代。例如，已知铀系的最终产物是铅 206，便可根据目前岩石中铀 238 和铅 206 的含量比，由

铀的半衰期估算该地层的年龄；利用生物残骸中同位素碳 14 与碳 12 的含量比可推断生物死亡或文物的年代等等。

### 放射线的危害及防护

尽管放射线有着广泛的用途，但它对人体组织却是有伤害作用的，在使用放射性同位素时必须注意安全。近年来，随着放射性同位素及射线装置在工农业、医疗、科研等各个领域的广泛应用，放射线危害的可能性也在增大。

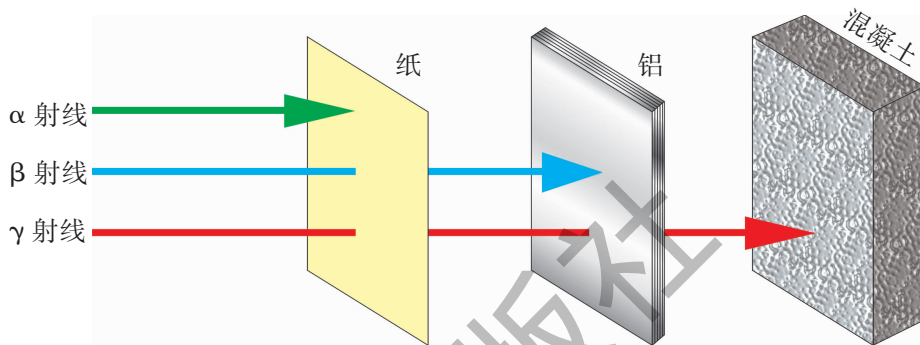


图 4-3-7 三种射线的穿透能力

$\alpha$  射线的穿透能力最弱，用一张厚纸就可以把它挡住； $\beta$  射线的穿透能力强一些，一定厚度的有机玻璃也可以把它挡住； $\gamma$  射线有着极强的穿透力，通常用铅板才可以挡住。除这三种放射线外，常见的射线还有 X 射线和中子射线，这些射线各具特定的能量，对物体具有不同的穿透能力和电离能力，从而使物体或机体发生一些物理、化学、生化变化。如果人体受到长时间大剂量的射线照射，就会使细胞、组织、器官受到损伤，破坏人体 DNA 分子结构，有时甚至会引发癌症，或者造成下一代遗传上的缺陷，过度照射时，人常常会出现头痛、四肢无力、贫血等多种症状，重者甚至死亡。

辐射防护的基本方法有时间防护、距离防护和屏蔽防护。要防止放射性物质对水源、空气、用具、工作场所的污染，要防止射线过多地长时间地照射人体。

#### 讨论与交流

你能否根据所学放射线的知识，解释一下时间防护、距离防护和屏蔽防护是什么意思？你还能提出什么样的辐射防护措施？

#### 实践与拓展

查阅资料，了解辐射防护的一般方法。与同学交流你所见过的各类辐射标志图案。

资料活页

### 1. 轧钢机钢板厚度自控原理

利用放射线的贯穿本领跟物体的厚度及密度的关系，可以用放射性同位素来检查各种产品的厚度、密封容器中的液面高度，从而自动控制生产过程。图 4-3-8 是轧钢机上钢板厚度自动控制装置原理图。让放射线穿过钢板射到探测器上，钢板的厚度发生变化时，透过钢板的射线的强度也随着变化，探测器把它转变为电信号输入到厚度指示装置和厚度控制装置，于是厚度指示装置就显示出厚度的变化，同时厚度控制装置自动地调整轧钢机上两轧辊的距离，使钢板的厚度恢复正常，从而保证钢板的厚度不超出允许误差的范围。

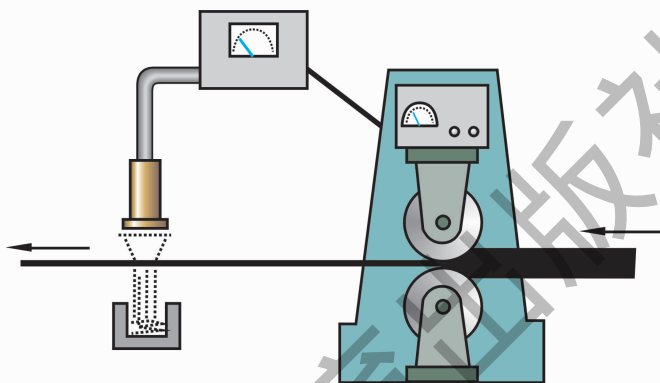


图 4-3-8 钢板厚度自动控制装置原理图

### 2. 示踪原子技术的应用

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

在农业施肥时，在肥料中加一些放射性同位素，就会知道哪种农作物在什么季节最能吸收含哪种元素的肥料。

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

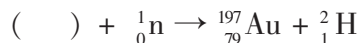
<http://physics.scnu.edu.cn/gzwl> 我们的网站

1. 放射性同位素的应用.
2. 辐射防护的基本方法.

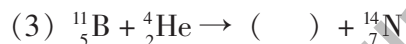
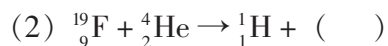


### 练习

1. 同学们，你们一定知道“点石成金”的故事，现在科学家在实验室里，用中子轰击的方法可以得到金。只是用这种方式制造金的费用高昂，除在实验室里进行实验外，是不值得去做的。通过下面的填空，你就能知道科学家是用什么来制造金的了。



