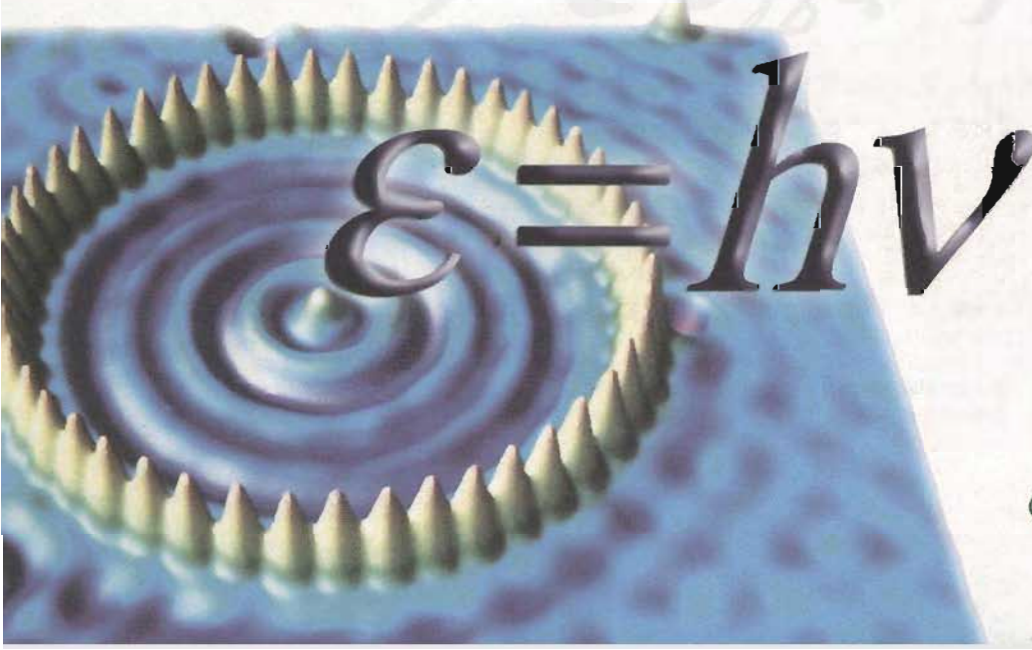


普通高中课程标准实验教科书

物理

选修 3-5

人民教育出版社 课程教材研究所 编著
物理课程教材研究开发中心


$$\varepsilon = h\nu$$

 人民教育出版社

总主编：张大昌
副总主编：彭前程
主 编：张维善
执笔人员：苗元秀 孙 新 唐果南 张维善
绘 图：王凌波 张 良
责任编辑：谷雅慧 苗元秀
版式设计：马迎莺
审 读：王存志

普通高中课程标准实验教科书 物理 选修3-5

人民教育出版社 课程教材研究所 编著
物理课程教材研究开发中心

出版发行 人民教育出版社

(北京市海淀区中关村南大街17号院1号楼 邮编：100081)

网 址 <http://www.pep.com.cn>

经 销 全国新华书店

印 刷 山东德州新华印务有限责任公司

版 次 2010年4月第3版

印 次 2019年7月第41次印刷

开 本 890毫米×1240毫米 1/16

印 张 6.5

字 数 135千字

书 号 ISBN 978-7-107-18611-0

定 价 7.70元

价格依据文件号：京发改规[2016]13号

版权所有·未经许可不得采用任何方式擅自复制或使本产品任何部分·违者必究

如发现内容质量问题，请登录中小学教材意见反馈平台：jcyjfk.pep.com.cn

如发现印、装质量问题，影响阅读，请与本社联系。电话：400-810-5788

绿色印刷 保护环境 爱护健康

亲爱的同学们：

你们手中的这本教科书采用绿色印刷标准印制，在它的封底印有“绿色印刷产品”标志。从2013年秋季学期起，北京地区出版并使用的义务教育阶段中小学教科书全部采用绿色印刷。

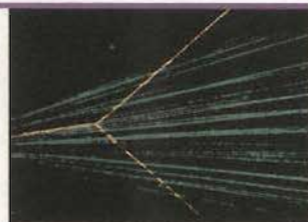
按照国家环境标准（HJ2503-2011）《环境标志产品技术要求 印刷 第一部分：平版印刷》，绿色印刷选用环保型纸张、油墨、胶水等原辅材料，生产过程注重节能减排，印刷产品符合人体健康要求。

让我们携起手来，支持绿色印刷，选择绿色印刷产品，共同关爱环境，一起健康成长！

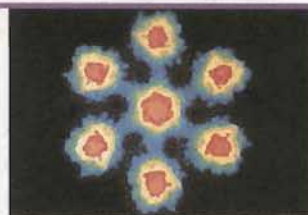
北京市绿色印刷工程

目 录

第十六章 动量守恒定律	1
1 实验:探究碰撞中的不变量	2
2 动量和动量定理	6
3 动量守恒定律	12
4 碰撞	17
5 反冲运动 火箭	22



第十七章 波粒二象性	26
1 能量量子化	27
2 光的粒子性	30
3 粒子的波动性	37
4 概率波	40
5 不确定性关系	42



第十八章 原子结构	46
1 电子的发现	47
2 原子的核式结构模型	51
3 氢原子光谱	54
4 玻尔的原子模型	57



第十九章 原子核	64
1 原子核的组成	65
2 放射性元素的衰变	70
3 探测射线的方法	73
4 放射性的应用与防护	76
5 核力与结合能	79
6 核裂变	83
7 核聚变	88
8 粒子和宇宙	91



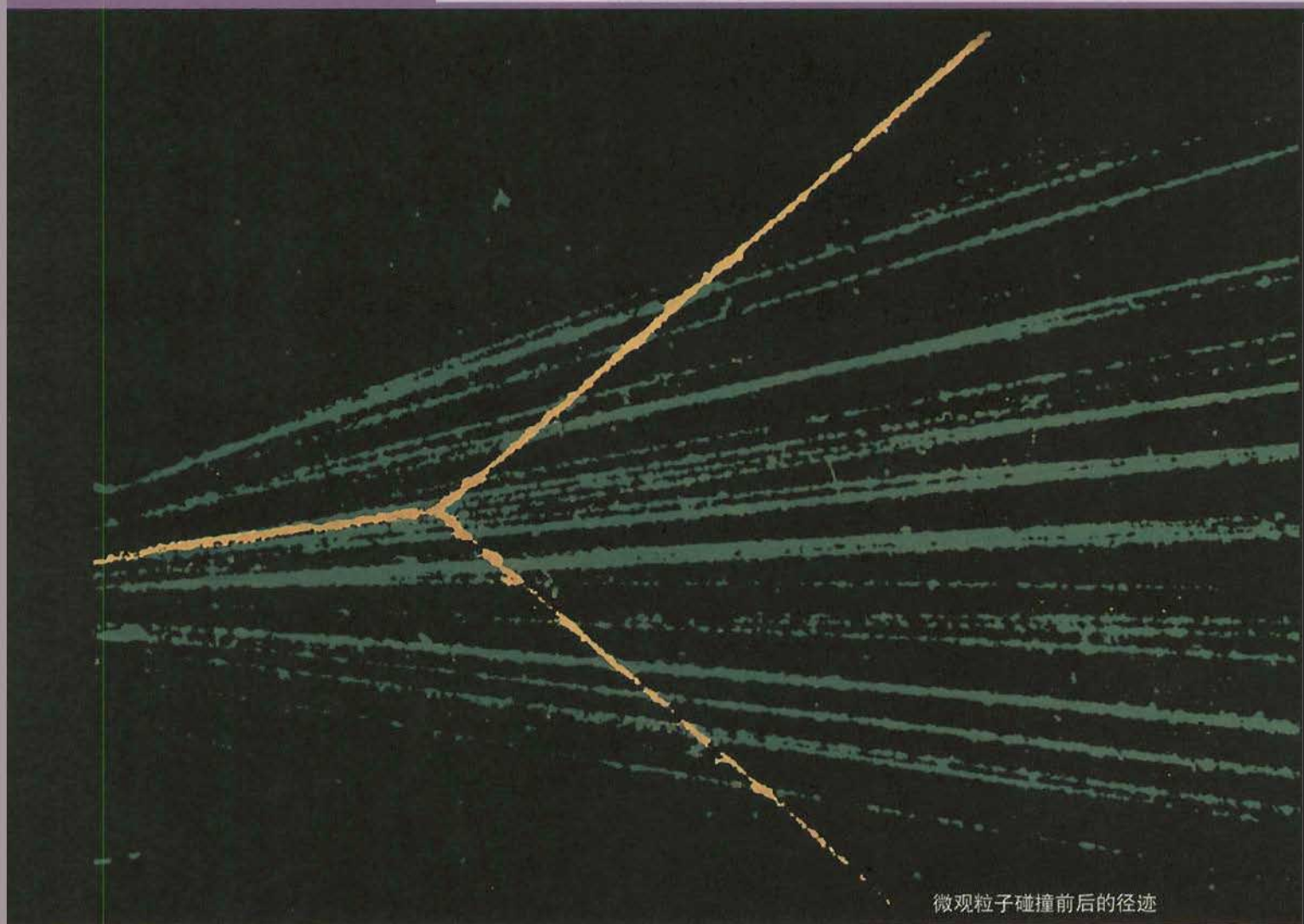
课题研究	95
-------------	----

想像远比知识重要，知识有涯，而想像能
环抱整个世界。

——爱因斯坦

第十六章

动量守恒定律



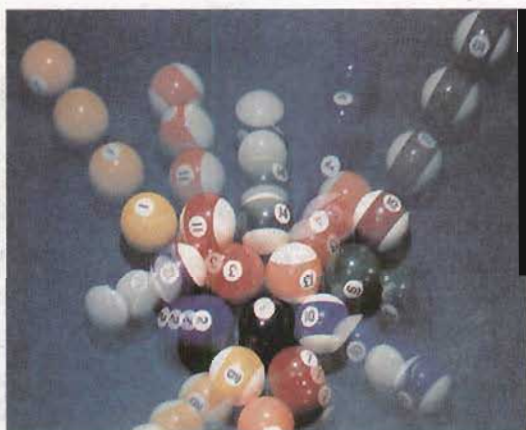
微观粒子碰撞前后的径迹

台球的碰撞、火箭的起飞、微观粒子的散射，这些运动似乎有天壤之别。然而，物理学的研究表明，它们遵从相同的科学规律——动量守恒定律。动量守恒定律是自然界中最普遍的规律之一，无论是设计火箭还是研究微观粒子，都离不开它。

1

实验：探究碰撞中的不变量

碰撞是自然界中常见的现象。两节火车车厢之间的挂钩靠碰撞连接，台球由于碰撞而改变运动状态，微观粒子之间更是由于相互碰撞而改变能量甚至使得一种粒子转化为其他粒子。



台球碰撞的频闪照片

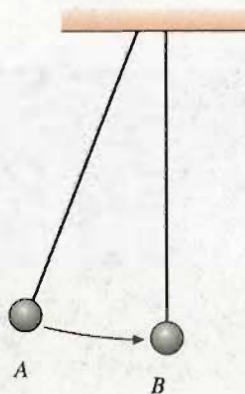


图 16.1-1 观察两球的碰撞

演示

如图16.1-1， A 、 B 是两个用等长细线悬挂起来的相同钢球。使 B 球静止，拉起 A 球，放开后 A 与 B 碰撞，观察碰撞前后两球运动的变化。

换成质量相差较多的两个小球，重做以上实验。

两个物体碰撞前后的速度都会发生变化，物体的质量不同时速度变化的情况也不一样。那么，碰撞前后会不会有什么物理量保持不变？

下面通过实验研究这个问题。

物理学家始终在寻求自然界万物运动的规律，其中包括在多变的世界里找出某些不变性。在《物理必修2》的第七章中我们曾经经历过这样的探究过程。

实验的基本思路 我们只研究最简单的情况——两个物体碰撞前沿同一直线运动，碰撞后仍沿这条直线运动。这种碰撞叫做一维碰撞。

与物体运动有关的物理量可能有哪些呢？在一维碰撞的情况下，有关的物理量只有物体的质量和速度。设两个物体的质量分别为 m_1 、 m_2 ，碰撞前的速度分别为 v_1 、 v_2 ，碰撞后的速度分别为 v_1' 、 v_2' ，如果速度与我们设定的坐标轴的方向一致，取正值，否则取负值。

现在的问题是：碰撞前后哪个物理量可能是不变的？质量是不变的，但质量并不描述物体的运动状态，不是我们追寻的“不变量”。速度在碰撞前后是变化的，但一个物体的质量与

它的速度的乘积是不是不变量？如果不是，那么，两个物体各自的质量与自己的速度的乘积之和是不是不变量？也就是说，关系式

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

是否成立？

或者，各自的质量与自己的速度的二次方的乘积之和是不变量？也就是说，关系式

$$m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 = m_1 v_1'^2 + m_2 v_2'^2$$

是否成立？

也许，两个物体的速度与自己质量的比值之和在碰撞前后保持不变？也就是说，关系式

$$\frac{v_1}{m_1} + \frac{v_2}{m_2} = \frac{v_1'}{m_1} + \frac{v_2'}{m_2}$$

是否成立？

也许……

碰撞可能有很多情形。例如两个物体可能碰后分开，也可能粘在一起不再分开……我们寻找的物理量必须在各种碰撞的情况下都不改变，这样才称得上是“不变量”。

需要考虑的问题 实验中首要的问题是如何保证碰撞是一维的，即如何保证两个物体在碰撞之前沿同一直线运动，碰撞之后还沿这条直线运动。此外，还要考虑怎样测量物体的质量、怎样测量两个物体在碰撞前后的速度。

质量可以用天平测量，所以，本实验要解决的主要问题是怎样保证物体沿同一直线运动和怎样测量物体的速度。

关于实验数据的处理，下面的表格可供参考，空格是在测量或计算后填写的。填表时要注意思考：如果小球碰撞后运动的速度与原来的方向相反，应该怎样记录？

	碰撞前		碰撞后	
质量	m_1	m_2	m_1	m_2
速度	v_1	v_2	v_1'	v_2'
mv	$m_1 v_1 + m_2 v_2$		$m_1 v_1' + m_2 v_2'$	
mv^2	$m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2$		$m_1 v_1'^2 + m_2 v_2'^2$	
$\frac{v}{m}$	$\frac{v_1}{m_1} + \frac{v_2}{m_2}$		$\frac{v_1'}{m_1} + \frac{v_2'}{m_2}$	
...	...		...	

如果左式成立，那就表示“ $m_1 v_1 + m_2 v_2$ ”是碰撞前后的不变量。

对于每一种碰撞的情况(例如两个物体碰后分开或粘在一起的两种情况),都要填写一个类似的表格,然后根据表中的数据寻找碰撞前后的不变量。举例来说,如果每个表格中 $\frac{v}{m}$ 那一行第二列和第三列的求和的值都相等,那么 $\frac{v_1}{m_1} + \frac{v_2}{m_2}$ 可能就是寻找的不变量。

参考案例一

《物理必修1》第一章介绍了气垫导轨和光电计时装置的工作原理。利用气垫导轨能够很容易地保证两个滑块的碰撞是一维的。与之配套的光电计时装置可以迅速测量两个滑块碰撞前后的速度。

实验装置如图16.1-2所示。不同的质量可以通过在滑块上加重物的办法实现。应用气垫导轨很容易控制滑块碰撞前的速度或使它在碰撞前静止。因此,这个方案是本实验的首选。

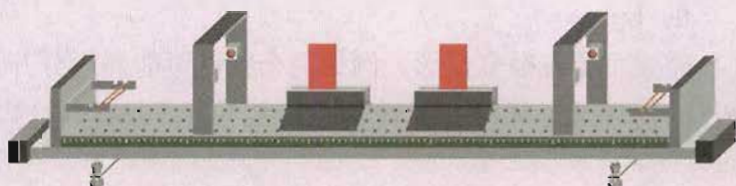


图 16.1-2 气垫导轨

还有两点值得注意。

1. 原来连在一起的两个物体,由于相互之间具有排斥的力而分开,这实际上也是一种碰撞。这种情况可以通过下面的方法实现。

如图16.1-3甲,用细线将两个滑块拉近,把弹簧压缩,然后烧断细线,弹簧弹开后落下,两个滑块由静止向相反方向运动。

2. 碰撞时难免有能量损失。只有当某个物理量在能量损失较大和损失较小的碰撞中都不变,它才有可能是我们寻找的不变量。

在两滑块相碰的端面装上弹性碰撞架(图16.1-3乙),可以得到能量损失很小的碰撞。在滑块的碰撞端贴胶布,可以增大碰撞时的能量损失。如果在两个滑块的碰撞端分别装上撞针和橡皮泥(图16.1-3丙),碰撞时撞针插入橡皮泥中,使两个滑块连成一体运动,这样的碰撞中能量损失很大(有兴趣的同学不难通过实验证明这一点)。如果在两个滑块的碰撞端分别贴上尼龙拉扣,碰撞时它们也会连成一体。

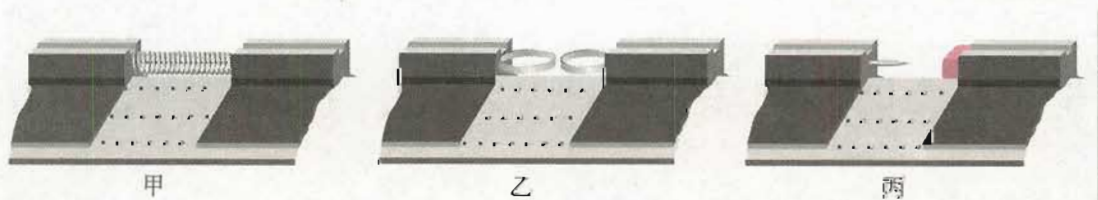


图 16.1-3 利用气垫导轨进行实验的几种情况

参考案例二

实验装置如图16.1-4所示。

把两个小球用线悬起来，一个小球静止，拉起另一个小球，放下时它们相碰。

可以测量小球拉起的角度，从而算出落下时的速度；测量被撞小球摆起的角度，从而算出被撞后的速度。

也可以用贴胶布等方法增大两球碰撞时的能量损失。



图16.1-4 通过小球摆起的角度可以知道碰撞时的速度

参考案例三

将打点计时器固定在光滑桌面的一端，把纸带穿过打点计时器，连在小车A的后面。让小车A运动，小车B静止。在两小车的碰撞端分别装上撞针和橡皮泥（图16.1-5），碰撞时撞针插入橡皮泥中，把两个小车连接成一体（也可在A、B两个小车的碰撞端贴上尼龙拉扣）。通过纸带测出它们碰撞前后的速度。

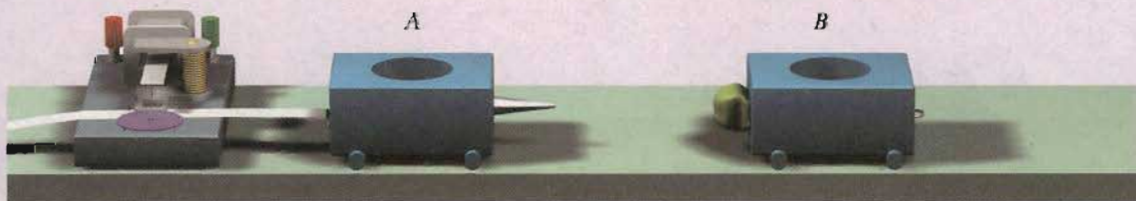


图16.1-5 用小车研究碰撞

同学们还可以自己设计方案，使两个物体以其他形式碰撞。实验时可以综合考察几种不同方式的碰撞。例如，研究能量损失较小的碰撞时，可以选用参考案例二；研究碰撞后两个物体结合在一起的情况时，可以选用参考案例三。

通过这些实验，你是否找到了碰撞前后的“不变量”？即使找到了，它也仍然带有猜想的性质，但你对自己的猜想会增加几分把握。只有根据实验结果推导出的许许多多新结论都与事实一致时，猜想才能成为一条定律。尽管如此，本节实验还是很有意义的，它让我们再一次体验了探究自然规律的过程。

问题与练习

- 光滑桌面上有1、2两个小球。1球的质量为0.3 kg、以8 m/s的速度与质量为0.1 kg的静止的2球碰撞，碰撞后2球的速度变为9 m/s、1球的速度变为5 m/s、方向与原来相同。根据这些实验数据，晓明对这次碰撞的规律做了如下几项猜想。

- (1) 碰撞后 2 球获得了速度, 是否是 1 球把速度传递给了 2 球? 经计算, 2 球增加的速度是 9 m/s , 1 球减小的速度是 3 m/s , 因此, 这种猜想不成立。
- (2) 碰撞后 2 球获得了动能, 是否是 1 球把动能传递给了 2 球? 经计算, 2 球增加的动能是 4.05 J , 1 球减小的动能是 5.85 J , 这种猜想也不成立。
- (3) 请你根据实验数据猜想: 有一个什么物理量, 在这次碰撞中 2 球所增加的这个量与 1 球所减小的这个量相等? 通过计算说明。
2. 水平光滑桌面上有 A、B 两个小车, 质量都是 0.6 kg 。A 车的车尾连着一个打点计时器的纸带, A 车以某一速度与静止的 B 车碰撞, 碰后两车连在一起共同向前运动。碰撞前后打点计时器打下的纸带如图 16.1-6 所示。根据这些数据, 请猜想: 把两个小车合在一起考虑, 有一个什么物理量在碰撞前后可能是相等的?