2. 完成以下核反应方程：



3. 用中子轰击氮 14，产生碳 14，碳 14 具有  $\beta$  放射性，它放出一个  $\beta$  粒子后衰变成什么？写出反应方程。

广东教育出版社

## 第四节 核力与结合能

原子核的体积很小，核子在原子核里紧密地聚集在一起，而质子之间的库仑斥力很大，为什么通常原子核却是稳定的呢？

### 专业术语

核力

nuclear force

原子序数

atomic number

### 核力及其性质

组成原子核的核子之间有很强的相互作用力，使核子能够克服库仑斥力而紧密地结合在一起，这种力称为核力。从实验知道，核力是一种很强的力，在约  $0.5 \times 10^{-15} \text{ m} \sim 2 \times 10^{-15} \text{ m}$  的距离内主要表现为引力，在大于  $2 \times 10^{-15} \text{ m}$  的距离时核力就迅速减小为零，所以核力是一种短程力。在小于  $0.5 \times 10^{-15} \text{ m}$  的距离内，核力又转变为强大的斥力而使核子不融合在一起。关于核力的本质问题现在仍在深入研究中。

### 重核与轻核

原子核中的质子数又称为原子序数，这是因为它与元素周期表中元素的排列序号一致。排在周期表比较靠后的元素对应的原子核叫做重核，排在比较靠前的叫做轻核。一般排在周期表最前面的轻核的质子和中子数相等 ( $N=Z$ )。例如，氦 4 的原子核有 2 个质子和 2 个中子，硅 28 各有 14 个质子和中子。但是大多数重核是中子多于质子。例如，金 197 有 79 个质子和 118 个中子，铀 238 有 92 个质子和 146 个中子。排在 83 号元素铋之后的原子核都不稳定，它们自动分解或衰变成更轻的原子核。排在第 92 号元素铀之后的原子核十分不稳定，无法在自然状态下存在。如第 94 号元素钚是人工制造出来的，主要用于核武器，在宇宙中尚无法找到。

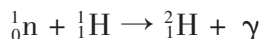
### 结合能

用高能量的  $\gamma$  光子照射氘核，可以使它分解为质子和中子，这时的核反应方程是：



实验表明，当光子能量小于 2.22 MeV 时，这个反应并不发生；只有光子的能量大于或等于 2.22 MeV 时，这个反应才会发生。相反的过程，一个中子和一个质子结合成氘核，要放出 2.22 MeV 的能量，这个能量以  $\gamma$  光子的形式辐射出去。这时的

核反应方程是：



### 讨论与交流

【提出问题】中子和质子结合成氘核会释放出能量，这部分能量是从哪里来的呢？

实验中发现，氘核的质量并不等于组成它的中子和质子质量之和。后者与前者之差称为质量亏损。那么，这部分亏损的质量又到哪里去了呢？

【猜想】亏损的质量会不会与核反应中释放出的能量有关呢？

【设计方案】在学过的知识中，明确给出质量与能量间联系的，是爱因斯坦的“质能关系”式，能否以此来验证，“亏损的质量”正好相应于反应中所释放出的能量？为此需要收集什么数据？

【分析论证】你的推测与实验测得的能量 2.22 MeV 比较如何？能否由此归纳出一个计算核反应中释放或吸收能量的一般方法？

【交流评估】发表自己的结论并评价别人的结论。

由于核子间存在着强大的核力，要把原子核拆散成核子，需要克服核力做功，也就是说需要提供一定的能量。反过来，根据能量守恒，核子结合成原子核时也会放出一定的能量。我们把这个能量叫做原子核的**结合能**。上述例子中， $\gamma$ 光子的能量，就对应氘原子核的结合能。

原子核的结合能很难直接测量，但是可以计算。通过以上讨论与交流可知，核子结合成原子核时，反应前后存在质量亏损，此亏损的质量与反应中释放的能量相对应，它们之间的关系遵循爱因斯坦的质能方程，为

$$\Delta E = \Delta mc^2 \quad (4.4.1)$$

式中  $\Delta E$  为反应中释放的能量，即结合能， $\Delta m$  为质量亏损。

原子核的结合能与核子数之比称为该原子核的平均结合能，它反映了一个原子核结合的紧密程度，平均结合能越大，核越稳定。图 4-4-1 给出了平均结合能随质量数  $A$  的变化情况。

#### 专业术语

质量亏损

mass defect

一个质子的质量为 1.0072765 u，一个中子的质量为 1.0086649 u，氘核质量为 2.013553 u，其中 u 为原子质量单位。

$1 \text{ u} = 1.6605655 \times 10^{-27} \text{ kg}$

#### 专业术语

结合能

binding energy

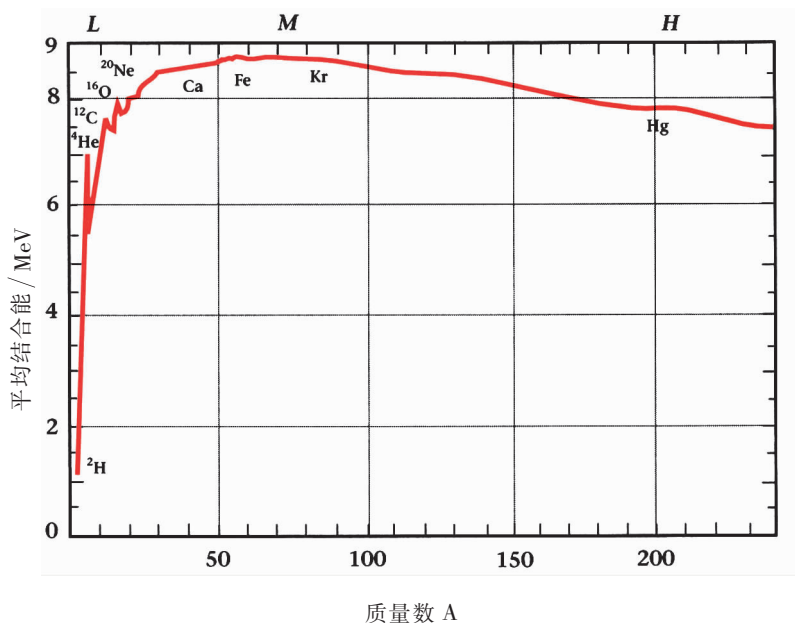


图 4-4-1 核平均结合能随质量数的变化

练习

1. 试用  $\Delta E = \Delta mc^2$  证明质量亏损 1 u 相当于释放 931 MeV 的能量.
2.  $^{12}\text{C}$  原子的质量是 12.000000 u, 可以看做是由 6 个氢原子 (质量是 1.007825 u) 和 6 个中子组成的, 求碳原子核的结合能. (在计算中可以用碳原子的质量代替碳原子核的质量, 用氢原子的质量代替质子的质量, 因为电子的质量可以在相减过程中消去.)
3. 如果要把  $^{16}_8\text{O}$  分成 8 个质子和 8 个中子, 要给它多少能量? 要把它分成 4 个  $^4_2\text{He}$ , 要给它多少能量? 已知  $^{16}_8\text{O}$  的核子平均结合能是 7.98 MeV,  $^4_2\text{He}$  的核子平均结合能是 7.07 MeV.

## 第五节 裂变和聚变

### 专业术语

核聚变

nuclear fusion

核裂变

nuclear fission

由上节的图 4-4-1 中可见, 平均结合能曲线在中等质量 ( $A=56$ , Fe 元素) 处有极大值. 这意味着比铁轻的两个轻核聚合成一个较重的核时, 会释放出能量来, 我们把这种核反应叫做**核聚变**. 同样地, 比铁重的一个核分裂成两个较轻的核时, 也会释放出能量, 我们把这种核反应叫做**核裂变**.

### 讨论与交流

能否根据图 4-4-1 解释, 为什么轻核聚变和重核裂变都会释放出能量?

### 核裂变与链式反应

### 专业术语

链式反应

chain reaction

单一个核裂变所产生的能量, 与日常生活耗能相比, 是微不足道的. 为了使裂变产生的能量可以被利用, 必须让一个核的裂变能够引发一个或一个以上的核发生裂变, 让核裂变过程自己持续下去, 源源不断地将核能释放出来 (如图 4-5-1). 这样的核反应叫做**链式反应**.

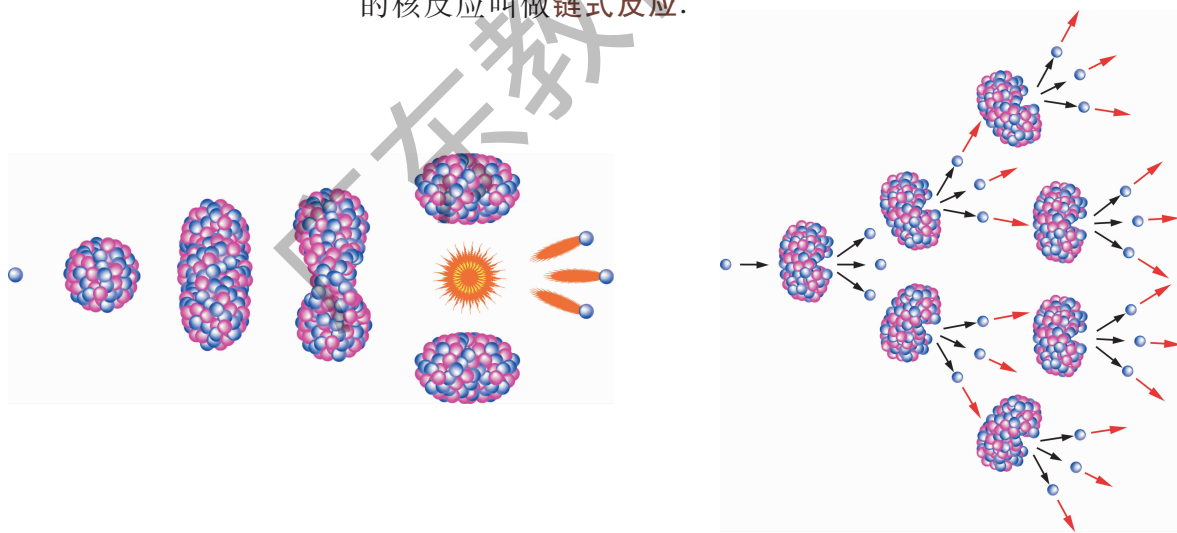


图 4-5-1 链式反应

产生链式反应需要一定的条件. 重核裂变的一个典型例子是铀核裂变, 其反应方程如下:



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



在天然铀中，主要有两种同位素，其中 99.3% 是铀 238，0.7% 是铀 235。这两种铀跟中子的作用很不相同。铀 235 俘获各种能量的中子都会发生裂变，而且俘获能量低的中子发生裂变的几率较大。铀 238 只有俘获能量大于 1 MeV 的中子才可能发生裂变，并且几率很小。它俘获能量低于 1 MeV 的中子时不发生裂变，而变成铀 239。能量低于 1 MeV 的中子跟铀 238 基本上只发生弹性碰撞，不引起核反应。因此，为了使裂变的链式反应容易发生，最好是利用纯铀 235。

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



图 4-5-2 铀矿

无论是核聚变还是核裂变，其反应过程中所产生的能量，都可以为人类所利用。下面先介绍核聚变能量的利用，在下一节中，再介绍核裂变能量的利用。

### 受控热核反应

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



该过程释放出 17.6 MeV 的结合能，聚变时每个核子平均释放的结合能要比重核裂变时每个核子平均释放的结合能甚至还要大得多。

要使核发生聚变，必须使它们接近到  $10^{-15}$  m，也就是接近到核力能够发生作用的范围。由于原子核都是带正电的，要使它

们接近到这种程度，必须克服电荷之间强大的斥力。这就要使核具有很大的动能。

用什么办法能使大量的轻核获得足够的动能来产生聚变呢？有一种办法，就是把它们加热到很高的温度。从理论分析知道，物质达到几百万度以上的高温时，原子的核外电子已经完全和原子脱离，这时小部分原子核就具有足够的动能，能够克服相互间的库仑斥力，在互相碰撞中接近到可以发生聚变的程度。因此，这种反应又叫做**热核反应**。