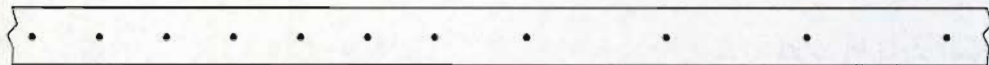


图 16.1-6 碰撞前后纸带上打下的点迹

2

动量和动量定理

动量 上节的探究结果向我们提示, 对于发生碰撞的两个物体来说, 它们的“ mv ”的矢量和在碰撞前后很可能是保持不变的, 对于各种形式的碰撞都是这样。也就是说, 两个物体碰撞时, 一个物体的 mv 减少了, 另一个物体的 mv 一定会增加, 而且它的增加量与前一个物体的减少量相等。这使我们意识到, mv 这个物理量具有特别的意义。物理学中把它定义为物体的**动量(momentum)**, 用字母 p 表示

$$p = mv$$

由于速度是矢量, 所以动量也是矢量, 动量的方向与速度的方向相同。

最先提出动量概念的是法国科学家笛卡儿(R. Descartes, 1596—1650)。他继承了伽利略的说法, 把物体的大小(质量)与速率的乘积叫做动量, 并认为它是量度运动的惟一正确的物理量。不过笛卡儿忽略了动量的方向性。尽管如此, 他的工作还是给后来人的继续探索打下了很好的基础。

1668 年, 惠更斯发表了一篇题为《关于碰撞对物体运动的影响》的论文, 总结了他对碰撞问题的实验和理论上的研究。其结论是: “每个物体所具有的‘动量’在碰撞时可以增多或减少, 但是它们的量值在同一个方向的总和却保持不变, 如果减去反方向运动的话。”他在

这里明确指出了动量的方向性和守恒性。

牛顿把笛卡儿的定义做了修改,即不用质量与速率的乘积,而明确地用质量与速度的乘积定义动量。这样就可以更清楚地表述碰撞前后动量的关系。

科学前辈就是在追寻不变量的努力中,逐渐建立了动量的概念。

例题 1 一个质量是 0.1 kg 的钢球,以 6 m/s 的速度水平向右运动,碰到坚硬的墙壁后弹回,沿着同一直线以 6 m/s 的速度水平向左运动(图 16.2-1)。碰撞前后钢球的动量变化了多少?

分析 动量是矢量,虽然碰撞前后钢球速度的大小没有变化,都是 6 m/s ,但速度的方向变化了,所以动量的方向也发生了变化。也就是说,碰撞前后的动量并不相同。

为了求得钢球动量的变化量,先要确定碰撞前和碰撞后钢球的动量。碰撞前后钢球是在同一条直线上运动的。选定坐标轴的方向,例如取水平向右的方向为坐标轴的方向,碰撞前钢球的运动方向与坐标轴的方向相同,动量为正值;碰撞后钢球的运动方向与坐标轴的方向相反,动量为负值。钢球动量的变化等于碰撞后的动量减去碰撞前的动量。

解 取水平向右的方向为坐标轴的方向。碰撞前钢球的速度 $v = 6\text{ m/s}$,碰撞前钢球的动量为

$$p = mv = 0.1 \times 6\text{ kg} \cdot \text{m/s} = 0.6\text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

碰撞后钢球的速度 $v' = -6\text{ m/s}$,碰撞后钢球的动量为

$$p' = mv' = -0.1 \times 6\text{ kg} \cdot \text{m/s} = -0.6\text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

碰撞前后钢球动量的变化为

$$\Delta p = p' - p = (-0.6\text{ kg} \cdot \text{m/s}) - (+0.6\text{ kg} \cdot \text{m/s}) = -1.2\text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

动量的变化 Δp 是矢量,求得的数值为负值,表示 Δp 的方向与坐标轴的方向相反,即 Δp 的方向水平向左。

动量定理 在本章第 1 节我们只是看到,碰撞前后两个物体的动量之和保持不变,并不涉及各个物体自身的动量怎样变化。通过上面的例题我们又看到,一个物体动量的变化是因为它受到了力的作用(上题中是墙壁对它的作用)。看来解决单个物体动量变化的问题可以从牛顿运动定律入手。

物体在碰撞过程中受到的作用力会变化,但初步研究时可以把作用力按恒力处理。假定一个质量为 m 的物体在碰撞时受到另一个物体对它的作用力是恒力 F ,在这个力的作用下,

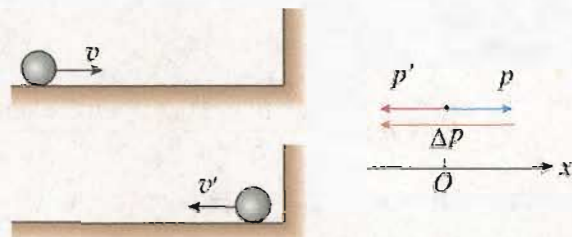


图 16.2-1 碰撞前后钢球的动量变化了多少?

如果物体沿直线运动,即动量矢量始终保持在同一条直线上,在选定一个正方向之后,动量的运算就可以简化成代数运算。

从这个例子可以看出,动量的单位由质量的单位与速度的单位构成,是千克米每秒,符号是 $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ 。

两个物体碰撞时发生相互作用,正是相互作用力使两个物体的动量都改变了。

物体做匀变速直线运动。在碰撞初始两物体刚刚接触的时刻 t ，它的速度为 v ，在碰撞结束两物体分离的时刻 t' ，它的速度为 v' (图 16.2-2)，那么这个物体在碰撞过程中的加速度就是

$$a = \frac{v' - v}{t' - t}$$

因此

$$F = ma = m \frac{v' - v}{t' - t} = \frac{mv' - mv}{t' - t} = \frac{p' - p}{t' - t}$$

由于 $\Delta p = p' - p$ ， $\Delta t = t' - t$ ，所以

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad (1)$$

(1)式表示：物体动量的变化率等于它所受的力。(1)式也可以写成

$$mv' - mv = F(t' - t) \quad (2)$$

(2)式的左边是物体在 t 到 t' 这段时间里动量的增加量，右边既与力的大小、方向有关，又与力的作用时间有关。(2)式告诉我们：力越大、作用时间越长，物体的动量增加得越多。看来， $F(t' - t)$ 这个量反映了力的作用对时间的积累效应。物理学中把力与力的作用时间的乘积叫做力的冲量 (impulse)，通常用字母 I 表示

$$I = F(t' - t)$$

如果用 p 和 p' 分别代表物体在过程始末的动量，那么(2)式可以写为

$$p' - p = I \quad (3)$$

(3) 式或 (2) 式表明：物体在一个过程始末的动量变化量等于它在这个过程中所受力的冲量。这个关系叫做动量定理 (theorem of momentum)。

如果物体受的力不是恒力，物体不做匀变速运动，那么可以依必修物理课中常用的方法，把过程细分为很多短暂的过程，每个过程中物体受的力没有很大的变化，可以近似看做匀变速运动，能够应用 (2) 或 (3) 式。把应用于每个短暂过程的关系式相加，就得到了应用于整个过程的动量定理，形式上与 (2) 或 (3) 式完全一样。这时，(1) 式和 (2) 式中的 F 应该理解为变力的平均值。

动量定理的物理实质与牛顿第二定律相同，但有时应用起来更方便。

例题 2 一个质量为 0.18 kg 的垒球，以 25 m/s 的水平速度飞向球棒，被球棒打击后，反向水平飞回，速度的大小为 45 m/s 。若球棒与垒球的作用时间为 0.01 s ，球棒对垒球的平均作

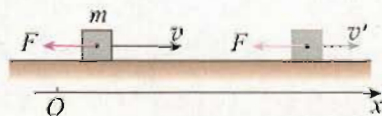


图 16.2-2 力的作用使物体的动量发生了变化

(1)式是牛顿第二定律的另一种形式，牛顿当初就是这样表达的。

由于动量和力都是矢量，所以(1)式是个矢量式，它不仅表示了动量变化率与力之间的大小的关系，也表示了它们之间的方向关系。

你认为冲量是标量还是矢量？

用力是多大?

分析 球棒对垒球的作用力是变力,力的作用时间很短。在这个短时间内,力先是急剧地增大,然后又急剧地减小为0。在冲击、碰撞这类问题中,相互作用的时间很短,力的变化都具有这个特点。动量定理适用于变力,因此,可以用动量定理计算球棒对垒球的平均作用力。

由题中所给的量可以算出垒球的初动量和末动量,由动量定理即可求出垒球所受的平均作用力。

解 沿垒球飞向球棒时的方向建立坐标轴,垒球的初动量为

$$p = mv = 0.18 \times 25 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 4.5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

垒球的末动量为

$$p' = mv' = -0.18 \times 45 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = -8.1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

由动量定理知垒球所受的平均作用力为

$$F = \frac{p' - p}{t' - t} = \frac{-8.1 - 4.5}{0.01} \text{ N} = -1\,260 \text{ N}$$

垒球所受的平均力的大小为1 260 N,负号表示力的方向与坐标轴的方向相反,即力的方向与垒球飞来的方向相反。

从(1)、(2)两式和上面的例子我们得到这样的启示:要使物体的动量发生一定的变化,可以用较大的力作用较短的时间,也可以用较小的力作用较长的时间。

玻璃杯落在水泥地面会破碎,落在地毯上不会破碎,怎样解释这个现象?从同样的高度落到地面,两种情况下动量的变化量是一样的,地面对杯子的力的冲量也应该一样。但是柔软的地毯对杯子的作用时间较长,因此作用力会小些,玻璃杯不易破碎。易碎物品运输时要用柔软材料包装,船舷和码头常常悬挂旧轮胎,都是为了延长作用时间以减小作用力。



图 16.2-3 计算垒球受到的作用力

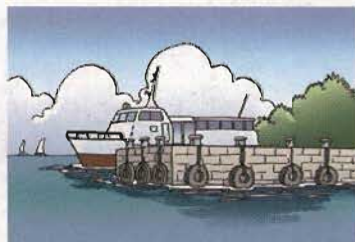


图 16.2-4 船与码头相碰时,旧轮胎能延长船与码头的作用时间,减小作用力。

科学漫步

汽车碰撞试验

汽车安全性能是当今衡量汽车品质的重要指标,也是未来汽车发展的三大主题(安全、节能、环保)之一。实车碰撞试验是综合评价汽车安全性能最有效的方法,也是各国政府检验汽车安全性能的强制手段之一。

1998年6月18日,国产轿车在清华大学汽车工程研究所进行的整车安全性碰撞试验取得成功,

被誉为“中国轿车第一撞”。从此，我国汽车的整车安全性碰撞试验开始与国际接轨。

碰撞试验是让汽车以48.3 km/h的国际标准碰撞速度驶向质量为80 t的国际标准碰撞试验台。由于障碍物是固定的，所以撞击使汽车的动量一下子变到0，其冲击力相当于以100 km/h左右的速度撞向非固定物体。“轰”的一声巨响之后，试验车撞在试验台上，载着模拟乘员的崭新轿车眨眼间被撞得短了一大截。技术人员马上查看车辆受损情况：安全气囊是否爆开？安全带是否发挥有效作用？前挡风玻璃是否破碎？“乘员”是否完好无损？车门是否能够正常开启？……还要取出各种传感器，做进一步处理，通过计算机得到碰撞试验的各项数据。

在汽车碰撞试验中，“乘员”身上安装着传感器。汽车碰撞时产生的冲击力不仅很大，而且很复杂。在碰撞瞬间冲击力的波形与碰撞的速度、相撞双方的质量分布、接触位置的形状、材料、变形等因素相关。人体能够承受的冲击力有多大？这与许多因素有关，其中最重要的就是力的方向。撞车时是否受伤在很大程度上要看人体受到冲击的位置。相同质量、相同车型、相同的相对速度下进行的多次碰撞，对乘员的伤害程度可能有很大的差别。

问题：轿车前面的发动机舱是不是越坚固越好？



怎样用动量定理解释安全气囊的保护作用？

科学足迹

历史上关于运动量度的争论

历史上，一种观点认为应该用物理量 mv 来量度运动的“强弱”，另一种观点认为应该用物理量 mv^2 来量度运动的“强弱”。

主张以 mv 量度运动的代表人物是笛卡儿。他认为：“在物质中存在一定量的运动，它的总和在世界上永远不会增加也不会消失。”这实际上是后来所说的动量守恒定律的雏形。

主张以 mv^2 量度运动的代表人物是莱布尼兹。他认为守恒的应该是 Σmv^2 而不是 Σmv 。

经过半个多世纪的争论，法国科学家达兰贝尔(d'Alembert, 1717—1788)用他的研究指出，双方实际是从不同的角度描述了运动的守恒性。

用现在的科学术语说，就是：“力”既可以通过动量来表示

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t}$$

又可以通过动能来表示

$$F = \frac{\Delta(\frac{1}{2}mv^2)}{\Delta s}$$

Σmv 表示对各个物体的质量与速度的乘积 mv 求和。

因此, 动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 决定了物体在力 F 的阻碍下能够运动多远; 而动量 mv 则决定了物体在力 F 的阻碍下能够运动多长时间。也就是说, 动量定理反映了力对时间的累积效应; 动能定理反映了力对空间的累积效应。

这场争论一方面促进了机械能概念及整个能量概念的形成, 并使人们对多种运动形式及其相互转变的认识更加深入; 另一方面, 动量与动量守恒定律也在争论中显示出了它们的重要性。

做一做

动量与能量之间具有密切的关系, 这种关系在粒子的研究中更显得重要。

某实物粒子在速度不太大时的动能可以用它的速度 v 表示: $E = \frac{1}{2}mv^2$, 请你导出用动量 p 表示动能的公式。同样, 请你导出用动能 E 表示动量的公式。

问题与练习

1. 解答以下三个小题, 思考动量与动能的区别。

- (1) 质量为 2 kg 的物体, 速度由 3 m/s 增大为 6 m/s , 它的动量和动能各增大为原来的几倍?
- (2) 质量为 2 kg 的物体, 速度由向东的 3 m/s 变为向西的 3 m/s , 它的动量和动能是否变化了? 如果变化了, 变化量各是多少?
- (3) A 物体质量是 2 kg , 速度是 3 m/s , 方向向东; B 物体质量是 3 kg , 速度是 4 m/s , 方向向西。它们的动量的矢量和是多少? 它们的动能之和是多少?

解答后做个小结, 说说动量与动能有什么不同。以后的学习中还会学到动量与动能的区别, 请及时总结。

2. 在光滑水平面上, 原来静止的物体在水平力 F 的作用下, 经过时间 t 、通过位移 l 后, 动量变为 p 、动能变为 E_k 。以下说法正确的是

- A. 在 F 作用下, 这个物体若经过位移 $2l$, 其动量将等于 $2p$;
- B. 在 F 作用下, 这个物体若经过时间 $2t$, 其动量将等于 $2p$;
- C. 在 F 作用下, 这个物体若经过时间 $2t$, 其动能将等于 $2E_k$;
- D. 在 F 作用下, 这个物体若经过位移 $2l$, 其动能将等于 $2E_k$ 。

3. 一个质量 $m = 10\text{ kg}$ 的物体, 以 $v = 10\text{ m/s}$ 的速度做直线运动, 受到一个反方向的作用力 F (图 16.2-5), 经过 4 s , 速度变为反向 2 m/s 。这个力是多大?



图 16.2-5 求力的大小

4. 质量是 40 kg 的铁锤从 5 m 高处落下, 打在水泥桩上, 与水泥桩撞击的时间是 0.05 s。撞击时, 铁锤对桩的平均冲击力有多大?
5. 体操运动员在落地时总要屈腿 (图 16.2-6), 这是为什么?
6. 甲、乙两人静止在光滑的冰面上, 甲推了乙一下, 结果两人向相反方向滑去 (图 16.2-7)。在甲推乙之前, 他们的总动量为 0; 甲推乙后, 他们都有了动量, 总动量还等于 0 吗? 已知甲的质量为 45 kg, 乙的质量为 50 kg, 甲的速率与乙的速率之比是多大?

提示: 首先考虑甲对乙、乙对甲两个冲量的关系。



图 16.2-6 落地时为什么要屈腿?



图 16.2-7 两人速率之比是多大?