#### 专业术语

热核反应

thermonuclear reaction

热核反应在宇宙中是很普遍的现象。在太阳内部和许多恒星内部，温度都高达1千万摄氏度以上，在那里热核反应激烈地进行着。太阳每秒钟辐射出来的能量约为 $3.8 \times 10^{26}$  J，就是通过热核反应产生的。地球只接受了其中的二十亿分之一，就使地面温暖，产生风云雨露，河川流动，万物生长。

#### 专业术语

受控热核反应

controlled thermonuclear reaction

人工的热核反应可以通过原子弹爆炸时产生的高温来达到。氢弹就是这样制成的。如果要使巨大的热核反应能量不是以爆炸的形式释放，而是在人工控制下逐渐地释放出来并加以利用（例如发电），这称为**受控热核反应**。要实现受控热核反应，首先要把热核燃料加热到非常高的温度，才能使它们发生聚变反应；其次要使聚变反应维持下去并能加以控制以提供可用的能量，还必须使热核反应释放的能量足以补偿形成聚变过程中所损失的能量，这个条件称为“点火”条件。受控热核反应是一项尖端研究课题，受到各国的普遍重视，当前发展极为迅速。



#### 资料活页

##### 受控热核反应的发展前景

受控热核反应是一门新兴的学科。由于工农业生产的发展，能源的需要急剧上升。据统计，世界能源的需要每八年翻一番。受控热核反应是核能利用的第二条途径，有可能是一个新的廉价的巨大能源，因此这门学科受到许多国家的重视，发展极为迅速。

随着科学技术的不断发展，提出了许多新的实现受控热核反应的途径和方案。从目前情况看，实现受控热核反应，建立热核反应堆，可以直接作为社会生产的动力资源，解决人类未来的能源问题，将要遇到困难还很大，但它诱人的前景毕竟令人向往，因此它至今仍是世界各国最为关心的尖端课题。

<http://physics.scnu.edu.cn/gzwl> 我们的网站

1. 人造“太阳”。
2. 如何根据原子核的质量判断它的稳定性？



## 练习

1. 太阳辐射能量主要来自太阳内部的 ( ).  
A. 化学反应      B. 放射性衰变  
C. 裂变反应      D. 聚变反应
2. 在某些恒星内部, 3 个  $\alpha$  粒子结合成一个  $^{12}_6\text{C}$  核,  $^{12}_6\text{C}$  的质量是 12.000000 u,  $^4_2\text{He}$  的质量是 4.001509 u. 写出这个核反应方程, 并计算这个反应中释放的能量.
3. 有关太阳内的热核反应, 有一种理论认为其中有碳 13 和质子结合生成氮 14, 产生  $\gamma$  射线. 在这一过程中释放了多大的结合能? (碳 13 和氮 14 的原子质量分别为 13.003355 u 和 14.003074 u)

广东教育出版社

## 第六节 核能利用

受控热核反应是人类对核聚变能量的利用，而核反应堆的建造，则是人类对核裂变能量的利用。

### 反应堆

原子弹爆炸时链式反应的速度是无法控制的，为了用人工方法控制链式反应的速度，使核能比较平缓地释放出来，人们制成了核反应堆。核反应堆是人工控制链式反应的装置。

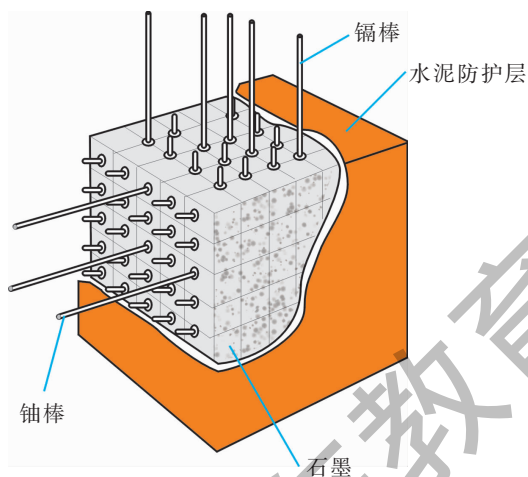


图 4-6-1 核反应堆的示意图



图 4-6-2 核反应堆

图 4-6-1 是核反应堆的示意图。反应堆里用的铀棒是天然铀或浓缩铀（其中铀 235 的含量约为 3%）。由于裂变产生的是速度很高的快中子，很容易被铀 238 俘获而不发生裂变，所以必须设法使中子在碰上铀 238 前降低速度。为此在铀棒的周围放上原子量比较小又不吸收或很少吸收中子的物体，如石墨、重水，快中子跟这些物体的原子核碰撞后，能量减小，变成慢中子。这种用来使中子减速的物体叫做减速剂。慢中子碰到铀 238 时会弹射回来，却容易被铀 235 俘获而引起裂变。为了调节中子数目以控制反应速度，还需要在铀棒之间插进一些镉棒。镉吸收中子的能力很强，当反应过于激烈时，使镉棒插入深一些，让它多吸收一些中子，链式反应的速度就会慢一些；当反应过于缓慢，达不到所需功率时，使镉棒插入浅一些，让它少吸收一些中子，链式反应速度就可以增大。这种镉棒叫做控制棒。用电子仪器自动地调节控制棒的升降，就能使反应堆保持一定的功率安全地工作。

反应堆工作时，核燃料裂变释放出的核能转变为热能，使反应堆的温度升高。为了控制反应堆的温度，使它能正常工作，需要用水、液体金属钠等流体作冷却剂，在反应堆内外循环流动，不断地带走热能。这就是反应堆的冷却系统，它同时可以用来输出热能以作他用。

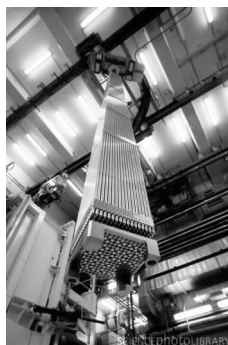


图 4-6-3 核燃料

为了防止铀核裂变物放出的各种射线对人体的危害，在反应堆的外面需要修建很厚的水泥防护层，用来屏蔽射线，不让它们透射出来，对放射性的废料，也要装入特制的容器，埋入深地层来处理。

### 核电站 核能利用

利用反应堆工作时释放出的热能使水汽化以推动汽轮发电机发电，这就是核电站。图 4-6-4 是核电站示意图。核电站消耗的“燃料”很少。一座一百万千瓦的核电站，每年只消耗 30 吨浓缩铀，而同样功率的火力发电站，每年却要消耗 250 万吨煤。目前，核能发电的经济效益跟火电站大体相同。到 20 世纪末，核发电已占世界发电总量的 30%。为了适应我国现代化建设对能源日益增长的需要，我国已于广东大亚湾建成两座核电站，还有浙江的秦山核电站。另外，把反应堆小型化，可以使核能作为

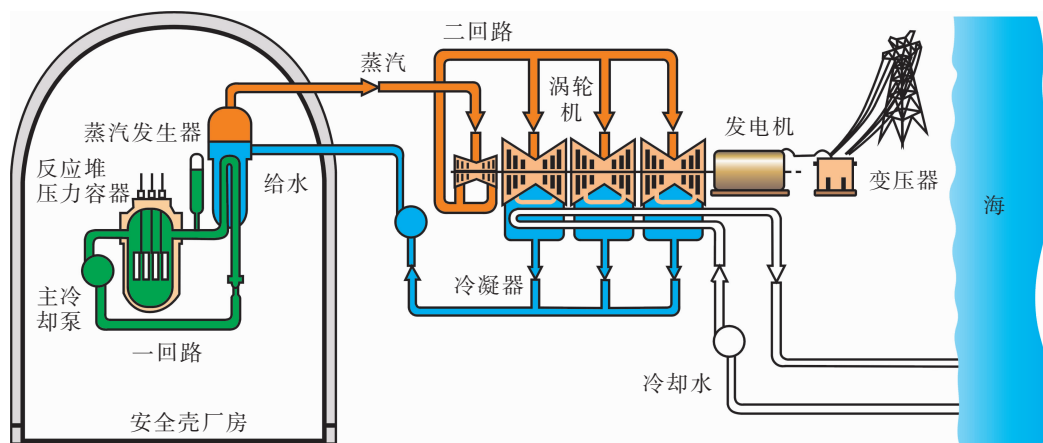


图 4-6-4 核电站示意图

动力，制造核动力潜艇、核动力破冰船和核动力航空母舰，在某些动力装置上也有利用的可能。

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



图 4-6-5 我国海军的核动力潜艇



图 4-6-6 我国自行设计与建设中的岭澳核电站

### 讨论与交流

权衡利弊，人类是否应该发展核技术？有人说，真正的科学家只需关注科学本身，至于科学技术对社会的影响，应留给社会学家去关心，你同意这种说法吗？

### 实践与拓展

1. 查阅资料，尝试写一篇介绍中国核技术发展历程的短文。
2. 在老师的指导下参观大亚湾核电站。

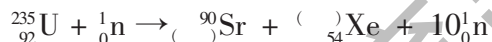
 资料活页

## 增殖反应堆

利用原子能反应堆还可以生产新的核燃料. 从实验知道, 快中子被铀 238 俘获后, 变成铀 239, 铀 239 是不稳定的, 经过两次  $\beta$  衰变后变成钚 239. 钚 239 与中子作用后, 经过两次  $\beta$  衰变后变成铀 233. 钚 239 和铀 233 的性质跟铀 235 一样, 很容易俘获中子而发生裂变, 因此也可以作为供裂变的核燃料. 因此, 如果在反应堆中装入铀 238 或钚 239, 并设法使每一次核裂变能够产生一个以上的钚 239 或铀 233, 那么, 我们就可以使新产生的核燃料多于消耗的核燃料, 使铀 238 和钚 239 也可以得到利用, 这种反应堆叫做增殖反应堆. 地球上的铀 238 和钚 239 的总量大约是铀 235 的 800 倍. 建造增殖反应堆可以利用铀 238 和钚 239, 更有效地利用核资源. 增殖反应堆虽然处于试验阶段, 但从长远来看是很有前途的.

 练习

1. 核反应堆中的“燃料”是  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , 且



是其中的一个核反应, 填写括号中的数值.

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

3. 一座 100 万千瓦的火力发电站, 每年要消耗多少吨标准煤? (已知标准煤单位质量 (1 kg) 完全燃烧所放出的热量为  $3.08 \times 10^7 \text{ J}$ )

4. 在原子核反应堆中, 用什么方法控制核裂变的速率?

5. 为了防止铀核裂变产物放出的各种射线对人体的危害和对环境的污染, 需采取哪些措施? (举两种)

## 第七节 小粒子与大宇宙

当你学完本节的内容之后，即将结束整个高中物理的学习。回首过去，从宏观中机械运动的描述及牛顿定律开始，历经电磁场理论、热力学定律、相对论，直至深入微观粒子的相互作用等一系列客观规律的探究与描述，现今展望未来，你是否会对物质世界的另一头，那浩渺、深邃、神秘的茫茫宇宙产生一股探究的激情？宇宙究竟有多大？它的年龄又是多少呢？



图 4-7-1 神秘的宇宙

### 从小粒子到大宇宙——空间跨度

#### 专业术语

脉冲星

pulsar

超新星

supernova

黑洞

black hole

人类目前能够观测到的最大距离约为 140 亿光年之远，这 140 亿光年可以看成是目前观测到的宇宙的半径。大家知道，地球是太阳系里的行星，太阳系又是银河系的一员，而银河系就是一个星系，它集中了至少 1000 亿颗以上的恒星。我们观测到的宇宙中约有 30 亿个星系和无数星际物体，而它们在宇宙中就像是散落在大海中的一把沙子。