3

动量守恒定律

系统 内力和外力 本章研究了碰撞问题。与过去遇到的大多数力学问题不同, 碰撞的研究对象不是一个物体, 而是两个 (或多个) 物体。我们说这两个 (或多个) 物体组成了一个力学系统 (**system**)。实际上过去我们也曾涉及系统的问题。例如, 重力势能属于地面附近的物体与地球组成的系统; 弹簧具有的弹性势能属于构成它的许多小小的物质单元 (这些物质单元之间有弹力的作用) 组成的系统。研究炸弹的爆炸时, 它的所有碎片及产生的燃气也要作为一个系统来处理。

碰撞时两个物体之间一定有相互作用力, 由于这两个物体是属于同一个系统的, 它们之间的力叫做**内力 (internal force)**。两个物体还会受到重力, 如果放到桌面上, 它们还会受到桌面的支持力、摩擦力。这些力是系统以外的物体施加的, 叫做**外力 (external force)**。

动量守恒定律 通过第 1 节的实验大家已经意识到, 两个物体碰撞前后它们的总动量是不变的。现在再从另一个角度, 即牛顿运动定律的角度考察这个问题。

如图 16.3-2 所示, 在水平桌面上做匀速运动的两个小球, 质量分别是 m_1 和 m_2 , 沿着同一直线向相同的方向运动,

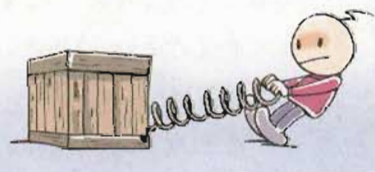


图 16.3-1 图中的弹性势能属于组成弹簧的许多物质单元

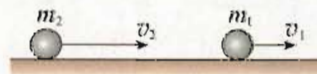


图 16.3-2 用牛顿运动定律分析碰撞过程

速度分别是 v_1 和 v_2 , $v_2 > v_1$ 。当第二个小球追上第一个小球时两球碰撞。碰撞后的速度分别是 v_1' 和 v_2' 。碰撞过程中第一个球所受第二个球对它的作用力是 F_1 , 第二个球所受第一个球对它的作用力是 F_2 。

根据牛顿第二定律, 碰撞过程中两球的加速度分别是

$$a_1 = \frac{F_1}{m_1}, \quad a_2 = \frac{F_2}{m_2}$$

根据牛顿第三定律, F_1 与 F_2 大小相等、方向相反, 即

$$F_1 = -F_2$$

所以

$$m_1 a_1 = -m_2 a_2$$

碰撞时两球之间力的作用时间很短, 用 Δt 表示。这样, 加速度与碰撞前后速度的关系就是

$$a_1 = \frac{v_1' - v_1}{\Delta t}, \quad a_2 = \frac{v_2' - v_2}{\Delta t}$$

把加速度的表达式代入 $m_1 a_1 = -m_2 a_2$, 移项后得到

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

它的物理意义是: 两球碰撞前的动量之和等于碰撞后的动量之和。这个结论与第1节的实验结果一致。

由于两个物体碰撞过程中的每个时刻都有 $F_1 = -F_2$, 因此上面(1)式对过程中的任意两时刻的状态都适用, 也就是说, 系统的动量在整个过程中一直保持不变。因此我们说这个过程中动量是守恒的。

历史上, 通过几代物理学家在实验上和理论上的分析、探索与争论, 人们在18世纪形成了这样的共识: 如果一个系统不受外力, 或者所受外力的矢量和为0, 这个系统的总动量保持不变。这就是动量守恒定律 (law of conservation of momentum)。

为了正确认识动量守恒定律, 需要注意以下几点。

1. 区分内力和外力

以在光滑水平桌面上发生碰撞的两个物体为例, 它们之间一定有相互作用, 这是内力; 它们还要受到重力和桌面对它们的支持力, 这是外力。水平桌面上的每个物体所受的重力与它所受的支持力都是大小相等、方向相反的, 矢量和为0, 因此系统所受的外力的矢量和为0。光滑水平桌面上两个物体碰撞的问题符合动量守恒定律的条件。

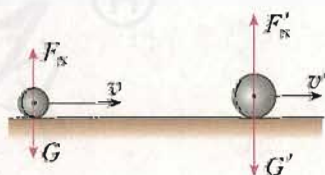


图16.3-3 这两个物体碰撞时它们所受的外力的矢量和为0

2. 在总动量一定的情况下, 每个物体的动量可以发生很大的变化

例如, 静止的两辆小车用细线相连, 中间有一个压缩了的弹簧(图16.3-4)。烧断细线后, 由



图16.3-4 烧断细线后, 尽管两辆小车都将获得动量, 但它们动量的矢量和仍然为0。

碰撞后前面的球变快, 后面的球变慢, 所以两球的受力方向一定相反, 也就是说, F_1 与 F_2 的符号一定相反。

于弹力的作用,两辆小车分别向左、右运动,它们都获得了动量,但动量的矢量和仍然是0。

例题1 在列车编组站里,一辆 $m_1 = 1.8 \times 10^4 \text{ kg}$ 的货车在平直轨道上以 $v_1 = 2 \text{ m/s}$ 的速度运动,碰上一辆 $m_2 = 2.2 \times 10^4 \text{ kg}$ 的静止的货车,它们碰撞后结合在一起继续运动。求货车碰撞后运动的速度。

分析 两辆货车在碰撞过程中发生相互作用,它们是一个系统,这个系统是我们的研究对象。系统所受的外力有:重力、地面支持力、地面摩擦力和空气阻力。重力与支持力之和等于0,摩擦力和空气阻力远小于碰撞过程中发生的内力,可以忽略。因此,可以认为碰撞过程中系统所受外力的矢量和为0,动量守恒。

为了应用动量守恒定律解决这个问题,需要确定碰撞前后的动量。碰撞前的动量是指即将发生碰撞那一时刻的动量,而不是指碰撞发生之前若干时间的动量;碰撞后的动量是指碰撞刚结束那一时刻的动量,而不是指碰撞结束若干时间之后的动量。

分析物理现象不但要明确研究对象,而且要明确研究的是哪一段过程。也就是说,要明确哪个状态是我们研究的过程的初状态,哪个是过程的末状态。初状态是开始相互作用时的状态,末状态是相互作用结束时的状态。

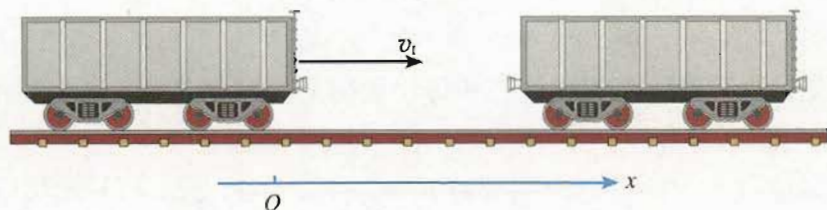


图 16.3-5 两车碰撞前的状态

解 沿碰撞前货车运动的方向建立坐标轴(图 16.3-5),有 $v_1 = 2 \text{ m/s}$ 。设两车结合后的速度为 v 。两车碰撞前的总动量为

$$p = m_1 v_1$$

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

$$m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v$$

所以

$$v = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}$$

代入数值,得

$$v = 0.9 \text{ m/s}$$

两车结合后速度的大小是 0.9 m/s ; v 是正值,表示结合后仍然沿坐标轴的方向运动,即仍然向右运动。

例题2 一枚在空中飞行的火箭,质量为 m , 在某点的速度为 v , 方向水平, 燃料即将

耗尽。火箭在该点突然炸裂成两块(图16.3-6),其中质量为 m_1 的一块沿着与 v 相反的方向飞去,速度为 v_1 。求炸裂后另一块的速度 v_2 。

分析 炸裂前,可以认为火箭是由质量为 m_1 和 $(m - m_1)$ 的两部分组成。考虑到燃料几乎用完,爆炸产生的气体的质量可以忽略,火箭的炸裂过程可以看做这两部分相互作用的过程。这两部分组成的系统是我们的研究对象。在炸裂过程中,炸裂成的两部分都受到重力的作用,所受外力的矢量和不为0,但是它们所受的重力远小于爆炸时燃气对它们的作用力,所以爆炸过程中重力的作用可以忽略,可以认为系统满足动量守恒定律的条件。

解 火箭炸裂前的总动量为

$$p = mv$$

炸裂后的总动量为

$$p' = m_1 v_1 + (m - m_1) v_2$$

根据动量守恒定律 $p' = p$,可得

$$m_1 v_1 + (m - m_1) v_2 = mv$$

解出

$$v_2 = \frac{mv - m_1 v_1}{m - m_1}$$

若沿炸裂前速度 v 的方向建立坐标轴, v 为正值; v_1 与 v 的方向相反, v_1 为负值。此外,一定有 $m - m_1 > 0$ 。于是,由上式可知, v_2 应为正值。这表示质量为 $(m - m_1)$ 的那部分沿着与坐标轴相同的方向,即沿原来的方向飞去。这个结论容易理解。炸裂的一部分沿着与原来速度相反的方向飞去,另一部分不会也沿着这个方向飞去,否则,炸裂后的总动量将与炸裂前的总动量方向相反,动量就不可能守恒了。

动量守恒定律的普适性 既然许多问题可以通过牛顿运动定律解决,为什么还要研究动量守恒定律?

从上面的例子可以看到,用牛顿运动定律解决问题要涉及整个过程中的力。有的时候,力的形式很复杂,甚至是变化的,解起来很困难,甚至不能求解。但是动量守恒定律只涉及过程始末两个状态,与过程中力的细节无关。这样,问题往往能大大简化。

除此之外,两者还有更深刻的差别。近代物理的研究对象已经扩展到我們直接经验所不熟悉的高速(接近光速)、微观(小到分子、原子的尺度)领域。实验事实证明,在这些领域,牛顿运动定律不再适用,而动量守恒定律仍然正确。

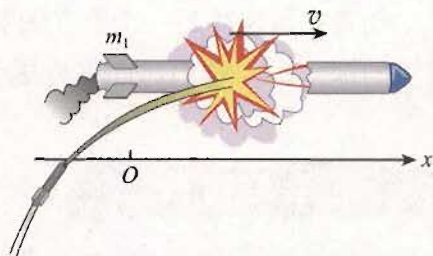


图16.3-6 已知一块的飞行速度,求另一块的飞行速度。

物体炸裂时一般不会正好分成两块,也不会正好沿水平方向飞行。这里对问题做了简化处理。

解题时涉及的速度,都是相对于地面的速度。

动量守恒定律与牛顿运动定律在经典力学中都占有极其重要的地位,两者密切相关。牛顿运动定律从“力”的角度反映物体间的相互作用;动量守恒定律从“动量”的角度描述物体间的相互作用。

动量守恒定律是一个独立的实验定律，它适用于目前为止物理学研究的一切领域。随着学习的深入，同学们对此将有更深刻的体会。

思考与讨论

如图16.3-7所示，一个质量是0.2 kg的钢球，以2 m/s的速度斜射到坚硬的大大理石板上，入射的角度是 45° ，碰撞后被斜着弹出，弹出的角度也是 45° ，速度仍为2 m/s。请你用作图的方法求出钢球动量变化的大小和方向。

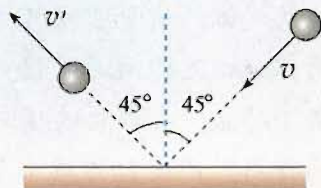


图 16.3-7 求动量的变化量

问题与练习

1. 在光滑的水平面上有一辆平板车，一个人站在车上用大锤敲打车的左端（图16.3-8）。在连续的敲打下，这辆车能持续地向右运动吗？说明理由。
2. A、B两个物体在同一直线上沿同一方向运动，A的质量是5 kg，速度是9 m/s，B的质量是2 kg，速度是6 m/s。A从后面追上B，它们相互作用一段时间后，B的速度增大为10 m/s，方向不变，这时A的速度是多大？方向如何？以上过程中除A、B两物体的相互作用力外，其他的力可以忽略。
3. 质量是10 g的子弹，以300 m/s的速度射入质量是24 g、静止在光滑水平桌面上的木块，并留在木块中。子弹留在木块中以后，木块运动的速度是多大？如果子弹把木块打穿，子弹穿过后的速度为100 m/s，这时木块的速度又是多大？
4. A、B两个粒子都带正电，B的电荷量是A的2倍，B的质量是A的4倍。A以已知速度 v 向静止的B粒子飞去。由于库仑斥力，它们之间的距离缩短到某一极限值后又被弹开，然后各自以新的速度做匀速直线运动。设作用前后它们的轨迹都在同一直线上，请在以上提供的信息中选择有用的已知条件，计算当A、B之间的距离最近时它们各自的速度。
5. 某机车以0.8 m/s的速度驶向停在铁轨上的15节车厢，与它们对接。机车与第一节车厢相碰后，它们连在一起具有一个共同的速度，紧接着又与第二节车厢相碰，就这样，直至碰上最后一节车厢。设机车和车厢的质量都相等，求：与最后一节车厢碰撞后车厢的速度。铁轨的摩擦忽略不计。



图 16.3-8 大锤连续敲打，车能持续向右运动吗？

6. 甲、乙两个物体沿同一直线相向运动, 甲物体的速度是 6 m/s , 乙物体的速度是 2 m/s 。碰撞后两物体都沿各自原方向的反方向运动, 速度都是 4 m/s 。求甲、乙两物体的质量之比。
7. 细线下吊着一个质量为 m_1 的沙袋, 构成一个单摆, 摆长为 l 。一颗质量为 m 的子弹水平射入沙袋并留在沙袋中, 随沙袋一起摆动。已知沙袋摆动时摆线的最大偏角是 θ , 求子弹射入沙袋前的速度。

4

碰撞

碰撞是十分普遍的现象, 特别是在了解微观粒子的结构与性质的过程中, 碰撞的研究起着重要的作用。

弹性碰撞和非弹性碰撞 从前两节的分析可以看到, 碰撞过程遵从动量守恒定律。那么, 碰撞过程也一定遵从能量守恒定律吗? 例如, 两个物体相碰, 碰撞之前它们的动能之和与碰撞之后的动能之和相等吗?

思考与讨论

在本章第1节开始的演示中, 一个钢球与另一个静止的钢球相碰, 如果两个钢球的质量相等, 第一个钢球停止运动, 第二个钢球能摆到同样的高度, 说明这个碰撞过程中没有能量损失, 碰撞过程能量守恒。

碰撞过程中能量总是守恒的吗? 我们分析一个例子。

如图16.4-1, 两个物体的质量都是 m , 碰撞以前一个物体静止, 另一个以速度 v 向它撞去。碰撞以后两个物体粘在一起, 成为一个质量为 $2m$ 的物体, 以速度 v' 继续前进。

这个碰撞过程中能量(总动能)守恒吗?

可以先根据动量守恒定律求出碰撞后的共同速度 v' , 也就是用 v 表示 v' , 然后分别计算碰撞前后的总动能。

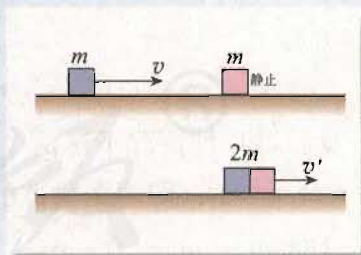


图16.4-1 碰撞后两个物体结合在一起, 碰撞过程中能量守恒吗?

如果碰撞过程中机械能守恒, 这样的碰撞叫做弹性碰撞 (elastic collision); 如果碰撞过程中机械能不守恒, 这样的碰撞叫做非弹性碰撞 (inelastic collision)。

近代物理学中, 经常遇到的是微观粒子间的碰撞。微观粒子碰撞时没有能量损失, 所以我们重点研究弹性碰撞。

钢球、玻璃球碰撞时的形变能够完全恢复, 能量损失很小, 它们的碰撞可以看做弹性碰撞; 木制品碰撞时的形变不能完全恢复, 一般情况下不能作为弹性碰撞处理; 橡皮泥球之间的碰撞是典型的非弹性碰撞。

思考与讨论

我们考虑一维弹性碰撞。在本章第1节开始时的演示中, 大家已经观察了两个质量相等物体的碰撞、两个质量相差悬殊的物体的碰撞, 了解了它们碰撞前后速度变化的特点。现在把它们的碰撞看做弹性碰撞, 从理论上分析不同情况下碰撞前后速度的变化情况。

假设物体 m_1 以速度 v_1 与原来静止的物体 m_2 碰撞, 碰撞后它们的速度分别为 v_1' 和 v_2' 。我们的任务是得出用 m_1 、 m_2 、 v_1 表达 v_1' 和 v_2' 的公式。

碰撞过程遵从动量守恒定律, 据此可以列出包含上述各已知量和未知量的方程。弹性碰撞中没有机械能损失, 于是可以列出另一个方程。两个方程联立, 把 v_1' 和 v_2' 作为未知量解出来就可以了。

图 16.4-2 所示的碰撞发生后, 两个物体的速度分别为

$$v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 \quad (1)$$

$$v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 \quad (2)$$

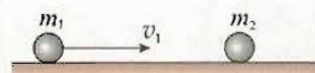


图 16.4-2 一个物体以速度 v_1 与另一个静止物体碰撞

我们对几种情况下这两个式子的结果做些分析。

- $m_1 = m_2$, 即两个物体的质量相等

这时 $m_1 - m_2 = 0$, $m_1 + m_2 = 2m_1$ 。根据 (1)、(2) 两式, 有

$$v_1' = 0$$

$$v_2' = v_1$$

这表示第一个物体的速度由 v_1 变为 0, 而第二个物体由静止开始运动, 运动的速度等于第一个物体原来的速度。

- 若 $m_1 \gg m_2$, 即第一个物体的质量比第二个物体大得多

这时 $m_1 - m_2 \approx m_1$, $m_1 + m_2 \approx m_1$ 。根据 (1)、(2) 两式, 有

$$v_1' = v_1$$

$$v_2' = 2v_1$$

这表示碰撞后第一个物体的速度没有改变，而第二个物体以 $2v_1$ 的速度被撞出去。

● 若 $m_1 \ll m_2$ ，即第一个物体的质量比第二个物体小得多

这时 $m_1 - m_2 \approx -m_2$ ， $\frac{2m_1}{m_1 + m_2} \approx 0$ 。根据(1)、(2)两式，有

$$v_1' = -v_1$$

$$v_2' = 0$$

这表示碰撞以后第一个物体被撞了回去，以原来的速率向反方向运动，而第二个物体仍然静止。

这里从理论上讨论了本章第1节开始时的实验。如果在这些讨论之后再做一个实验，你是不是对科学理论与实验的关系有些新的体验？

对心碰撞和非对心碰撞 如图16.4-3甲，一个运动的球与一个静止的球碰撞，碰撞之前球的运动速度与两球心的连线在同一条直线上，碰撞之后两球的速度仍会沿着这条直线。这种碰撞称为**正碰 (direct impact)**，也叫对心碰撞。

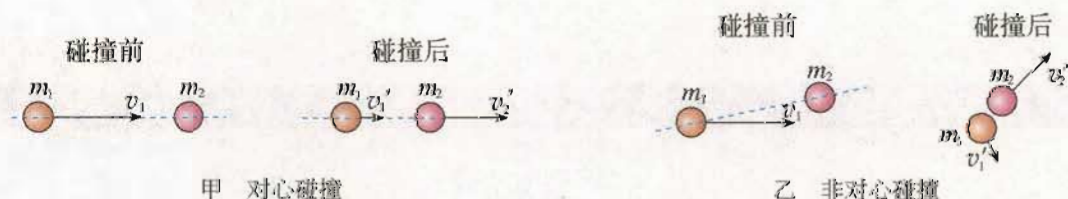


图 16.4-3 两种碰撞

一个运动的球与一个静止的球碰撞，如果碰撞之前球的运动速度与两球心的连线不在同一条直线上，碰撞之后两球的速度都会偏离原来两球心的连线。这种碰撞称为**非对心碰撞**。

发生对心碰撞的两个物体，碰撞前后的速度都沿同一条直线，它们的动量也都沿这条直线，可以在这个方向上应用动量守恒定律。前面我们已经多次遇到这种情形。

发生非对心碰撞的两个物体，碰撞后的速度都不与原来的速度在同一条直线上，所以非对心碰撞比较复杂，是平面内的二维问题。

对一个问题进行理论分析之后，我们会关心分析的过程是否正确，分析的根据是否可靠。可以有多种方法进行评估。方法之一是，把分析的结果应用于几个比较简单的特例，如果所得的结论与常识或已有的知识一致，那么理论分析可能是正确的，否则一定出了问题。

对于非对心碰撞，应该在相互垂直的两个方向上分别应用动量守恒定律。

思考与讨论

如图16.4-4, A球以速度 v_1 与同样质量且处于静止的B球碰撞。已知碰撞后B球的速度如图所示, 请你大致画出碰撞后A球的速度。



图16.4-4 画出碰撞后A球的速度

散射 在粒子物理和核物理中, 常常使一束粒子射入物体, 粒子与物体中的微粒碰撞, 研究碰撞后粒子的运动方向, 可以得到与物质微观结构有关的很多信息。微观粒子相互接近时并不像宏观物体那样“接触”, 因此微观粒子的碰撞又叫做散射 (scattering)。由于粒子与物质微粒发生对心碰撞的概率很小, 所以多数粒子在碰撞后飞向四面八方。

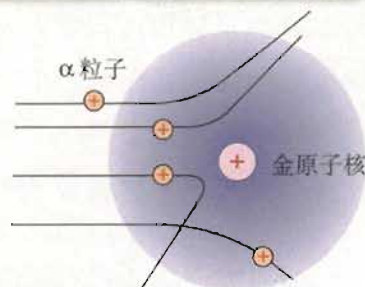


图16.4-5 金原子核对 α 粒子的散射。由于原子之间强大的相互作用, 碰撞时原子相当于质量极大的物体, 不会移动。

科学足迹

中子的发现

1932年, 物理学历史上发生了一个重要的事件——发现了中子。

早在1920年, 在发现电子和质子之后不久, 卢瑟福就猜测, 原子中可能还有一种电中性的粒子。英国物理学家查德威克 (J. Chadwick, 1891—1974) 在卡文迪许实验室里寻找这种电中性粒子。他一直在设法加速质子, 用它撞击原子核, 以发现有关中性粒子的证据。1929年, 他用高速质子轰击了铍原子核。

实际上, 德国物理学家博特及其合作者贝克尔已经先行一步。他们用 α 粒子轰击一系列元素, 在轰击铍原子核时, 产生了一种未知射线。为了确定这种射线的性质, 他们试着把各种物体放在射线经过的路径上, 结果发现这种射线的穿透能力极强, 在穿透2 cm厚的铅板后强度只减弱30%。当时知道, 能有这样强的穿透能力的只有 γ 射线。因此, 他们认为这种射线是一种 γ 射线。

法国物理学家约里奥-居里夫妇重复了博特和贝克尔的实验。他们在铍板与测量仪器之间插入了石蜡, 结果石蜡在这种“铍射线”的照射下会发出质子, 而没有石蜡时射线是不带电的。但是, 约里奥-居里夫妇认为石蜡被照射时产生质子是一种康普顿效应^①, 他们仍然认为中性的“铍射线”

^① 本书下章将介绍康普顿效应。

是一种 γ 射线。

查德威克认为新射线不可能是 γ 射线，因为一般情况下 γ 射线容易被密度大的物质吸收，但这种射线却不是这样。他还观察到一个新的现象：在用这种射线轰击氢核时，它能被反弹回来。通过对反冲核的动量的测定，再应用动量守恒定律进行估算，得知这种射线是由质量与质子大致相等的中性粒子组成。随后他于1932年在《自然》杂志上发表了《中子可能存在》的论文。

查德威克发现了12年前他的老师卢瑟福所预言的粒子——中子，为此，他获得了1935年的诺贝尔物理学奖。

博特发现了“铍辐射”却没有认识到它就是中子，多年以后他还深感遗憾。如果他们此前听了卢瑟福的演讲，也许就不会失去这次重大发现。

这是科学史上一个“真理碰到了鼻子还没有发现”的著名例子，它说明科学信息的交流与科学思想的碰撞是多么重要。

问题与练习

1. 在气垫导轨上，一个质量为600 g的滑块以15 cm/s的速度与另一个质量为400 g、速度为10 cm/s并沿相反方向运动的滑块迎面相撞，碰撞后两个滑块粘在一起，求碰撞后滑块速度的大小和方向。
2. 质量为 m 、速度为 v 的A球跟质量为 $3m$ 的静止B球发生正碰。碰撞可能是弹性的，也可能是非弹性的，因此，碰撞后B球的速度可能有不同的值。请你论证：碰撞后B球的速度可能是以下值吗？
(1) $0.6v$ ；(2) $0.4v$ ；(3) $0.2v$ 。
3. 速度为 10^3 m/s的氦核与静止的质子发生正碰，氦核的质量是质子的4倍，碰撞是弹性的，求碰撞后两个粒子的速度。
4. 有些核反应堆里要让中子与原子核碰撞，以便把中子的速率降下来。为此，应该选用质量较大的还是质量较小的原子核？为什么？
5. 一种未知粒子跟静止的氢原子核正碰，测出碰撞后氢原子核的速度是 3.3×10^7 m/s。该未知粒子跟静止的氮原子核正碰时，测出碰撞后氮原子核的速度是 4.7×10^6 m/s。已知氢原子核的质量是 m_H ，氮原子核的质量是 $14m_H$ ，上述碰撞都是弹性碰撞，求未知粒子的质量。这实际是历史上查德威克测量中子质量从而发现中子的实验，请你根据以上查德威克的实验数据计算：中子的质量与氢核的质量 m_H 有什么关系？
6. 本节第一个“思考与讨论”中没有谈到图16.4-1所绘桌面是否水平，也没有谈到物体与桌面的摩擦能否忽略。你认为这两点会对结论有重大影响吗？为什么？

5

反冲运动 火箭

思考与讨论

你知道章鱼、乌贼怎样游泳吗？它们先把水吸入体腔，然后用力压水，通过身体前面的孔将水喷出，使身体很快地运动。

章鱼能够调整自己的喷水口的方向，这样可以使得身体向任意方向前进。

你认为章鱼游泳时应用了什么物理原理？



图 16.5-1 章鱼

反冲 根据动量守恒定律，如果一个静止的物体在内力的作用下分裂为两个部分，一部分向某个方向运动，另一部分必然向相反的方向运动。这个现象叫做**反冲 (recoil)**。章鱼的运动利用了反冲的原理。

在实际中常常需要考虑反冲现象。用枪射击时，子弹向前飞去，枪身发生反冲向后运动。枪身的反冲会影响射击的准确性，所以用步枪射击时要把枪身抵在肩部，以减少反冲的影响。

农田、园林的喷灌装置能够一边喷水一边旋转，这是因为喷口的朝向略有偏斜，水从喷口喷出时，喷管因反冲而旋转。这样可以自动改变喷水的方向。



图 16.5-2 喷灌装置

做一做

把一个气球吹起来，用手捏住气球的吹气口（图 16.5-3），然后突然放开，让气体喷出，观察气球的运动。



图 16.5-3 放手后观察气球的运动

二

如图 16.5-4 所示,把弯管装在可旋转的盛水容器的下部。当水从弯管流出时,容器就旋转起来。



图 16.5-4 反冲现象的演示

火箭 我国早在宋代就发明了火箭(图 16.5-5)。箭杆上捆一个前端封闭的火药筒,点燃后生成的燃气以很大速度向后喷出,箭杆由于反冲而向前运动。

喷气式飞机和火箭的飞行应用了反冲的原理,它们都是靠喷出气流的反冲作用而获得巨大速度的。现代的喷气式飞机,靠连续不断地向后喷出气体,飞行速度能够超过 1 000 m/s。



图 16.5-5 古代的火箭(模型)

思考与讨论

质量为 m 的人在远离任何星体的太空中,与他旁边的飞船相对静止。由于没有力的作用,他与飞船总保持相对静止的状态。

这个人手中拿着一个质量为 Δm 的小物体。现在他以相对于飞船为 u 的速度把小物体抛出(图 16.5-6)。

1. 小物体的动量改变量是多少?
2. 人的动量改变量是多少?
3. 人的速度改变量是多少?



图 16.5-6 人的速度改变量是多少?

设火箭飞行时在极短的时间 Δt 内喷射燃气的质量是 Δm , 喷出的燃气相对喷气前火箭的速度是 u , 喷出燃气后火箭的质量是 m 。我们设法计算火箭在这样一次喷气后增加的速度 Δv 。

以喷气前的火箭为参考系。喷气前火箭的动量是 0, 喷气后火箭的动量是 $m\Delta v$, 燃气的动量是 Δmu 。根据动量守恒定律, 喷气后火箭和燃气的总动量仍然为 0, 所以

$$m\Delta v + \Delta mu = 0$$

解出

$$\Delta v = -\frac{\Delta m}{m} u \quad (1)$$

(1) 式表明, 火箭喷出的燃气的速度 u 越大、火箭喷出物质的质量与火箭本身质量之比 $\frac{\Delta m}{m}$ 越大, 火箭获得的速度 Δv 越大。现代火箭喷气的速度在 $2\,000 \sim 4\,000 \text{ m/s}$, 近期内难以大幅度提高。因此, 若要提高火箭的速度, 需要在减轻火箭本身质量上面下功夫。火箭起飞时的质量与火箭除燃料外的箭体质量之比叫做火箭的质量比。这个参数一般小于 10, 否则火箭结构的强度就有问题。但是, 这样的火箭还是达不到发射人造地球卫星的 7.9 km/s 的速度。

为了解决这个问题, 苏联科学家齐奥尔科夫斯基 (К. Э. Циолковский, 1857—1935) 提出了多级火箭的概念。把火箭一级一级地接在一起, 第一级燃料用完之后就箭体抛弃, 减轻负担, 然后第二级开始工作, 这样一级一级地连起来, 理论上火箭的速度可以提得很高。但是实际应用中一般不会超过四级, 因为级数太多时, 连接机构和控制机构的质量会增加很多, 工作的可靠性也会降低。

我国自 1956 年建立了专门的航天研究机构到现在, 火箭技术有了长足的发展。1964 年 6 月, 我国自行研制的运载火箭首次升空。1970 年 4 月 24 日, 我国第一颗人造卫星一次发射成功。我国的大型系列运载火箭以“长征”命名, 至今已经完成 100 多次各种卫星的发射任务, 成功地实现了载人航天飞行, 并在国际航天市场占有一席之地。我国的火箭技术已经跨入了世界先进行列。

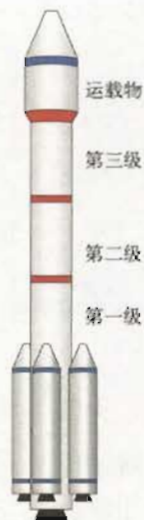


图 16.5-7 三级火箭



甲 我国长征 2F 号火箭



乙 美国发现者号航天飞机



丙 我国潜射固体燃料战略导弹

图 16.5-8 几种著名的喷气式飞行器

问题与练习

1. 一个连同装备共有 100 kg 的航天员, 脱离宇宙飞船后, 在离飞船 45 m 的位置与飞船处于相对静止的状态。装备中有一个高压气源, 能以 50 m/s 的速度喷出气体。航天员

为了能在 10 min 时间内返回飞船，他需要在开始返回的瞬间一次性向后喷出多少气体？

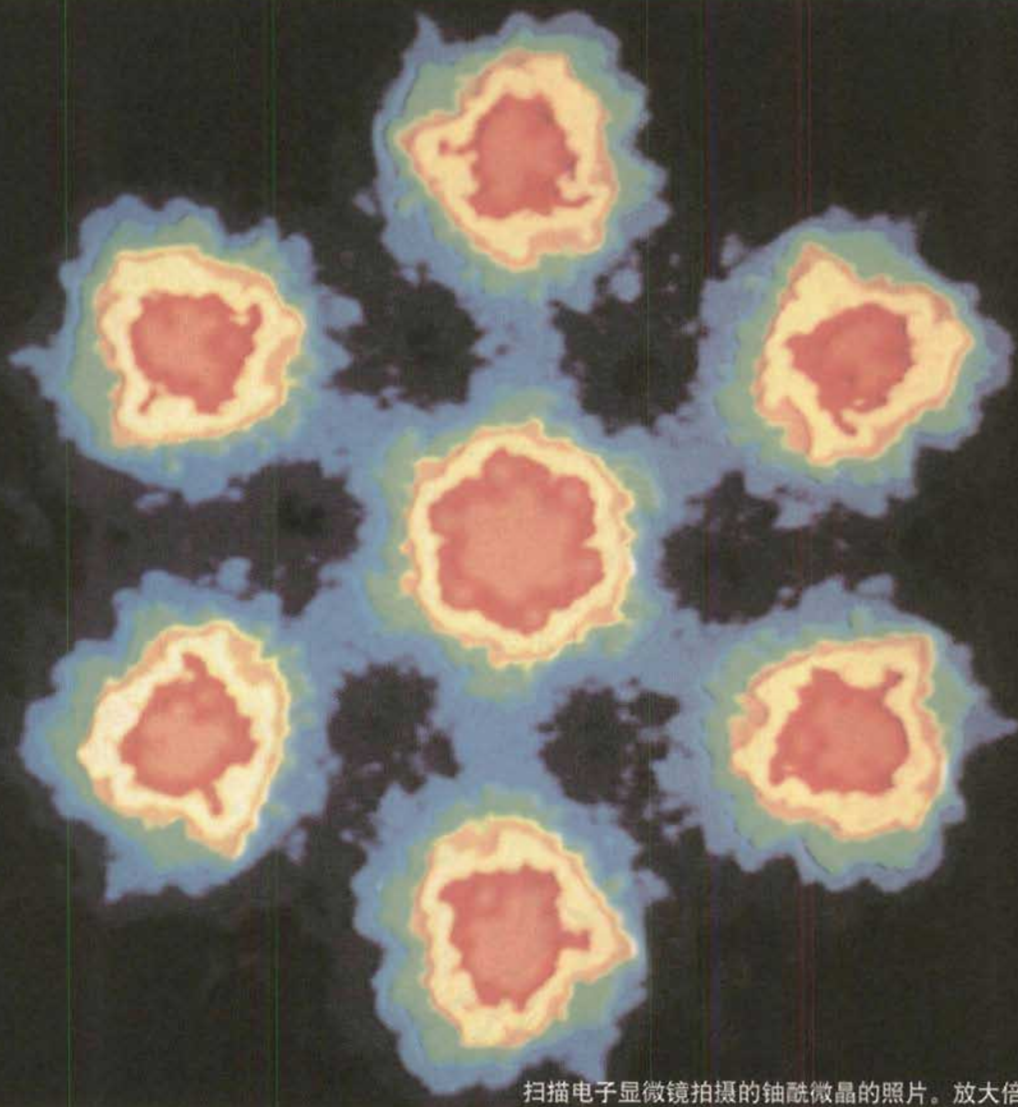
2. 一架喷气式飞机，飞行速度是 800 m/s，如果它喷出的气体相对飞机的速度小于 800 m/s，那么以地面为参考系，气体的速度方向实际上是与飞机飞行的方向相同的。如果在这种情况下继续喷出气体，飞机的速度还会增加吗？为什么？
3. 一个士兵坐在皮划艇上，他连同装备和皮划艇的总质量共 120 kg。这个士兵用自动步枪在 2 s 时间内沿水平方向连续射出 10 发子弹，每发子弹的质量是 10 g，子弹离开枪口时相对步枪的速度是 800 m/s。射击前皮划艇是静止的。
 - (1) 每次射击后皮划艇的速度改变多少？
 - (2) 连续射击后皮划艇的速度是多大？
 - (3) 连续射击时枪所受到的平均反冲作用力是多大？

科学的历史不仅是一连串事实、规则和随之而来的数学描述,它也是一部概念的历史。当我们进入一个新的领域时,常常需要新的概念。

——普朗克^①

第十七章

波粒二象性



扫描电子显微镜拍摄的铀酰微晶的照片。放大倍数约为1亿倍。

最好的光学显微镜也看不到大小仅为 10^{-10} m 的原子,那是因为可见光的波长太大了。要想看到更小的东西,需要波长更短的波来帮忙! 1932年,一台神奇的显微镜出现了,它就是电子显微镜。在这种显微镜下,我们真切地看到了物质的微观结构。在电子显微镜中,电子束代替了光束!

同学们早就听说过电子了,它怎么可以代替光在显微镜中起作用? 电子及其他各种微观粒子难道也像光一样,具有波动性吗?

^① 普朗克 (M. K. E. L. Planck, 1858—1947), 德国物理学家, 量子论的奠基人之一。

1

能量量子化

思考与讨论

- (1) 在火炉旁边有什么感觉?
- (2) 投在炉中的铁块一开始是什么颜色? 过一会儿又是什么颜色?

黑体与黑体辐射 我们周围的一切物体都在辐射电磁波, 这种辐射与物体的温度有关, 所以叫做**热辐射 (thermal radiation)**。物体在室温时, 热辐射的主要成分是波长较长的电磁波, 不能引起人的视觉。当温度升高时, 热辐射中较短波长的成分越来越强。例如给一个铁块不断加热, 铁块依次呈现暗红、赤红、橘红等颜色, 直至成为黄白色。这表明, 辐射强度按波长的分布情况随物体的温度而有所不同。这是热辐射的一个特性。

除了热辐射之外, 物体表面还会吸收和反射外界射来的电磁波。常温下我们看到的物体的颜色就是反射光所致。一些物体在光线照射下看起来比较黑, 那是因为它吸收电磁波的能力较强, 而反射电磁波的能力较弱。如果某种物体能够完全吸收入射的各种波长的电磁波而不发生反射, 这种物体就是**绝对黑体, 简称黑体 (blackbody)**。

思考与讨论

一座建设中的楼房还没有安装窗子, 尽管室内已经粉刷, 如果从远处观察, 把窗内的亮度与楼房外墙的亮度相比, 你会发现什么? 为什么?

实验表明, 对于一般材料的物体, 辐射电磁波的情况除与温度有关外, 还与材料的种类及表面状况有关, 而黑体辐射电磁波的强度按波长的分布只与黑体的温度有关, 因而反映了某种具有普遍意义的客观规律。于是, 在研究热辐射的规律时, 人们特别注意对**黑体辐射 (blackbody radiation)**的研究。

黑体辐射的实验规律 加热图 17.1-1 中的空腔, 空腔内的温度不断升高, 小孔就成了不同温度下的黑体, 从小

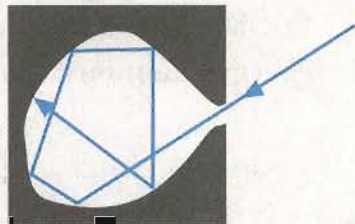


图 17.1-1 在空腔壁上开一个很小的孔, 射入小孔的电磁波在空腔内表面会发生多次反射和吸收, 最终不能从空腔射出。这个小孔就成了一个绝对黑体。

孔向外的辐射就是黑体辐射。利用分光技术和热电偶等设备,能够测出它所辐射的电磁波强度按波长的分布情况。

图17.1-2画出了四种温度下黑体热辐射的强度与波长的关系。从中可以看出,随着温度的升高,一方面,各种波长的辐射强度都有增加,另一方面,辐射强度的极大值向波长较短的方向移动。这些规律与日常经验是一致的。

物理学家总是力图用已有的知识来解释新发现的现象和规律。那么,怎样解释黑体辐射的实验规律呢?大家知道,物体中存在着不停运动的带电微粒,按照当时物理学的认识,每个带电微粒的振动都产生变化的电磁场,从而产生电磁辐射。于是,人们很自然地要依据热学和电磁学的知识寻求黑体辐射的理论解释。德国物理学家维恩(W. Wien)在1896年,英国物理学家瑞利(L. Rayleigh)在1900年,分别提出了辐射强度按波长分布的理论公式^①。

维恩公式在短波区与实验非常接近,在长波区则与实验偏离很大;瑞利公式在长波区与实验基本一致,但在短波区与实验严重不符,不但与实验不符,而且当波长趋于0时,辐射强度竟变成无穷大,这显然是荒谬的。由于波长很小的辐射处在紫外线波段,故而由理论得出的这种荒谬结果被认为是物理学理论的灾难,当时称为“紫外灾难”。

能量子 为了得出同实验相符的黑体辐射公式,德国物理学家普朗克做了多种尝试,进行了激烈的思想斗争。最后他不得不承认:微观世界的某些规律,在我们宏观世界看来可能非常奇怪。

1900年底,普朗克做出了这样的大胆假设:振动着的带电微粒的能量只能是某一最小能量值 ε 的整数倍。例如,可能是 ε 或 2ε 、 3ε ……当带电微粒辐射或吸收能量时,也是以这个最小能量值为单位一份一份地辐射或吸收的。这个不可再分的最小能量值 ε 叫做**能量子 (energy quantum)**

$$\varepsilon = h\nu$$

ν 是电磁波的频率, h 是一个常量,后人称之为**普朗克常量 (Planck constant)**,其值为

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

这个观点与宏观世界中我们对能量的认识有很大不同。例如一个宏观的弹簧振子,把

19世纪后半叶,欧洲的冶金工业迅速发展,技术人员渴望了解热辐射的规律。如果知道了辐射强度、波长分布与辐射体的温度的关系,就可以通过钢水的光谱推知钢水的温度。这种需求推动了黑体辐射的研究。

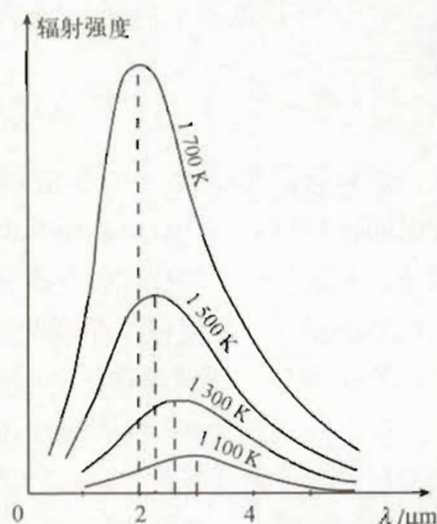


图 17.1-2 黑体辐射的实验规律

在电工学和电子技术中,频率常用 f 表示,而在研究微观世界的物理学中,频率常用希腊字母 ν 表示。

^① 瑞利公式曾被金斯(J. H. Jeans)修正过,所以也称瑞利-金斯公式。

小球推离平衡位置后开始振动, 能量为 E 。下一次我们可以把它推得稍远一些, 使它振动的能量稍多一些, 例如 $1.2E$ 或 $1.3E$, 也可以把它推得更远, 能量更大, 例如 $2.7E$ 或 $3.3E$ 。弹簧振子的能量不一定是某个最小值的整数倍。只要在弹性限度以内, 我们可以把小球推到任何位置, 它的能量可以是任何值。对于弹簧振子的情况, 我们说能量值是连续的; 而普朗克的假设则认为微观粒子的能量是量子化的, 或说微观粒子的能量是分立的。