对宇宙的时空结构、运动形态和物质演化的理论描述，称为宇宙模型。在各种宇宙模型中，大爆炸宇宙模型是一种被普遍接受的模型，也得到了不少观测事实的支持。它认为，宇宙起源于大约 150 亿年前突然发生的一次大爆炸，其后逐渐诞生出恒星、星团、脉冲星、超新星、黑洞以及被称作类星体的遥远发光体等等，经历 150 亿年才演化成今天的样子。

在宇宙大爆炸的开始，有的只是极高温的热辐射和其中隐现的高能粒子，从这小小的粒子，直至我们目前所探测到的宇宙的半径，人类目前所能研究的物质世界的空间尺度，约从  $10^{-15}$  m 到  $10^{27}$  m，共跨越了大约 42 个数量级。



从粒子寿命到宇宙年龄——时间跨度

从宇宙大爆炸到现在，以秒为单位，宇宙年龄的数量级约为  $10^{18}$  s，可以说是物质世界中最长的年龄。那么最短的寿命又是多少呢？

上个世纪以来，人们先后陆续发现了众多的粒子。在常见的粒子中，质子、电子、光子等是稳定的粒子，其余的绝大多数基本粒子都是不稳定的，在很短时间内就发生衰变。例如，带正电或负电的  $\pi$  介子的平均寿命约为  $2.6 \times 10^{-8}$  s，它衰变为  $\mu$  子， $\mu$  子也是不稳定的，平均寿命约为  $2.2 \times 10^{-6}$  s；不带电荷的中性  $\pi$  介子的平均寿命更短，只有  $10^{-16}$  s。目前所知的微观粒子中，寿命最短的只有  $10^{-25}$  s。可见，物质世界的时间尺度，约从  $10^{-25}$  s 到  $10^{18}$  s，也跨越了将近 43 个数量级。

人类总是在努力感知自身的存在。很早以前，人们便试图用宗教、神话和哲学来推测宇宙的起源和演变。如今，科学已承担了合理解释宇宙的任务。同时，物理学家希望从宇宙演化的观测中获得信息和证据来验证极高能量下的粒子理论。这样，物理学中研究最大对象和最小对象的两个分支——宇宙学和粒子物理学就奇妙地衔接在一起，犹如一条巨蟒咬住了自己的尾巴。

专业术语

$\mu$  子

muon

$\pi$  介子

pion

好美！人类所在物质世界的空间跨度与时间跨度，竟呈现出如此的对称美！

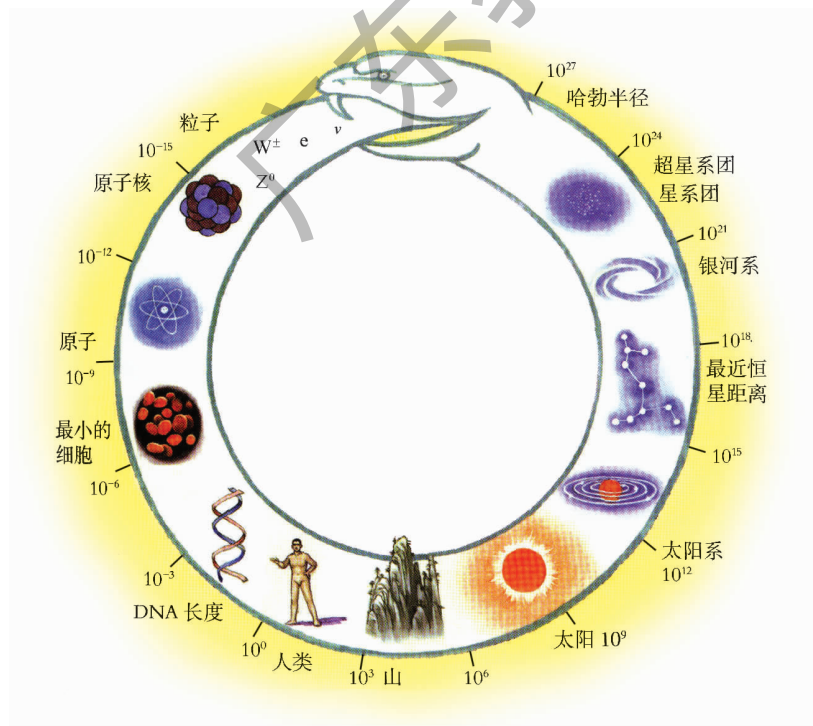


图 4-7-2 宇宙的空间跨度

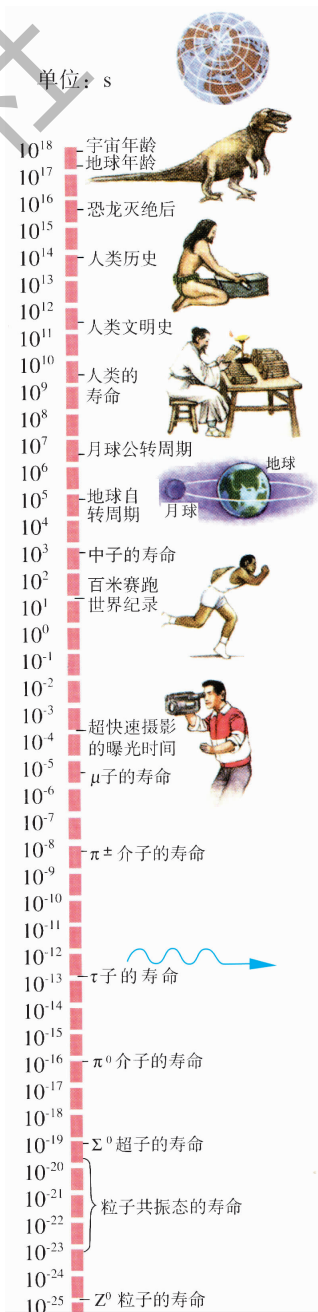


图 4-7-3 宇宙的时间跨度

 讨论与交流

物理学是一幅很大的画，要看懂这幅画，需要有两种能力。一种能力是要能够走近看，因为这幅画画得非常精细；另一种能力是要能够走远看，因为这幅画有着整体结构的美。作为高中物理学习的总结，你能否从“远处”着眼，对你看过的这幅画，作一个简单的描述？

 资料活页

### 粒子物理学简介

粒子物理学是研究比原子核更深层次的微观世界中物体的结构、性质，和在很高能量下这些物体相互转化及其产生原因和规律的物理学分支。又称高能物理学。

现在发现的基本粒子已达几百种。按照基本粒子之间的相互作用，可以把它们分为三类：

1. 强子：核子之间的核力是一种比电磁作用大得多的相互作用，叫做强相互作用。凡是参与强相互作用的粒子，都叫做强子。目前发现的基本粒子，绝大多数是强子，质子是最早发现的强子。强子又分重子（中子、质子、超子）和介子两类。

2. 轻子：都不参与强相互作用，只发现几种。电子是最早发现的轻子， $\mu$ 子从它的许多性质来看属于轻子，1975年又发现了一种质量很大的轻子，称为 $\tau$ 子，也叫做重轻子。

3. 媒介子：是传递粒子间相互作用的粒子，例如光子就是其中的一种，是传递电磁相互作用的。

粒子物理学的发展大致经历三个阶段。

第一阶段（1897—1937）。1897年发现第一个基本粒子电子，随后，质子、中子、电子、光子、中微子和正电子等都被认为是基本粒子或亚原子粒子。在此阶段，随着原子核物理的发展，发现在相当于原子核大小的范围内，还存在比电磁作用更强的强相互作用和介于电磁作用和引力作用之间的弱相互作用，前者是核子结合成核的核力，后者引起原子核的 $\beta$ 衰变。对于核力的研究认识到核力是通过交换介子而产生的。

第二阶段（1937—1964）。在此阶段先后陆续发现了众多的粒子。

1937年发现 $\mu$ 子，1947年发现 $\pm\pi$ 介子和奇异粒子，1950年发现 $\pi_0$ 介子，20世纪50年代粒子加速器和各种粒子探测器有了很大发展，从而开始了用加速器研究并大量发现基本粒子的新时期。这一阶段理论上最重要的进展之一是相互作用中对称性的研究，对称性与守恒定律联系在一起，关于相互作用中对称性的研究，最为重要的结果是1956年李政道、杨振宁提出弱作用下对称不守恒，1957年被吴健雄等人的实验及其他实验证实。这些研究推动弱作用理论的进展。

第三阶段 (1964 至今). 此阶段以提出强子结构的夸克模型为标志. 强子由夸克构成, 夸克共有上夸克  $u$ 、下夸克  $d$  和奇异夸克  $s$  三种. 夸克模型可以说明当时已发现的各种强子. 夸克模型得到后来进行的高能电子、高能中微子对质子和中子的深度非弹性散射实验的支持, 实验显示出质子和中子内部存在点状结构, 这些点状结构可以认为是夸克存在的证据. 1974 年发现  $J/\psi$  粒子, 其独特性质必须引入一种新的粲夸克  $c$ , 1979 年发现另外一种独特的新粒子  $Y$ , 必须引入第 5 种夸克, 称为底夸克  $b$ . 迄今的实验尚未发现轻子有内部结构. 人们相信轻子是与夸克属于同一层次的粒子. 轻子与夸克的对称性意味着存在第 6 种顶夸克  $t$ . 1994 年 4 月 26 日, 美国费米国家实验室宣布已找到顶夸克存在的证据. 这一阶段理论上最重要的进展是建立电弱统一理论和强相互作用研究的进展.

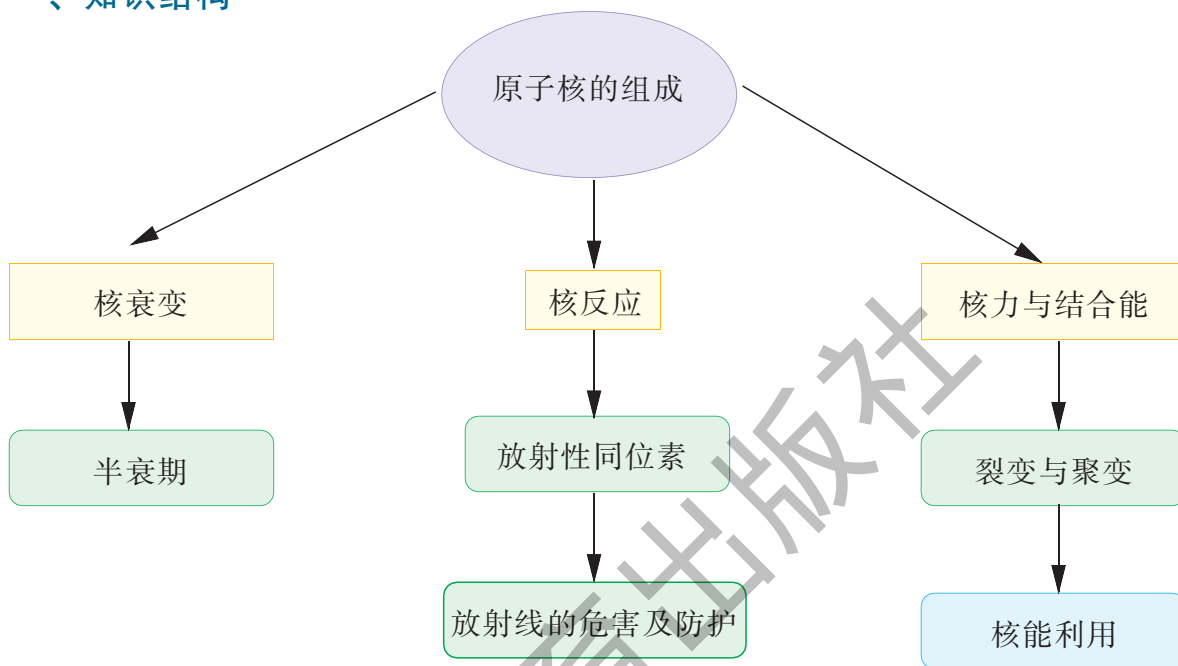
在粒子物理学的深层次探索活动中, 粒子加速器、探测手段、数据记录和处理以及计算技术的应用不断发展, 既带来粒子物理本身的进展, 也促进整个科学技术的发展; 粒子物理所取得的丰硕成果已经在宇宙演化的研究中起着重要的作用.