借助于能量子的假说, 普朗克得出了黑体辐射的强度按波长分布的公式, 与实验符合之好令人击掌叫绝, 如图 17.1-3 所示。

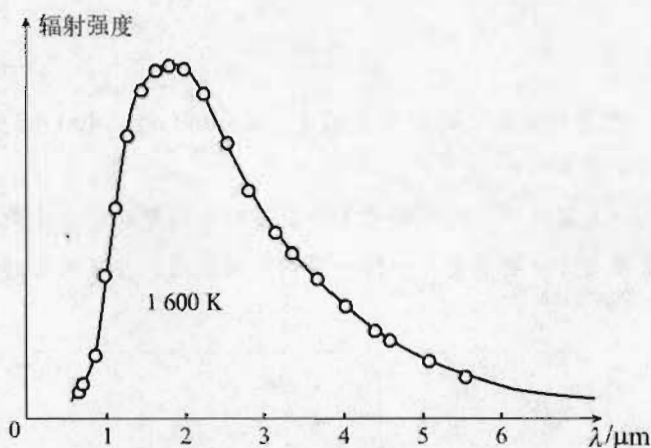


图 17.1-3 普朗克公式与实验结果的比较。曲线是根据普朗克的公式作出的, 小圆代表实验值。

对于一位物理学家, 还有什么能比自己的理论被实验证实更为欢欣鼓舞吗? 然而, 普朗克的情绪却被某种思考破坏了。

在很长的历史时期内, 不仅是物理学界, 就是整个科学和哲学界都认为, 一切自然过程都是连续的。数学家、哲学家莱布尼兹 (G. W. F. von Leibniz, 1646—1716) 曾经说道: “自然界不会突变。如果要对此提出疑问, 那么世界将会出现许多间隙, 这就迫使我们去乞求神灵来解释自然现象了。间断性同科学格格不入。”正是这样的信条使普朗克惶惑。他对儿子说, 自己的发现“要么是荒诞无稽的, 也许也许是牛顿以来物理学最伟大的发现之一。”



普朗克
(M. Planck, 1858—1947)

物理学后来的发展表明, 普朗克在 1900 年把能量子引入物理学, 正确地破除了“能量连续变化”的传统观念, 成为新物理学思想的基石之一。因此, 这不仅是日历上一个新世纪的开始, 而且是物理学的一个新纪元。18 年之后, 普朗克为此获得了诺贝尔物理学奖。

在科学发展的历程中, 一种新的思想, 一种新的观念, 要让人们接受, 也包括让最早萌生这种思想和观念的人自己完全接受, 需要时间, 也需要更多的人对这种思想和观念的深入

解析。至于微观世界量子化的观念，正像普朗克自己所说的那样，是后来的爱因斯坦，跨出了真正说明物质世界量子性质的第一步。

问题与练习

1. 以下宏观概念中，哪些是“量子化”的？
 - A. 物体的长度
 - B. 物体所受的重力
 - C. 物体的动能
 - D. 人的个数
2. 光是一种电磁波，可见光的波长的大致范围是 $400 \sim 760 \text{ nm}$ 。 400 nm 、 760 nm 电磁辐射的能量子 ϵ 的值是多少？
3. 在一杯开水中放入一支温度计，开水静置室内，可以看到开水的温度是逐渐降低的。既然从微观的角度来看开水的能量是一份一份向外辐射的，为什么它的温度不是一段一段地降低呢？

2

光的粒子性

光究竟是什么？这似乎不应再是一个问题。因为从19世纪初开始，托马斯·杨、菲涅耳、马吕斯等分别观察到了光的干涉、衍射和偏振现象，这等于对微粒说宣判了死刑。19世纪60年代和80年代，麦克斯韦和赫兹先后从理论上和实验上确认了光的电磁波本质，光的波动理论似乎已经完美了。

既然如此，为什么又要谈论“光的粒子性”呢？

不断发现和认识新现象，进而理解事物的本性，这是一切科学发展的必由之路。人类对光的研究也是如此。重新提出“光的粒子性”，恰恰展示了曲折的认识过程。科学在这里又一次转折……

演示

把一块锌板连接在验电器上，并使锌板带负电，验电器指针张开。用紫外线灯照射锌板（图17.2-1），观察验电器指针的变化。

这个现象说明了什么问题？

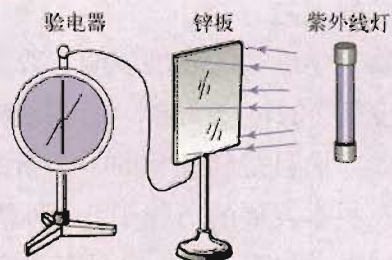


图 17.2-1 观察光电效应

光电效应的实验规律 1887年,赫兹在研究电磁波的实验中偶尔发现,接收电路的间隙如果受到光照,就更容易产生电火花。这就是最早发现的光电效应,也是赫兹细致观察的意外收获。后来这一现象引起许多物理学家的关注。德国物理学家P. 勒纳德 (P. Lenard)、英国物理学家J. J. 汤姆孙 (J. J. Thomson, 1856—1940) 等相继进行了实验研究,证实了这个现象,即照射到金属表面的光,能使金属中的电子从表面逸出。这个现象称为**光电效应 (photoelectric effect)**,这种电子常被称为光电子。

可以用图 17.2-2 的电路研究光电效应中电子发射的情况与照射光的强弱、光的颜色 (频率) 等物理量间的关系。

阴极K和阳极A是密封在真空玻璃管中的两个电极,K在受到光照时能够发射光电子。K与A之间电压的大小可以调整,电源的正负极也可以对调。电源按图示极性连接时,阳极A吸收阴极K发出的光电子,在电路中形成光电流。

实验发现了以下规律。

- **存在着饱和电流** 在光照条件不变的情况下,随着所加电压的增大,光电流趋于一个饱和值。也就是说,在电流较小时电流随着电压的增大而增大;但当电流增大到一定值之后,即使电压再增大,电流也不会增大了,如图 17.2-3 所示。

这说明,在一定的光照条件下,单位时间内阴极K发射的光电子的数目是一定的,电压增加到一定值时,所有光电子都被阳极A吸收,这时即使再增大电压,电流也不会增大。

实验表明,在光的颜色不变的情况下,入射光越强,饱和电流越大。这表明对于一定颜色的光,入射光越强,单位时间内发射的光电子数越多。

- **存在着遏止电压和截止频率** 当所加电压 U 为 0 时,电流 I 并不为 0。只有施加反向电压,也就是阴极接电源正极、阳极接电源负极,在光电管两极间形成使电子减速的电场,电流才有可能为 0。使光电流减小到 0 的反向电压 U_c 称为**遏止电压**。遏止电压的存在意味着光电子具有一定的初速度,初速度的上限 v_c 应该满足以下关系

$$\frac{1}{2} m_e v_c^2 = eU_c \quad (1)$$

实验表明,对于一定颜色 (频率) 的光,无论光的强弱如何,遏止电压都是一样的。光的频率 ν 改变时,遏止电压 U_c 也会改变,如图 17.2-3 所示。这表明光电子的能量只与入射光的频率有关,而与入射光的强弱无关。

从实验中还可以看出,当入射光的频率减小到某一数值 ν_c 时,即使不施加反向电压也没有光电流,这表明已经没有光电子了。 ν_c 称为**截止频率 (cutoff frequency)** 或极限频率。这就是说,当入射光的频率低于截止频率时不发生光电效应。实验表明,不同金属的截止频率不同。

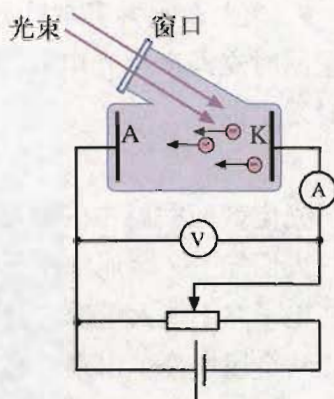


图 17.2-2 研究光电效应的电路图

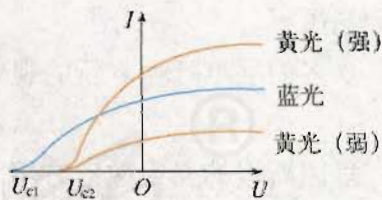


图 17.2-3 光电流与电压的关系

● **光电效应具有瞬时性** 当频率超过截止频率 ν_c 时,无论入射光怎样微弱,几乎在照到金属时立即产生光电流。精确测量表明产生电流的时间不超过 10^{-9} s,即光电效应几乎是瞬时发生的。

光电效应解释中的疑难 光的电磁理论只能部分地解释光电效应。

人们知道,金属中原子外层的价电子会脱离原子而做无规则的热运动。但在温度不很高时,电子并不能大量逸出金属表面,这表明金属表面层内存在一种力,阻碍电子的逃逸。电子要从金属中挣脱出来,必须克服这种阻碍做功。使电子脱离某种金属所做功的最小值,叫做这种金属的**逸出功 (work function)**,用 W_0 表示。不同金属的逸出功不同,见表1。

表1 几种金属的逸出功和极限频率^①

金属	钨	钙	钠	钾	铷
$\nu_c / 10^{14}$ Hz	10.95	7.73	5.53	5.44	5.15
W_0 / eV	4.54	3.20	2.29	2.25	2.13

当光照射金属表面时,电子吸收能量。若电子吸收的能量与原有的热运动能量之和超过逸出功,电子就从表面逸出,这就是光电子。光越强,逸出的电子数越多,光电流也就越大。这些结论与实验相符。

但是,按照光的电磁理论,还应得出如下结论:①光越强,光电子的初动能应该越大,所以遏止电压 U_c 应该与光的强弱有关;②不管光的频率如何,只要光足够强,电子都可以获得足够能量从而逸出表面,不应存在截止频率;③如果光很弱,按经典电磁理论估算,电子需要几分钟到十几分钟的时间才能获得逸出表面所需的能量,这个时间远远大于 10^{-9} s。这些结论与实验结果相矛盾。此外,对于遏止电压 U_c 与光的频率 ν 的关系,经典电磁理论更是无法解释。

众多的疑难呼唤着新的观念、新的思想、新的理论。

爱因斯坦的光电效应方程 普朗克能量子假说是对经典物理学思想与观念的一次突破,连普朗克本人都很犹豫,多数物理学家自然更难接受。所以在开始的几年里它没有受到重视,物理学界几乎没有去讨论它。最早认识到能量子意义的是年轻的爱因斯坦,他在1905年发表了《关于光的产生和转化的一个试探性观点》一文。他表示,普朗克关于辐射问题的崭新观点还不够彻底,仅仅认为电磁波在吸收和辐射时才显示出不连续性,这还不够,实际上电磁辐射本身就是不连续的,也就是说,光不仅在发射和吸收时能量是一份一份的,而且光本身就是由一个个不可分割的能量子组成的,频率为 ν 的光的能量子为 $h\nu$, h 为普朗克常量。这些能量子后来称为**光子 (photon)**。

常温下金属中电子的热运动能量约为 4×10^{-2} eV,比产生光电效应的光子能量 $h\nu$ (约75 eV)小得多,可以忽略。

① 当金属表面涂敷其他物质时,逸出功会有显著改变。

按照爱因斯坦的理论,在光电效应中,金属中的电子吸收一个光子获得的能量是 $h\nu$, 这些能量的一部分用来克服金属的逸出功 W_0 , 剩下的表现为逸出后电子的初动能 E_k , 即

$$h\nu = E_k + W_0$$

或

$$E_k = h\nu - W_0 \quad (2)$$

式中 E_k 为光电子的最大初动能, $E_k = \frac{1}{2}m_e v^2$ 。

上面 (2) 式称为爱因斯坦光电效应方程。从下面的讨论可以看出, 这个方程使得光电效应中理论与实验的矛盾迎刃而解。

- 爱因斯坦方程表明, 光电子的最大初动能 E_k 与入射光的频率 ν 有关, 而与光的强弱无关。只有当 $h\nu > W_0$ 时, 才有光电子逸出, $\nu_c = \frac{W_0}{h}$ 就是光电效应的截止频率。

- 电子一次性吸收光子的全部能量, 不需要积累能量的时间, 光电流自然几乎是瞬时产生的。

- 对于同种颜色 (频率 ν 相同) 的光, 光较强时, 包含的光子数较多, 照射金属时产生的光电子较多, 因而饱和电流较大。

爱因斯坦提出光电效应的解释时, 实验测量尚不精确, 加上这种观点与以往的观点大相径庭, 因此并未立即得到承认, 甚至被说成是“在思辨中迷失目标”的“冒昧的假设”。

思考与讨论

爱因斯坦光电效应方程给出了光电子的最大初动能 E_k 与入射光的频率 ν 的关系。但是, 很难直接测量光电子的动能, 容易测量的是遏止电压 U_c 。怎样根据 (1)、(2) 两式得到 U_c 与 ν 、 W_0 的关系?

从 1907 年起, 美国物理学家密立根 (R. A. Millikan, 1868—1953) 开始以精湛的技术测量光电效应中几个重要的物理量。他的目的是: 测量金属的遏止电压 U_c 与入射光的频率 ν , 由此算出普朗克常量 h , 并与普朗克根据黑体辐射得出的 h 相比较, 以检验爱因斯坦光电效应方程的正确性。

实验的结果是, 两种方法得出的普朗克常量 h 在 0.5% 的误差范围内是一致的。密立根后来写道: “经过十年之久的实验……与我自己的预料相反, 这项工作终于成了爱因斯坦方程式在很小误差范围内的直接实验证据。”

爱因斯坦由于发现了光电效应的规律而获得 1921 年的诺贝尔物理学奖。

光子像其他粒子一样, 也具有能量。光电效应显示了光的粒子性。

电子吸收光子后从金属中逸出时, 除了要做逸出功外, 有时还要克服原子的其他束缚而做功, 这时光电子的初动能就比 (2) 式中的 E_k 小。因此, 以下把 E_k 称做“最大”初动能。

在本节稍后的部分我们将会看到, 光子像其他粒子一样, 不但具有能量, 也具有动量。

例题 下表是按照密立根的方法进行实验时得到的某金属的 U_c 和 ν 的几组数据。

U_c / V	0.541	0.637	0.714	0.809	0.878
$\nu / 10^{14} \text{ Hz}$	5.644	5.888	6.098	6.303	6.501

试作出 U_c - ν 图象并通过图象求出：

- (1) 这种金属的截止频率；
- (2) 普朗克常量。

分析 本节(1)式可以写成

$$E_k = eU_c \quad (3)$$

它给出了光电子的最大初动能 E_k 与遏止电压 U_c 的关系。(2) 式则给出了最大初动能 E_k 与光的频率 ν 的关系。(3) 式和(2) 式结合, 消去 E_k , 解出 U_c , 得到

$$U_c = \frac{h}{e} \nu - \frac{W_0}{e} \quad (4)$$

本题中逸出功 W_0 是确定的, 电子电荷 e 和普朗克常量 h 都是常量。所以, (4) 式表明遏止电压 U_c 与光的频率 ν 之间是一次函数的关系, 即线性关系, U_c - ν 图象是一条斜率为 $\frac{h}{e}$ 的直线。

初中数学已经学过, 形式为 $y = kx + b$ 的一次函数的图象是一条斜率为 k 的直线。

遏止电压 U_c 与光电子的最大初动能有关, 最大初动能越大, 遏止电压越高; 遏止电压为 0, 表示光电子的最大初动能也是 0, 即没有光电子。与遏止电压 $U_c = 0$ 对应的频率应该是截止频率 ν_c 。

U_c - ν 直线的斜率可以从图中测量, 因此作出图象就能求出 h 。

解 以频率 ν 为横轴, 以遏止电压 U_c 为纵轴, 根据表中数据选取适当比例, 描点后作直线拟合这些点, 得到 U_c - ν 图象如图 17.2-4 所示。

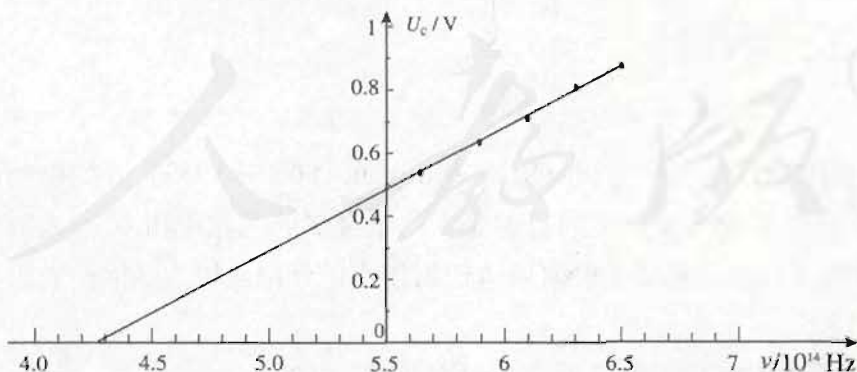


图 17.2-4 例题的 U_c - ν 图象

为了作图的方便, 图 17.2-4 中两个坐标轴的交点没有选在原点, 读图时要注意。

(1) 前面(4) 式中 $U_c = 0$ 对应的频率 ν_c 即为截止频率, 从图象上看, $U_c = 0$ 的点就是直线与横轴的交点。由图读出, 这种金属的截止频率为

$$\nu_c = 4.27 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

(2) 在图中选取两个与直线偏离最小的点, 即表中第 1 列和第 5 列数据, 由它们计算直

线的斜率 $\frac{h}{e}$

$$\frac{h}{e} = \frac{\Delta U_c}{\Delta \nu} = \frac{0.878 - 0.541}{6.501 - 5.644} \times 10^{-14} \text{ V} \cdot \text{s} = 3.93 \times 10^{-15} \text{ V} \cdot \text{s}$$

已知 $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, 因而求得普朗克常量

$$h = 6.30 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

思考与讨论

白天的天空各处都是亮的; 航天员在大气层外飞行时, 尽管太阳的光线耀眼刺目, 其他方向的天空却是黑的, 甚至可以看见星星。这是为什么?

康普顿效应 光在介质中与物质微粒相互作用, 因而传播方向发生改变, 这种现象叫做光的散射 (scattering of light)。1918—1922 年, 美国物理学家康普顿 (A. H. Compton, 1892—1962) 在研究石墨对 X 射线的散射时, 发现在散射的 X 射线中, 除了与入射波长 λ_0 相同的成分外, 还有波长大于 λ_0 的成分, 这个现象称为康普顿效应 (Compton effect)。康普顿的学生, 中国留学生吴有训 (1897—1977) 测试了多种物质对 X 射线的散射, 证实了康普顿效应的普遍性。

按照经典物理学的理论, 由于光是电磁振动的传播, 入射光引起物质内部带电微粒的受迫振动, 振动着的带电微粒从入射光吸收能量, 并向四周辐射, 这就是散射光。散射光的频率应该等于带电粒子受迫振动的频率, 也就是入射光的频率, 因而散射光的波长与入射光的波长应该相同, 不会出现 $\lambda > \lambda_0$ 的散射光。经典理论与实验事实又一次出现了矛盾。

康普顿用光子的模型成功地解释了这种效应。他的基本思想是: X 射线的光子不仅具有能量, 也像其他粒子那样具有动量, X 射线的光子与晶体中的电子碰撞时要遵守能量守恒定律和动量守恒定律, 求解这些方程, 可以得出散射光波长的变化值 $\Delta\lambda$ 。理论结果与实验符合得很好。

光电效应和康普顿效应深入地揭示了光的粒子性的一面。前者表明光子具有能量, 后者表明光子除了具有能量之外还具有动量。康普顿因此获得了 1927 年的诺贝尔物理学奖。

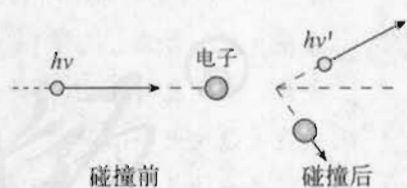


图 17.2-5 光子既有能量也有动量

光子的动量 在狭义相对论中我们已经知道, 一定的质量 m 与一定的能量 E 相对应: $E = mc^2$ 。一个光子的能量是 $h\nu$, 即 $h\nu = mc^2$, 所以它的质量是 $m = \frac{h\nu}{c^2}$ 。借用质子、电子等粒子动量的定义: 动量 = 质量 $\times$ 速度, 可得光子

这里得出的光子质量是它的相对论质量。由于光子不能静止下来, 所以它没有静止质量。

的动量

$$p = mc = \frac{h\nu}{c^2} \cdot c = \frac{h\nu}{c}$$

考虑到

$$\frac{c}{\nu} = \lambda$$

所以,光子的动量为

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

你是否已经注意到,光子的能量表达式 $\varepsilon = h \cdot \nu$ 与动量表达式 $p = h / \lambda$ 具有高度对称性!