<http://physics.scnu.edu.cn/gzwl> 我们的网站

1. “寻找宇宙中的基本粒子” —— 丁肇中在上海交大的报告.
2. 基本粒子分类简表.
3. 物质真的是无限可分的吗?

## 本章小结

### 一、知识结构



### 二、回顾与评价

我在本章学习中所接触到的物理学研究方法有：\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

我在本章学习中拜会了哪些物理学家？有何收获？\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

我通过认识核能的利用，对科学技术与社会的关系有以下的思考：\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

我在本章学习中遇到的较大困难有：\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

我还想说：\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

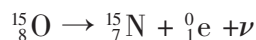
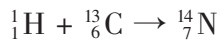
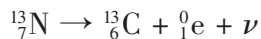
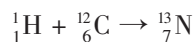
\_\_\_\_\_

## 习 题 四

- 天然放射现象的发现揭示了 ( ).
  - 原子不可再分
  - 原子的核式结构
  - 原子核还可再分
  - 原子核由质子和中子组成
- 用哪种方法可以减缓放射性元素的衰变速率? ( ).
  - 把该元素放在低温阴凉处
  - 把该元素密封在很厚的铅盒子里
  - 把该元素同其他的稳定元素结合成化合物
  - 上述各种方法都无法减缓放射性元素的衰变速率
- 关于核衰变和核反应的类型, 下列表述正确的是 ( ).
  - ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$  是  $\alpha$  衰变
  - ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$  是  $\beta$  衰变
  - ${}^2_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$  是轻核聚变
  - ${}^{82}_{34}\text{Se} \rightarrow {}^{82}_{36}\text{Kr} + 2 {}^0_{-1}\text{e}$  是重核裂变
- 氦 222 放在天平的左盘时, 需在天平的右盘加 444 g 砝码, 天平才能处于平衡状态, 氦 222 发生  $\alpha$  衰变, 经过一个半衰期以后, 欲使天平再次平衡, 应从右盘中取出的砝码为 ( ).
  - 220 g
  - 8 g
  - 2 g
  - 4 g
- 我国科学家在 1965 年 9 月首先用人工方法合成了牛胰岛素. 为了证明人工合成的牛胰岛素与天然的是否为同一物质, 在人工合成牛胰岛素的过程中掺入了放射性碳 14, 然后将人工合成的牛胰岛素与天然的混合, 得到了放射性碳 14 分布均匀的结晶物, 从而证明了两者的都是同一物质, 为我国在国际上首先合成具有生物活性牛胰岛素提供了有力的证据. 在人工合成过程中掺入放射性碳 14 的目的是 ( ).
  - 催化剂
  - 氧化剂
  - 还原剂
  - 示踪原子
- 目前普遍认为, 质子和中子都是被称为 u 夸克和 d 夸克的两类夸克组成. u 夸克的带电量为  $\frac{2e}{3}$ , d 夸克带电量为  $-\frac{e}{3}$ , e 为元电荷. 下列论断中可能正确的是 ( ).
  - 质子由 1 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
  - 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
  - 质子由 1 个 u 夸克和 2 个 d 夸克组成, 中子由 2 个 u 夸克和 1 个 d 夸克组成
  - 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 1 个 d 夸克组成
- 活着的有机体中, 碳 14 对碳 12 的比与大气中是相同的, 约为  $1:7.7 \times 10^{11}$ . 有机体死亡后, 由于碳 14 的  $\beta$  衰变, 其含量就不断减少. 因此, 考古人员测量出土古生物体遗骸中每克碳中现有的碳 14 含量, 就可以根据碳 14 的半衰期 ( $T_{1/2}=5730$  年) 推知该生物体的死亡年代. 现测知某一古墓中 1 g 碳中所含碳 14 为  $1.04 \times 10^{-12}$  g, 试确定墓主的死亡年代.
- 在反应堆中, 铀 238 吸收快中子后变成铀 239, 铀 239 经过两次  $\beta$  衰变生成钷

239(Pu), 钷 239 也是一种核燃料, 试写出上述各反应的方程.

9. 如下一系列核反应是在恒星内部发生的,



其中  ${}^1_1\text{H}$  为质子,  ${}^4_2\text{He}$  为  $\alpha$  粒子,  ${}^0_1\text{e}$  为正电子,  $\nu$  为中微子. 已知质子的质量为  $m_p = 1.672648 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $\alpha$  粒子的质量为  $m_\alpha = 6.644929 \times 10^{-27} \text{ kg}$ , 正电子的质量为  $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ , 中微子的质量可忽略不计, 真空中的光速  $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$ . 试计算该系列核反应完成后释放的能量.

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

11. 铀 238 的半衰期是  $4.5 \times 10^9$  年, 假如一块矿石中含有 1 kg 铀 238, 经 45 亿年后还剩多少铀 238? 假设发生衰变的铀 238 都变成了铅 206, 矿石中含有多少铅? 这时铀铅比例是多少? 写出矿石中铀、铅比例随时间变化的一般关系式, 并说明能否根据这种铀铅比例判断出矿石的年龄.

广东教育出版社



绿色印刷产品

批准文号：粤发改价格 [2015] 362号 举报电话：12358

ISBN 978-7-5406-5888-5



9 787540 658885 >

定价：7.65元