在康普顿效应中,当入射的光子与晶体中的电子碰撞时,要把一部分动量转移给电子,因而光子动量变小。从 $p = \frac{h}{\lambda}$ 看,动量 p 减小意味着波长 λ 变大,因此有些光子散射后波长变大。从动量守恒定律和能量守恒定律出发,按照动量表达式 $p = \frac{h}{\lambda}$ 和能量表达式 $\varepsilon = h\nu$ 对康普顿效应做定量分析,其结论与实验事实符合得很好。

问题与练习

1. 在可见光范围内,哪种色光的光子能量最大?想想看,这种光是否一定最亮?为什么?
2. 在光电效应实验中
 - (1) 如果入射光的波长确定而强度增加,将产生什么结果?
 - (2) 如果入射光的频率增加,将产生什么结果?
3. 金属A在一束绿光照射下恰能发生光电效应,现用紫光或红光照射时,能否发生光电效应?紫光照射A、B两种金属都能发生光电效应时,为什么逸出金属表面的光电子的最大速度大小不同?
4. 铝的逸出功是4.2 eV,现在将波长200 nm的光照射铝的表面。
 - (1) 求光电子的最大初动能。
 - (2) 求遏止电压。
 - (3) 求铝的截止频率。
5. 根据图17.2-2所示的电路,利用能够产生光电效应的两种(或多种)频率已知的光来进行实验,怎样测出普朗克常量?根据实验现象说明实验步骤和应该测量的物理量,写出根据本实验计算普朗克常量的关系式。
6. 假如一个光子与一个静止的电子碰撞而被散射,散射光子的频率与原来光子的频率相比哪个大?为什么?

光的波粒二象性 从古代光的微粒说,到托马斯·杨和菲涅耳的光的波动说,从麦克斯韦的光的电磁理论,到爱因斯坦的光子理论,人类对光的认识构成了一部科学史诗。如果现在要问光的本性是什么,我们的回答是:光既具有波动性,又具有粒子性,即光具有**波粒二象性 (wave-particle dualism)**。

上节我们已经分析,光子的能量 ε 和动量 p 可以表示为

$$\varepsilon = h\nu$$

和

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

它们是描述光的性质的基本关系式。能量 ε 和动量 p 是描述物质的粒子性的重要物理量;波长 λ 或频率 ν 是描述物质的波动性的典型物理量。两式左侧的物理量 ε 和 p 描述光的粒子性,右侧的物理量 ν 和 λ 描述光的波动性,它们通过普朗克常量 h 联系在一起。这里我们可以从一个侧面感觉到普朗克常量的重要性: h 架起了粒子性与波动性之间的桥梁。

粒子的波动性 1924年,法国巴黎大学的德布罗意考虑到普朗克能量子和爱因斯坦光子理论的成功,在博士学位论文中大胆地把光的波粒二象性推广到实物粒子,如电子、质子等。他写道:“整个世纪^①以来,在光学上,与波动方面的研究相比,忽视了粒子方面的研究;而在实物粒子的研究上,是否发生了相反的错误的呢?是不是我们把粒子方面的图像想得太多,而忽视了波的现象?”于是,他提出假设:**实物粒子也具有波动性**,即每一个运动的粒子都与一个对应的波相联系,而且粒子的能量 ε 和动量 p 跟它所对应的波的频率 ν 和波长 λ 之间,也像光子跟光波一样,遵从如下关系

$$\nu = \frac{\varepsilon}{h} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (2)$$

这种与实物粒子相联系的波后来称为**德布罗意波 (de Broglie wave)**,也叫做**物质波 (matter wave)**。

德布罗意关于实物粒子具有波动性的假说,就像光具有粒子性一样,从以往物理学的观



德布罗意
(L.V. de Broglie, 1892 — 1987)

^① 指19世纪。

点来看是无法理解的。光的粒子性被光电效应和康普顿效应所证实,已经无可怀疑了。可是,似乎纯粹以类比方法提出的德布罗意波,实在超越了人们的想像力,以至于德布罗意本人也说,他的这些思想,很可能被看做“没有科学特征的狂想曲”。

然而,在读罢德布罗意的论文后,爱因斯坦却说:“瞧瞧吧,看似疯狂,不过的确站得住脚!”

物质波实验验证 虽然当时爱因斯坦肯定了德布罗意关于实物粒子具有波动性的想法,但真正判定德布罗意的假说是否“站得住脚”的还只能是实验。

我们知道,光的干涉和衍射现象是光具有波动性的有力证据。因此,如果电子、质子等实物粒子也真的具有波动性,那么它们就应该像光波那样也能发生干涉和衍射。这是验证德布罗意波是否存在的一条途径。

我们还知道,光虽然具有波动性,但并不是任何情况下都能发生明显的干涉和衍射。用来显示波动性的狭缝或障碍物的线度要足够小才行。于是,一个关系到物质世界真实图景的理论问题,就与一个实践上的技术问题联系起来了。人们能够制作或找到这样的装置吗?

在20世纪20年代,那些关心物质波实验验证的物理学家们,说起来实在太幸运了。因为他们在技术上的这一难题已经解决,那是在对伦琴射线的研究中解决的。

在伦琴射线发现后的十多年间,这种射线到底是不是波长很短的电磁波,尚无定论。1912年,德国物理学家劳厄(M. von Laue)提议,利用晶体中排列规则的物质微粒作为衍射光栅,来检验伦琴射线的波动性。实验获得了成功,证实伦琴射线就是波长为十分之几纳米的电磁波。

考虑到电子的德布罗意波长与伦琴射线的波长具有相近的数量级,1927年戴维孙(C. J. Davisson)和G. P. 汤姆孙(G. P. Thomson)分别利用晶体做了电子束衍射的实验,得到了类似图17.3-1的衍射图样,从而证实了电子的波动性。他们为此获得了1937年的诺贝尔物理学奖。

除了电子以外,后来还陆续证实了质子、中子以及原子、分子的波动性。对于这些粒子,德布罗意给出的 $\nu = \frac{E}{h}$ 和 $\lambda = \frac{h}{p}$ 关系同样正确。1929年,德布罗意获得了诺贝尔物理学奖,成为以学位论文获此殊荣的人。

宏观物体的质量比微观粒子大得多,它们运动时的动量很大,根据(2)式可知,它们对应的德布罗意波的波长就很小。例如,一个质量为0.01 kg、速度为300 m/s的子弹,它的德布罗意波长只有 2.2×10^{-34} m,比宏观物体的尺度小得多,根本无法观察到它的波动性。而一个原来静止的电子,在经过100 V电

说是幸运,其实也是必然。平时说得比较多的是科学的成就推动了技术的进步;实际上,没有生产的需求,没有技术提供的物质手段,科学也不会发展。



图17.3-1 电子束穿过铝箔后的衍射图样

有趣的是,G. P. 汤姆孙的父亲J. J. 汤姆孙因发现电子而获诺贝尔奖,他则由于验证了电子的波动性而获诺贝尔奖。这成了科学史上的佳话而留传。

压加速后，德布罗意波长约为 0.12 nm ，因此有可能观察到电子的波动性。

科学漫步

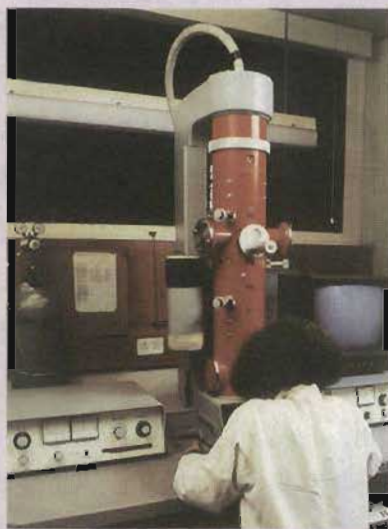
显微镜的分辨本领

生物实验室里的显微镜利用可见光工作，是光学显微镜。最好的光学显微镜能够分辨 200 nm 大小的物体，可以看到最小的细菌。大多数病毒比细菌小得多，光学显微镜就无能为力了。技术在不断发展，人们可以制造更为精良的光学显微镜。那么，它的分辨本领能不能无限提高呢？不能。衍射现象限制了光学显微镜的分辨本领。

大家知道，波长越长，衍射现象越明显。噪音的波长在 1 m 左右，所以我们能够听见墙后面人们的谈话声，这是声音的衍射。可见光的波长为 $400 \sim 700 \text{ nm}$ ，日常生活中的物体大小比可见光的波长大多得多，光的衍射现象不明显，所以我们才说光沿直线传播。但是，显微镜的精度很高，物镜的直径又不大，所以衍射现象不能忽略。由于衍射，被观察物体上的一个光点经过透镜以后不再会聚成一个光点，而形成一光斑，这样物体的像就模糊了，影响了显微镜的分辨本领。

电子束也是一种波。如果把电子加速，使它的动量很大，它的德布罗意波长会比可见光的波长短得多，衍射现象的影响就小多了。这样就有可能大大提高分辨能力。这种使用电子束工作的显微镜叫做电子显微镜。肉眼不能看见电子束，可以让电子束打在荧光板上观察显微图像，不过通常的做法是用感光胶片或光电转换器件代替荧光板，得到微小物体的显微照片。现代电子显微镜的分辨本领可以达到 0.2 nm ，能够看到蛋白质分子和金属的晶体结构。

右图是一台电子显微镜。竖直圆筒的上下两端分别装着负极和正极，电压最高可达 1 MV 。电子在两个电极间加速。由于电压越高电子最终获得的动量越大，它的波长越短，分辨本领也就越强，所以电子显微镜分辨本领的大小常用它的加速电压来表示。



电子显微镜

问题：从减轻衍射影响这方面提高显微镜的分辨本领有哪两个途径？电子显微镜采用了哪个途径？如果显微镜用质子流而不是电子流工作，它们加速后的速度相同，哪种显微镜的分辨本领有可能更高？

问题与练习

1. 我们根据什么说光具有波粒二象性?
2. 一个电子和一个质子具有同样的动能时, 它们的德布罗意波长哪个大?
3. 射击运动员射击时会因为子弹的波动性而“失准”吗? 为什么? 根据现实情况下子弹质量、速度大小所对应的德布罗意波长来做定性说明。

4

概率波

经典的粒子和经典的波 在分析物理现象、建立科学理论时, 对于研究对象, 物理学家建立了粒子模型和波动模型。利用这些模型, 他们解释了众多科学问题, 例如用波动模型解释了声音的干涉和衍射, 用粒子模型的分子动理论解释了气体的压强, 等等。这一切使人们形成了一种观念, 物质要么具有粒子性, 要么具有波动性, 非此即彼!

在经典物理学的观念中, 粒子有一定的空间大小, 有一定的质量, 有的还具有电荷。由于它们遵从牛顿运动定律, 所以只要已知它们的初始位置和初始速度, 就可以准确地确定以后任意时刻的位置和速度, 进而在空间描绘出确定的轨迹。虽然可能因为问题太复杂, 当今的数学工具还解决不了, 或者因为涉及的对象太多、计算量太大, 现代的计算机也不能胜任, 但从理论上说, 这都是技术问题, 总有一天能解决的。因此, 任意时刻的确定的位置_{和速度}以及时空中的确定的轨道, 是经典物理学中粒子运动的基本特征。

与经典的粒子不同, 经典的波在空间是弥散开来的, 其特征是具有频率和波长, 也就是具有时空的周期性。

显而易见, 在经典物理学中, 波和粒子是两种不同的研究对象, 具有非常不同的表现。那么, 对于光和电子、质子等粒子, 这两种互不相容的属性又是怎样“集于一身”的?

概率波 为了了解光和德布罗意波是什么样的波, 我们还是从光的波粒二象性入手。

光的双缝干涉实验如图 17.4-1 所示。从光源 S 发出的光通过双缝 S_1 和 S_2 后在屏上形成明暗条纹。按照光的波动理论, 条纹的明暗表示到达屏上的光的强度不同。按照光子的模型, 每个同频光子都带有相同的一份能量, 所以条纹明暗的分布应该是到达屏上的光子数目多少的

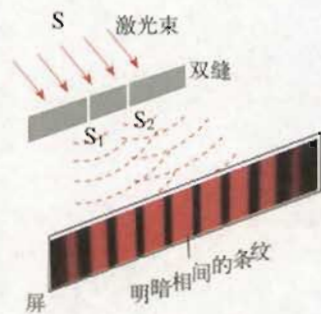


图 17.4-1 光的双缝干涉

分布,也就是说,光的强弱对应于光子的数目,明纹处到达的光子数多,暗纹处到达的光子数少。

这是否可以认为,在一束光中,是光子之间的相互作用使它表现出了波动性,而不是光子本身就具有波动性呢?

为了弄清这个问题,我们可以使光源S非常弱,以致它在前一个光子到达屏幕之后才发射第二个光子,这样就排除了光子之间相互作用的可能性。实验结果表明,尽管单个光子的落点不可预知,但是长时间曝光之后仍然得到图17.4-1那样的条纹分布。可见,光的波动性不是光子之间的相互作用引起的,而是光子自身固有的性质。

现在的问题是,一个光子通过狭缝后到底落在屏上的哪一点呢?对此,1926年德国物理学家玻恩(M. Born, 1882—1970)指出:虽然不能肯定某个光子落在哪一点,但由屏上各处明暗不同这个事实可以推知,光子落在各点的概率是不一样的,即光子落在明纹处的概率大,落在暗纹处的概率小。这就是说,光子在空间出现的概率可以通过波动的规律确定。所以,从光子的概念上看,光波是一种**概率波(probability wave)**。

对于电子和其他微观粒子,由于同样具有波粒二象性,所以与它们相联系的德布罗意波也是概率波。也就是说,单个粒子的位置是不确定的,但在某点附近出现的概率的大小可以由波动的规律确定。对于大量粒子,这种概率分布导致确定的宏观结果,例如衍射条纹的分布等。图17.4-2是电子通过双缝的结果。图甲表示100多个电子通过双缝后的干涉图样,可以看到每一个电子都是一个点,体现了电子的粒子性。图乙、丙分别表示3 000多个、70 000多个电子通过双缝后的干涉图样。随着电子数的增加,规则的条纹越来越明显。

我们在《物理选修3-3》中已经了解了概率的概念。例如,抛出的硬币回落时某面向上的概率等。但是,在抛掷硬币这类宏观实验中观察到的概率,与量子理论中的概率有重要区别。

原则上,只要我们对抛硬币时手指用力的大小、方向,以及硬币的高度、桌面的弹性等有足够多的信息,就有可能用牛顿物理学预言出每次抛掷的结果。但是,对于量子事件,甚至原则上就是不可预言的:“大自然自己也不知道她下一步要做什么。”



图17.4-2 电子干涉条纹对概率波的验证

问题与练习

1. 有人说光的波动性是光子之间相互作用的结果, 你认为对吗? 可以通过怎样的实验说明你的观点?
2. 在光的双缝干涉实验中, 某光子打在光屏上的落点能预测吗? 大量的光子打在光屏上的落点是否有规律? 请用概率波的观点解释双缝干涉图样的形成。
3. 我们能感知光现象, 是因为我们接收到了一定能量的光。一个频率是 10^6 Hz 的无线电波的光子的能量是多大? 一个频率为 6×10^{14} Hz 的绿色光子和 10^{18} Hz 的 γ 光子的能量各是多大? 请结合以上光子能量的大小, 从概率波的角度说明: 为什么低频电磁波的波动性显著而高频电磁波的粒子性显著。

5

不确定性关系

不确定性关系 我们再次考虑光的单缝衍射实验。

如果光子是经典的粒子, 它在从光源飞向屏的过程中不受力的作用, 应该做匀速直线运动, 它在屏上的落点应该在缝的投影之内, 如图17.5-1甲。但是, 由于衍射, 它到达屏上的位置会超出单缝投影的范围(图17.5-1乙)。由于其他粒子也具有波动性, 所以其他粒子经过单缝时也有同样的现象。这说明, 微观粒子已经不再遵守牛顿运动定律! 实际上, 通过下面的分析马上就会看到, 我们根本不能像必修物理中学习的那样, 同时用质点的位置和动量(当时用的是速度)来描述微观粒子的运动!



图 17.5-1 光的单缝衍射

单缝衍射时, 屏上各点的亮度反映了粒子到达这点的概率。如果把这个概率的分布在坐标系中表示出来, 就是图17.5-2右侧的曲线。

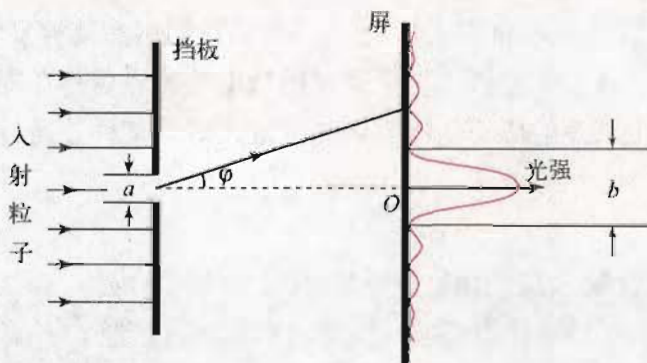


图 17.5-2 粒子通过狭缝时发生衍射。狭缝的宽度代表粒子位置的不确定范围，中央亮条的宽度代表粒子动量的不确定范围。

入射的粒子有确定的动量，但它们可以处于挡板左侧的任何位置，也就是说，粒子在挡板左侧的位置是完全不确定的。对于通过挡板狭缝的粒子则可以说，它们的位置被狭缝限定了，它们的位置不确定量减小了（不过我们仍然不能准确地说出射到屏上的粒子在通过狭缝时的准确位置，因为缝有一定的宽度 a ）。从下面的分析可以知道，粒子的动量的不确定量却增大了。

微观粒子具有波动性，会发生衍射，大部分粒子散布在宽度为 b 的中央亮条之内。这些粒子在到达狭缝之前沿着图 17.5-2 中的水平方向运动，而在经过狭缝之后有些粒子跑到缝的投影位置以外，我们可以说这些粒子具有了与其原来运动方向垂直的动量。由于哪个粒子到达屏上的哪个位置完全是随机的，所以粒子在垂直方向上的动量也具有不确定性，不确定量的大小可以由中央亮条的宽度来衡量。

为了更准确地测定通过狭缝的粒子的位置，我们可以选用更窄的狭缝。但是，从衍射的规律可以知道，狭缝越窄，屏上中央亮条就越宽。这表明，尽管更窄的狭缝可以更准确地测得粒子的位置，但粒子动量的不确定量却更大了。

利用数学方法对微观粒子的运动进行分析可以知道，如果以 Δx 表示粒子位置的不确定量，以 Δp 表示粒子在 x 方向上的动量的不确定量，那么

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

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

在经典物理学中，可以同时用质点的位置和动量精确地描述它的运动。不但如此，如果知道了质点的加速度，还可以预言质点在以后任意时刻的位置和动量，从而描绘它运动的轨迹。

但是，在微观物理学中，不确定关系告诉我们，如果要更准确地确定粒子的位置（即 Δx 更小），那么动量的测量一定会更不准确（即 Δp 更大），也就是说，不可能同时准确地知道粒子的位置和动量，因而也就不可能用“轨迹”来描述粒子的运动。

我们不可能准确地知道单个粒子的运动情况，但是可以准确地知道大量粒子运动时的统

计规律。一个宏观系统总是包含着大量粒子，因此我们仍然能够对宏观现象进行预言。例如，当粒子数很少时，我们不能预言粒子通过挡板上的狭缝后落在屏上的位置，但却可以准确地知道粒子落在屏上某点的概率；概率大的位置正好是某种波通过狭缝发生衍射时产生亮条的位置。

物理模型与物理现象 在经典物理学中，对于不同的宏观对象，我们分别建立了粒子模型和波动模型，它们与直接经验一致。然而，对于微观世界的属性，人类缺少直接感知。在这种情况下，我们也要设想一些模型，用来分析和研究它们的规律，尽管以日常经验来衡量，这种模型的行为十分古怪。粒子的波粒二象性就是如此，以至于爱因斯坦说，这个任务对我们的想像力来说是力所不及的。但是，只要它与实验结果一致，它就能够在一定范围内正确代表研究的对象。

根据德布罗意提出的关系 $\lambda = \frac{h}{p}$ ，可以肯定地说，波动性是所有运动物体都具有的，不管是一个电子，还是一颗飞行的子弹，乃至一个星球……只不过子弹和星球的动量太大，波长要比原子和电子的波长小得多，因而难于观察到它们的波动图景。

在波粒二象性和不确定关系的基础上建立的量子力学堪称一件科学的艺术品，它的预言与实验惊人地一致，而它的成功应用更是遍及现代社会的每个角落。没有量子力学就没有现代半导体材料。从电子表、电视机到核电站和计算机，无不留下量子的足迹。是量子力学引领我们迈入了现代社会，让我们享受到丰富多彩的现代生活。

但是，对于“量子”的图景、物理解释和哲学意义，却一直存在着严重的分歧和激烈的争论。

作为20世纪最伟大的物理学家之一，爱因斯坦对量子理论的思索比对相对论的考虑要多得多。即便如此，他在晚年也只好承认：“整整50年有意识的思考，并没有使我更接近‘光量子是什么’这个问题的答案。”

然而，越困难、越具有挑战性的问题，就越让人类的好奇心无法割舍。这种思考和争论仍在继续着……

自然科学并不是自然本身，它是人类和自然关系的一部分。

——海森伯^①

科学漫步

量子力学

量子力学是关于微观粒子运动规律的基本理论。微观粒子表现出一系列不同于宏观颗粒的性质，根本之点在于微观粒子具有波粒二象性，从而它所遵从的物理规律也与宏观物体根本不同。在量子力学建立之前，N. 玻尔曾根据普朗克、爱因斯坦等提出的量子概念建立了前期量子论，可以

^① 海森伯 (W. K. Heisenberg, 1901 — 1976)，德国物理学家，不确定性关系的提出者，量子力学的奠基人之一，1932年诺贝尔物理学奖获得者。

部分地说明原子的若干性质。然而这个理论能够解决的问题有限,而且理论中还存在不和谐因素。这些都不能令人满意。1925年,海森伯等人着眼于对前期量子论的批判,发展了矩阵力学;1926年,薛定谔根据德布罗意的波粒二象性假说建立了波动力学。不久,薛定谔等人证明矩阵力学与波动力学在数学上是等价的,于是两种理论融合为量子力学。以后又由于狄拉克等人的进一步发展,量子力学成为逻辑严谨、方法齐备的崭新理论。

量子力学与经典力学有根本的差别。量子力学中,粒子的状态用波函数 $\psi(r, t)$ 描述,它是坐标 r 和时间 t 的复数函数。波函数的模的二次方 $|\psi(r, t)|^2$ 表示在时刻 t 、坐标为 r 的位置找到粒子的概率密度。在粒子速度不太大的非相对论情况下,粒子状态随时间变化的规律,即波函数所满足的运动方程是薛定谔方程;在粒子速度很大的相对论情况下,薛定谔方程由狄拉克方程或克莱因-戈尔登方程所取代。

玻尔关于氢原子能级的概念可以自然地由量子力学推出,而不再是人为的假设。不但如此,量子力学在原子、分子、固体以及微观粒子的碰撞等众多问题上,都得到了与实验符合得很好的结果,获得了极大的成功。

量子力学后来又有了发展。在高能情形下,粒子的转变是一种普遍现象,所有粒子,包括光子、电子、介子、核子等,必须用统一的方式处理,这样才能把粒子的产生、湮没和转化反映到理论中去。为了这种需要,在量子力学的基础上出现了量子场论。量子场论已经成为粒子物理、统计物理、凝聚态物理和核物理的基本理论工具。

问题与练习

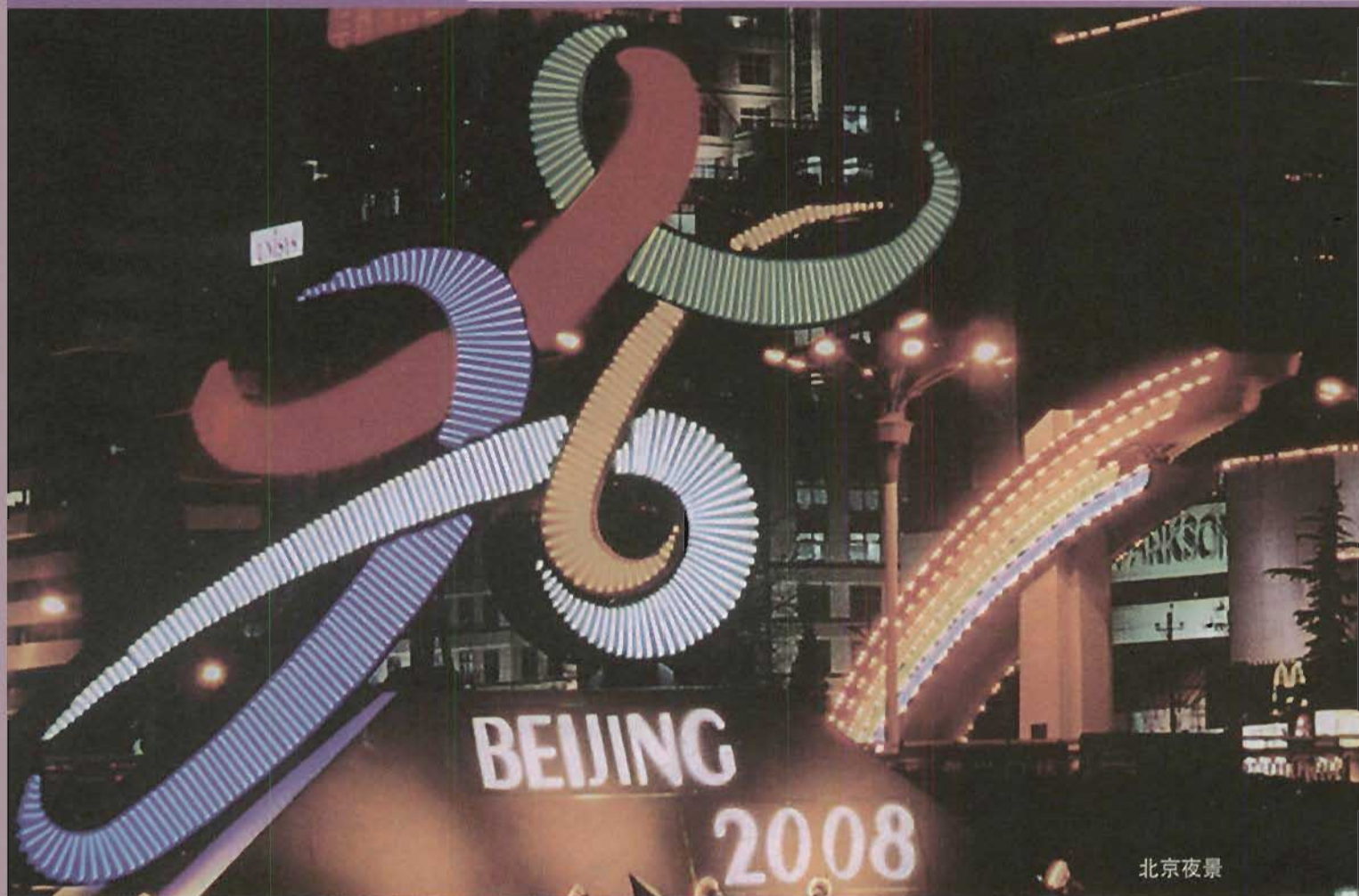
1. 请举一个例子说明:在经典物理学中,我们可以同时确定物体的位置和动量。
2. 请举一个例子说明:在微观物理学中,粒子的位置和动量具有不确定关系。这时,牛顿运动定律还成立吗?
3. 有人说:“在微观物理学中,由于我们不可能同时准确地知道某个粒子的位置和动量,粒子出现的位置是无规律可循的。”请你对以上说法做出评论。
4. 在光的单缝衍射实验中,狭缝变窄,光子动量的不确定量如何变化?请用实验现象解释这个结论。

科学靠两条腿走路，一是理论，一是实验。
有时一条腿走在前面，有时另一条腿走在前面。
但只有使用两条腿，才能前进。

——密立根^①

第十八章

原子结构



每当夜幕降临，远远近近的灯光渐次亮起，与天空中闪烁的繁星交相辉映，汇成一幅璀璨的画面。在节假日和重大庆祝活动的夜晚，座城市更是被灯光装点得热烈而庄重。

在欣赏这美丽的灯光时，你可曾意识到，这里发光的多是通电后的气体？若想了解其中的奥秘，让我们直奔主题，从原子的结构入手吧。

^① 密立根 (R. A. Millikan, 1868—1953)，美国物理学家，因精确测量电子电荷及实验验证光电效应方程获1923年诺贝尔物理学奖。

1

电子的发现

19世纪末,科学家们发现了电子,从而认识到:原子是可以分割的,是由更小的微粒组成的。

阴极射线

演示

如图18.1-1,真空玻璃管中K是金属板制成的阴极,A是金属环制成的阳极;把它们分别连接在感应圈的负极和正极上。管中十字状物体是一个金属片。接通电源时,感应圈产生的近万伏的高电压加在两个电极之间,观察管端玻璃壁上亮度的变化。

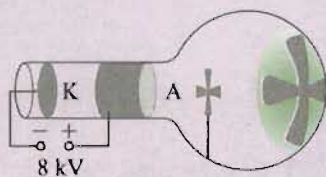


图 18.1-1 玻璃管壁上的荧光及阴影

早在1858年,德国物理学家普吕克尔就在类似的实验中看到了玻璃壁上淡淡的荧光及管中物体在玻璃壁上的影。1876年,另一位德国物理学家戈德斯坦认为管壁上的荧光是由于玻璃受到阴极发出的某种射线的撞击而引起的,并把这种射线命名为阴极射线(cathode ray)。

19世纪,对阴极射线的本质的认识有两种观点。一种观点认为阴极射线是一种电磁辐射,另一种观点认为阴极射线是带电微粒。两种观点的支持者争执不下,谁也说服不了谁。为了找到有利于自己的证据,双方都做了很多实验。

思考与讨论

根据带电粒子在电场、磁场中的运动规律,哪些方法可以判断运动的带电粒子所带电荷的正负号?

电子的发现 英国物理学家J. J. 汤姆孙(J. J. Thomson, 1856—1940)认为阴极射线是带电粒子流。为了证实这点,从1890年起他进行了一系列实验研究。图18.1-2是他当时使用的气体放电管的示意图。由阴极K发出的带电粒子通过小孔

在《物理选修3-1》中曾有一个演示,用来研究磁场对运动电荷的作用力。那时我们就已经接触过阴极射线了。

A、B形成一束细细的射线。它穿过两片平行的金属板 D_1 、 D_2 之间的空间，到达右端带有标尺的荧光屏上。通过射线产生的荧光的位置，可以研究射线的径迹。

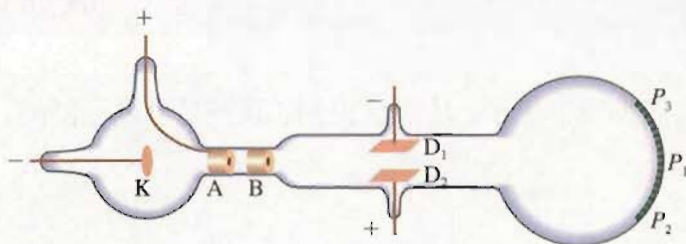


图 18.1-2 汤姆孙的气体放电管的示意图

思考与讨论

带电粒子的电荷量与其质量之比——比荷 $\frac{q}{m}$ ，是一个重要的物理量。根据带电粒子在电场和磁场中受力的情况，可以得出它的比荷。假设你是当年“阴极射线是带电微粒”观点的支持者，请你依照下面的提示思考计算阴极射线微粒的比荷的方法。

1. 当图18.1-2中金属板 D_1 、 D_2 之间未加电场时，射线不偏转，射在屏上 P_1 点。按图示方向施加电场 E 之后，射线发生偏转并射到屏上 P_2 点。

由此推断，阴极射线带有什么性质的电荷？

2. 为了抵消阴极射线的偏转，使它从 P_2 点回到 P_1 ，需要在两块金属板之间的区域再施加一个大小合适、方向垂直于纸面的磁场。这个磁场 B 应该向纸外还是向纸内？写出此时每个阴极射线微粒（质量为 m ，速度为 v ）受到的洛伦兹力和库仑力。两个力之间应该有什么关系？

3. 根据以上关系求出阴极射线的速度 v 的表达式。由于金属板 D_1 、 D_2 间的距离是已知的，两板间的电压是可测量的，所以两板间的电场强度 E 是已知量。磁场由电流产生，磁感应强度 B 可以由电流的大小算出，因此也按已知量处理。

4. 去掉 D_1 、 D_2 间的电场 E ，只保留磁场 B 。由于磁场方向与射线运动方向垂直，阴极射线在 D_1 、 D_2 之间有磁场的区域会形成一个半径为 r 的圆弧，使得阴极射线落在屏的 P_3 点。此时，组成阴极射线的粒子做圆周运动的向心力是洛伦兹力。半径 r 可以通过 P_3 点的位置及放电管的几何参数算出，同样按已知量处理。

按照这些提示，原则上就可以写出比荷 $\frac{q}{m}$ 的表达式了。

1897年，汤姆孙根据阴极射线在电场和磁场中的偏转情况断定，它的本质是带负电的粒子流并求出了这种粒子的比荷。

汤姆孙发现,用不同材料的阴极做实验,所得比荷的数值都是相同的。这说明不同物质都能发射这种带电粒子,它是构成各种物质的共有成分。由实验测得的阴极射线粒子的比荷是氢离子比荷的近两千倍。他认为,这可能表示阴极射线粒子电荷量的大小与一个氢离子一样,而质量比氢离子小得多。后来,汤姆孙直接测到了阴极射线粒子的电荷量,尽管测量不很准确,但足以证明这种粒子电荷量的大小与氢离子大致相同,由此看出他当初的猜测是正确的。后来,组成阴极射线的粒子被称为**电子 (electron)**。

发现电子以后,汤姆孙又进一步研究了许多新现象,如光电效应、热离子发射效应和 β 射线等。他发现,不论阴极射线、 β 射线、光电流还是热离子流,它们都包含电子。也就是说,不论是由于正离子的轰击^①、紫外光的照射、金属受热还是放射性物质的自发辐射,都能发射同样的带电粒子——电子。这种带电粒子的质量只比最轻原子的质量的两千分之一稍多一点。由此可见,电子是原子的组成部分,是比原子更基本的物质单元。

电子电荷的精确测定是在1909~1913年间由密立根通过著名的“油滴实验”做出的。电子电荷的现代值为

$$e = 1.602\,177\,33(49) \times 10^{-19} \text{ C}$$

密立根实验更重要的发现是:电荷是量子化的,即任何带电体的电荷只能是 e 的整数倍。从实验测到的比荷及 e 的数值,可以确定电子的质量为

$$m_e = 9.109\,389\,7 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

质子质量与电子质量的比值为

$$\frac{m_p}{m_e} = 1\,836$$

在高真空的放电管中,阴极射线中的粒子主要来自阴极。对于真空度不高的放电管,粒子还可能来自管中的气体。

β 射线是某些物质自发地放射的一种射线,本章将有讨论。

热离子发射指金属在高温时发射粒子的现象。

科学足迹

电子发现的前夜

从普吕克尔首次观察到阴极射线到汤姆孙确认电子的存在,其间经历了近40年。这期间对阴极射线的研究并未间断,甚至有人也测出了组成阴极射线微粒的比荷,但是谁都不敢承认还有比原子更小的粒子,因而错过了发现电子的良机。

电磁波的发现者赫兹是“阴极射线是电磁波”观点的支持者。他也曾在阴极射线管中施加垂直于阴极射线的电场,但是没有看到偏转。因此,他认为阴极射线是不带电的。其实这是由于管中真空度不高造成的。汤姆孙在重复赫兹的这个实验时,起初也看不到偏转。后经仔细分析,发现了问

^① 图 18.1-1 和图 18.1-2 中产生阴极射线的机理是:管中残存气体分子中的正负电荷在强电场的作用下被“拉开”(即气体分子被电离),正电荷(即正离子)在电场加速下撞击阴极,于是阴极释放更多电子,形成了阴极射线。

题，于是改善真空条件，终于如愿以偿。

赫兹和他的学生还观察到，阴极射线可以像光透过透明物质那样透过薄铝片，可是他们并不相信还有比原子更小的粒子，并且认为只有波才能穿过实物，因此他们把这个事实当做“阴极射线是电磁波”的证据。但同是这个实验，汤姆孙认为，正是阴极射线透过薄铝片的事实，说明阴极射线微粒比原子还小。

在汤姆孙之前，有两人已经测出了阴极射线微粒的比荷。

一个人是舒斯特 (A. Schuster)，他早在1890年的测量中就发现，构成阴极射线微粒的比荷应该是氢离子比荷的千倍以上。但他认为，粒子的质量不到氢原子质量的千分之一，这样的结论是荒谬的，因此他假定：阴极射线粒子的质量大小与氢原子一样，而电荷量却较氢离子大得多。

另外一人是考夫曼，他在1897年测到的 $\frac{e}{m}$ 数值远比汤姆孙的要精确，与现代值只差1%。他还观察到 $\frac{e}{m}$ 值随电子速度的改变而改变，这正是若干年后爱因斯坦的相对论所预言的。但是，因为他不承认“阴极射线是粒子”的假设，所以他当时没有发表这些结果，直到1901年他才把结果公布于世。

通过这段历史可以看到，科学研究并不只是“客观地”揭露事实，有时候研究者的主观意识会起到决定性的作用。创造性的发现需要洞察力。

思考与讨论

电子的发现使人们认识到原子不是组成物质的最小微粒，原子本身也具有结构。通常情况下，物质是不带电的，因此，原子应该是电中性的。然而，既然电子是带负电的，质量又很小，那么，原子中一定还有带正电的部分，它具有大部分的原子质量。

原子中带正电的部分以及带负电的电子可能是如何分布的？

问题与练习

1. 汤姆孙是怎样发现电子的？
2. 加在阴极射线管内阴极和阳极之间的电压为 $4 \times 10^3 \text{ V}$ ，如果电子离开阴极表面时的速度为0，试求电子到达阳极时的速度。
3. 一个半径为 $1.64 \times 10^{-4} \text{ cm}$ 的带负电的油滴，处在电场强度等于 $1.92 \times 10^5 \text{ V/m}$ 的竖直向下的匀强电场中。如果油滴受到的库仑力恰好与重力平衡，问：这个油滴带有几个电子的电荷？已知油的密度为 $0.851 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。
4. 一种测定电子比荷的实验装置如图18.1-3所示。真空玻璃管内，阴极K发出的电子经

阳极A与阴极K之间的高电压加速后,形成细细的一束电子流,沿图示方向进入两极板C、D间的区域。若两极板C、D间无电压,电子将打在荧光屏上的O点;若在两极板间施加电压 U ,则离开极板区域的电子将打在荧光屏上的P点;若再在极板间施加一个方向垂直于纸面向外、磁感应强度为 B 的匀强磁场,则电子在荧光屏上产生的光点又回到O。已知极板的长度 $l = 5.00\text{ cm}$, C、D间的距离 $d = 1.50\text{ cm}$,极板区的中点M到荧光屏中点O的距离为 $L = 12.50\text{ cm}$, $U = 200\text{ V}$, $B = 6.3 \times 10^{-4}\text{ T}$, P点到O点的距离 $y = 3.0\text{ cm}$ 。试求电子的比荷。

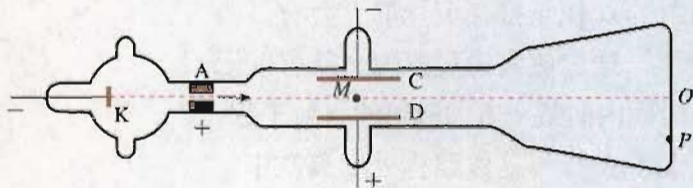


图 18.1-3 测定电子比荷的装置

2

原子的核式结构模型

在汤姆孙发现电子之后,对于原子中正负电荷如何分布的问题,科学家们提出了许多模型。其中较有影响的是汤姆孙本人于1898年提出的一种模型。他认为,原子是一个球体,正电荷弥漫性地均匀分布在整個球体内,电子镶嵌其中。有人形象地把汤姆孙模型称为“西瓜模型”或“枣糕模型”(图 18.2-1)。汤姆孙模型能够解释一些实验现象。但勒纳德1903年做了一个实验,使电子束射到金属膜上,发现较高速度的电子很容易穿透原子。看来原子不是一个实心球体。



图 18.2-1 汤姆孙的原子模型,小圆点代表正电荷,大圆点代表电子。

稍后一些的 α 粒子散射实验则完全否定了汤姆孙的模型。

α 粒子散射实验 α 粒子是从放射性物质(如铀和镭)中发射出来的快速运动的粒子,带有两个单位的正电荷,质量为氢原子质量的4倍、电子质量的7300倍。

1909年,英籍物理学家卢瑟福(E. Rutherford, 1871—1937)指导他的学生盖革(H. Geiger)和马

J. J. 汤姆孙发现了电子,对科学做出了重要贡献;但今天几乎所有教科书都要批评他对原子内电荷分布的解释。科学史上这个有趣的事实告诉我们,“曾经正确”的科学家也会犯错误。

斯顿进行 α 粒子散射实验的研究时,所用仪器的俯视图如图18.2-2所示。R是被铅块包围的 α 粒子源,它发射的 α 粒子经过一条细通道,形成一束射线,打在金箔F上。M是一个带有荧光屏S的放大镜,可以在水平面内转到不同的方向对散射的 α 粒子进行观察。被散射的 α 粒子打在荧光屏上会有微弱的闪光产生。通过放大镜观察闪光就可以记录在某一时间内向某一方向散射的 α 粒子数。从 α 粒子源到荧光屏这段路程处于真空中。

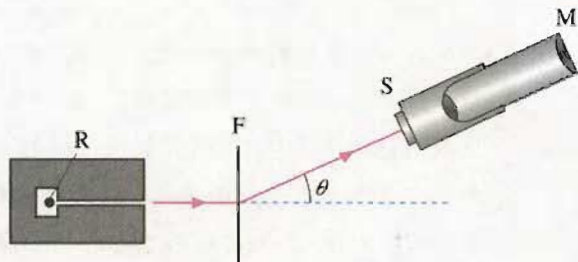


图 18.2-2 α 粒子散射的实验装置（俯视）

当 α 粒子打到金箔时,由于金原子中的带电粒子对 α 粒子有库仑力的作用,一些 α 粒子的运动方向改变,也就是发生了 α 粒子的散射。统计散射到各个方向的 α 粒子所占的比例,可以推知原子中电荷的分布情况。

除了金箔外,当时的实验还用了其他重金属箔,例如铂箔。

思考与讨论

1. α 粒子射入金箔时难免与电子碰撞。试估计这种碰撞对 α 粒子速度影响的大小。
2. 按照汤姆孙的原子模型,正电荷均匀分布在原子球体内。请分析: α 粒子穿过金箔,受到电荷的作用力后,沿哪些方向前进的可能性较大,最不可能沿哪些方向前进。

实验发现,绝大多数 α 粒子穿过金箔后,基本上仍沿原来的方向前进,但有少数 α 粒子(约占八千分之一)发生了大角度偏转,偏转的角度甚至大于 90° ,也就是说它们几乎被“撞了回来”。

这样的事实令人惊奇。大角度的偏转不可能是电子造成的,因为它的质量只有 α 粒子的 $\frac{1}{7300}$,它对 α 粒子速度的大小和方向的影响就像灰尘对枪弹的影响,完全可以忽略。因此,造成 α 粒子偏转的主要原因是它受到了原子中除电子以外的其他物质的作用,而这部分物质的质量很大,并且是带正电的。而按照汤姆孙模型,正电荷是均匀地分布在原子内的, α 粒子穿过原子时受到的各方向正电荷的斥力基本上会相互平衡,因此对 α 粒子运动的影响不会很大。所以,汤姆孙模型无法解释大角度散射的实验结果。

卢瑟福分析了实验数据后发现,事实应该是:占原子质量绝大部分的带正电的那部分物质集中在很小的空间范围。这样才会使 α 粒子在经过时受到很强的斥力,才可能使 α 粒子发生大角度的偏转。

1911年,卢瑟福提出了自己的原子结构模型。他设想:原子中带正电部分的体积很小,

但几乎占有全部质量，电子在正电体的外面运动。这样，当 α 粒子接近原子时，电子对它的影响仍如前述可以忽略，但是，正电体对它的作用就不同了。因为正电体很小，当 α 粒子进入原子区域后，大部分离正电体很远，受到的库仑斥力很小，运动方向几乎不改变。只有极少数 α 粒子在穿过时距离正电体很近，因此受到很强的库仑斥力，发生大角度散射。这个情况如图 18.2-3 所示。

按照卢瑟福的理论，正电体的尺度是很小的，被称为原子核。卢瑟福的原子模型因而被称为**核式结构模型**。卢瑟福以这个模型为依据，利用经典力学计算了向各个方向散射的 α 粒子的比例，结果与实验数据符合得很好。

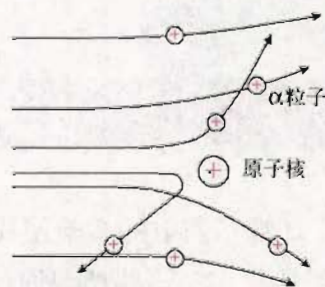


图 18.2-3 原子核式结构模型的 α 粒子散射图景

原子核的电荷与尺度 由不同元素对 α 粒子散射的实验数据可以确定各种元素原子核的电荷 Q 。又由于原子是电中性的，可以推算出原子内含有的电子数。科学家们注意到，各种元素的原子核的电荷数，即原子内的电子数，非常接近它们的原子序数，这说明元素周期表中的各种元素是按原子中的电子数来排列的。

现在，我们知道，原子确实是由带电荷 $+Ze$ 的核与核外 Z 个电子组成。原子序数 Z 等于核电荷与电子电荷大小的比值。后来又发现原子核是由质子和中子组成的，原子核的电荷数就是核中的质子数。

通常用核半径 R 表征核的大小。原子核的半径是无法直接测量的，一般通过其他粒子与核的相互作用来确定。 α 粒子散射是估计核半径的最简单的方法。对于一般的原子核，实验确定的核半径 R 的数量级为 10^{-15} m ，而整个原子半径的数量级是 10^{-10} m ，两者相差十万倍之多。可见原子内部是十分“空旷”的。

Ze 是原子核的电荷，单位是库仑； Z 是原子序数，也是原子核的电荷数，它表示原子核的电荷是一个电子电荷（绝对值）的多少倍。 Z 是没有单位的，或者说 Z 的单位是 1。

问题与练习

1. 绘制一幅简图，用以说明卢瑟福进行 α 粒子散射实验所用的仪器装置。他是怎样用这个装置观察 α 粒子散射现象的？描述他观察到的现象。
2. 汤姆孙模型为什么不能解释 α 粒子的大角度散射？
3. 卢瑟福提出的原子结构的模型是怎样的？他提出这种模型的依据是什么？
4. 假设原子核有一个篮球那么大，按照比例，整个原子有多大？
5. α 粒子散射实验用的是金箔、铂箔等重金属箔，为什么不用轻金属箔，例如铝箔？

3

氢原子光谱

α 粒子散射的实验使我们知道原子具有核式结构,但电子在核的周围怎样运动? 它的能量怎样变化? 这些还要通过其他事实才能认识。

光谱 我们已经知道,用光栅或棱镜可以把各种颜色的光按波长展开,获得光的波长(频率)和强度分布的记录,即光谱。用摄谱仪可以得到光谱的照片。有些光谱是一条条的亮线,我们把它叫做谱线,这样的光谱叫做**线状谱**。有的光谱看起来不是一条条分立的谱线,而是连在一起的光带,我们把它叫做**连续谱**。图 18.3-1 最上一条是连续谱,其他几条是线状谱与连续谱的叠加。

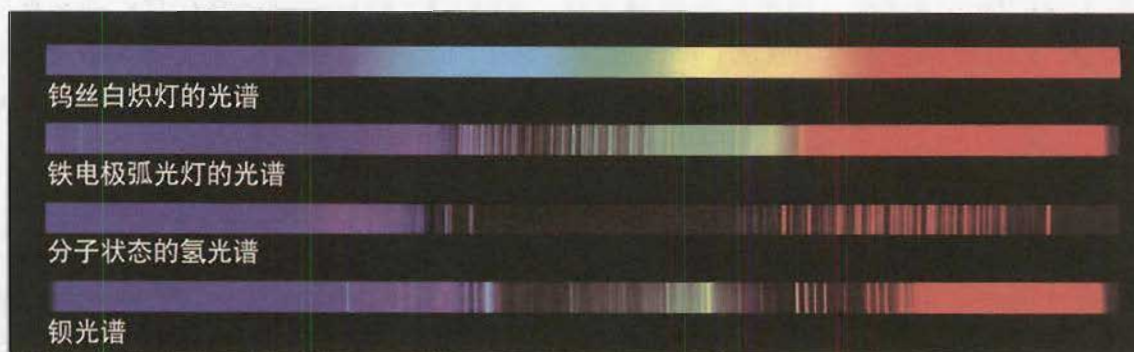


图 18.3-1 几种光谱

各种原子的发射光谱都是线状谱,说明原子只发出几种特定频率的光。不同原子的亮线位置不同,说明不同原子的发光频率是不一样的,因此这些亮线称为原子的特征谱线。

既然每种原子都有自己的特征谱线,我们就可以利用它来鉴别物质和确定物质的组成成分。这种方法称为光谱分析。它的优点是灵敏度高,样本中一种元素的含量达到 10^{-10} g 时就可以被检测到。

科学足迹

光谱与新元素的发现

1814年,德国物理学家夫琅和费(J. von Fraunhofer, 1787—1826)在测试新制造的棱镜时,发现太阳光谱中有许多暗线。在此之前,他通过光谱分析发现了钠的谱线。因此,他也希望在太阳中发现这些特征谱线。夫琅和费将太阳光谱中的暗线用字母标出。这些暗线今天被称为夫琅和费线。



图 18.3-2 太阳光谱中的暗线

1821年,夫琅和费又用光栅代替棱镜作为分光装置,使太阳光形成了更精细的光谱。利用光栅,他试着测定了阳光中各条暗线的波长。夫琅和费的工作当时没有受到重视,他本人也不明白太阳光谱中暗线的含义。

1859年,德国物理学家基尔霍夫(G. R. Kirchhoff, 1824—1887)解释了太阳光谱中暗线的含义。他发现,每一种元素都有自己的特征谱线,如果在某种光中观察到了这种元素的特征谱线,那么光源里面一定含有这种元素。阳光中含有各种颜色的光,但当阳光透过太阳的高层大气射向地球时,太阳高层大气含有的元素会吸收它自己特征谱线的光,然后再发射出去,不过这次是向四面八方发射,所以到达地球的这些谱线看起来就弱了,这样就形成了明亮背景下的暗线。基尔霍夫断定,太阳光谱中的夫琅和费暗线就是各种物质的特征谱线。与已知元素的光谱相比较,知道太阳中存在钠、镁、铜、锌、镍等金属元素。

由基尔霍夫开创的光谱分析方法,对鉴别化学元素有着巨大的意义。许多化学元素,像铯、铷、铊、铟、镓,都是在实验室里通过光谱分析发现的。当天文学家将光谱分析方法应用于恒星时,马上就证明了宇宙中物质构成的统一性。光谱分析还为深入原子世界打开了道路。近代原子物理学正是从原子光谱的研究中开始的。



图 18.3-3 暗线的形成

氢原子光谱的实验规律 许多情况下光是由原子内部电子的运动产生的,因此光谱研究是探索原子结构的一条重要途径。

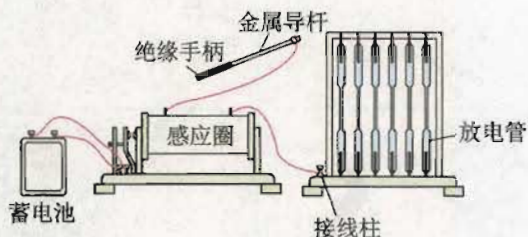


图 18.3-4 气体放电管

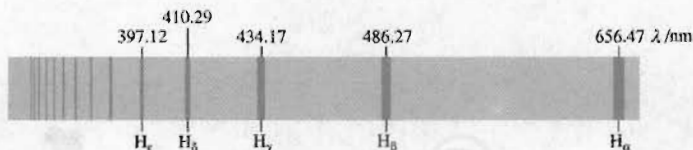


图 18.3-5 氢原子的光谱

玻璃管中稀薄气体的分子在强电场的作用下会电离,成为自由移动的正负电荷,于是气体变成导体,导电时会发光。这样的装置叫做气体放电管(图 18.3-4)。

从氢气放电管可以获得氢原子光谱。1885年,巴耳末(J. J. Balmer)对当时已知的,在可见光区的四条谱线做了分析,发现这些谱线的波长能够用一个公式表示。如果采用波长 λ 的倒数,这个公式可以写做

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

式中 R 叫做里德伯常量,实验测得的值为 $R = 1.10 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 。这个公式称为巴耳末公

波长的倒数叫做波数,
常用 $\tilde{\nu}$ 表示,即

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$$

式，它确定的这一组谱线称为巴耳末系。式中的 n 只能取整数，不能连续取值。巴耳末公式以简洁的形式反映了氢原子的线状光谱，即辐射波长的分立特征。

除了巴耳末系，后来发现的氢光谱在红外和紫外光区的其他谱线也都满足与巴耳末公式类似的关系式。

经典理论的困难 卢瑟福的核式结构模型正确地指出了原子核的存在，很好地解释了 α 粒子散射实验。但是，经典物理学既无法解释原子的稳定性，又无法解释原子光谱的分立特征。

按照经典物理学，核外电子受到原子核的库仑引力的作用，不可能是静止的，它一定在以一定的速度绕核转动。既然电子在做周期性运动，它的电磁场就在周期性地变化，而周期性变化的电磁场会激发电磁波。也就是说，它将把自己绕核转动的能量以电磁波的形式辐射出去。因此，电子绕核转动这个系统是不稳定的，电子会失去能量，最后一头栽到原子核上。但事实不是这样，原子是个很稳定的系统。

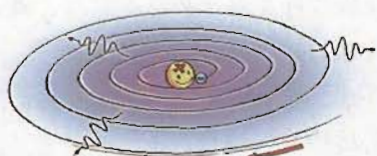


图 18.3-6 按照经典电磁理论原子是不稳定的

另一方面，根据经典电磁理论，电子辐射电磁波的频率，就是它绕核转动的频率。电子越转能量越小，它离原子核就越来越近，转得也就越来越快。这个变化是连续的，也就是说，我们应该看到原子辐射的各种频率（波长）的光，即原子的光谱应该总是连续的；而实际上看到的是分立的线状谱。

这些矛盾说明，尽管经典物理学可以很好地应用于宏观物体，但它不能解释原子世界的现象，引入新观念是必要的。

问题与练习

1. 什么是线状谱，什么是连续谱？原子的发射光谱是怎样的光谱？不同原子的发射光谱是否有可能相同？
2. 根据巴耳末公式，指出氢原子光谱在可见光范围内波长最长的两条谱线所对应的 n ，它们的波长各是多少？氢原子光谱有什么特点？
3. 经典物理学在解释原子光谱时遇到了什么困难？

玻尔原子理论的基本假设 丹麦物理学家N. 玻尔 (N. Bohr, 1885 — 1962) 意识到了经典理论在解释原子结构方面的困难。在普朗克关于黑体辐射的量子论和爱因斯坦关于光子的概念的启发下, 他在1913年把微观世界中物理量取分立值的观念应用到原子系统, 提出了自己的原子结构假说。

玻尔的原子结构假说包括以下两方面的内容。

● 轨道量子化与定态

玻尔认为, 原子中的电子在库仑引力的作用下, 绕原子核做圆周运动, 服从经典力学的规律。但不同的是, 电子运行轨道的半径不是任意的, 只有当半径的大小符合一定条件时, 这样的轨道才是可能的。也就是说, **电子的轨道是量子化的**。电子在这些轨道上绕核的转动是稳定的, 不产生电磁辐射。

玻尔的理论与我们的日常观念有很大的不同。

人们常把原子核和它周围的电子比做太阳系或者地球和人造卫星。以地球和人造卫星为例, 假如我们发射了一颗卫星, 使它在一定的圆轨道上运行。如果需要, 可以使这颗卫星的能量稍大一些, 在更大一些的轨道上运行。只要技术条件能够达到, 轨道半径可以按照需要任意取值。这种情况下, 我们说, 轨道半径是**连续**的。

但是, 并非把这个图景缩小就可以看做原子核和它周围电子的运动。在玻尔的理论中, 电子的轨道半径只可能是某些分立的数值。例如, 氢原子中电子轨道的最小半径是 0.053 nm , 不可能再小了; 电子还可能在半径是 0.212 nm 、 0.477 nm ……的轨道上运行, 但是轨道半径不可能是介于这些数值中间的某个值!

当电子在不同的轨道上运动时, 原子处于不同的状态。玻尔指出, 原子在不同的状态中具有不同的能量, 因此, **原子的能量是量子化的**。这些量子化的能量值叫做**能级 (energy level)**。原子中这些具有确定能量的稳定状态, 称为**定态 (stable state)**。能量最低的状态叫做**基态 (ground state)**, 其他的状态叫做**激发态 (excited state)**。通常用一个或几个量子数来标志各个不同的状态, 例如可以用

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

来标志能量分别为

$$E_1, E_2, E_3, \dots$$

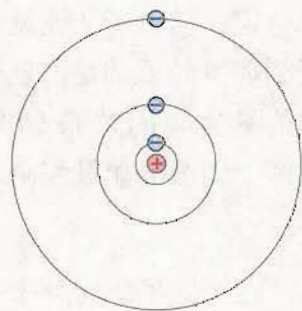


图 18.4-1 分立轨道示意图

轨道半径不能是连续的, 这个条件叫做**轨道量子化条件**。

电子绕原子核运动时具有动能; 它与原子核之间有相互作用, 因此电子—原子核这个系统也具有势能。两者之和称为原子的能量。

这是经典物理学的观点, 玻尔理论继承了这个观点。

的氢原子基态 ($n = 1$) 和激发态 ($n = 2, 3, 4, \dots$)。

● 频率条件

按照玻尔的观点,电子在一系列定态轨道上运动,不会发生电磁辐射。那么,如何解释观察到的原子光谱呢?对此,玻尔假定:当电子从能量较高的定态轨道(其能量记为 E_m) 跃迁到能量较低的定态轨道(能量记为 E_n , $m > n$) 时,会放出能量为 $h\nu$ 的光子 (h 是普朗克常量),这个光子的能量由前后两个能级的能量差决定,即

$$h\nu = E_m - E_n \quad (1)$$

这个式子称为频率条件,又称辐射条件。反之,当电子吸收光子时会从较低的能量态跃迁到较高的能量态,吸收的光子的能量同样由频率条件决定。

原子由一个能量态变为另一个能量态的过程称为跃迁 (transition)。这里用了“跃”字,包含着“不连续”的意思。

玻尔理论对氢光谱的解释 从玻尔的基本假设出发,运用经典电磁学和经典力学的理论,可以计算氢原子中电子的可能轨道半径及相应的能量。图 18.4-2 是氢原子的能级图。

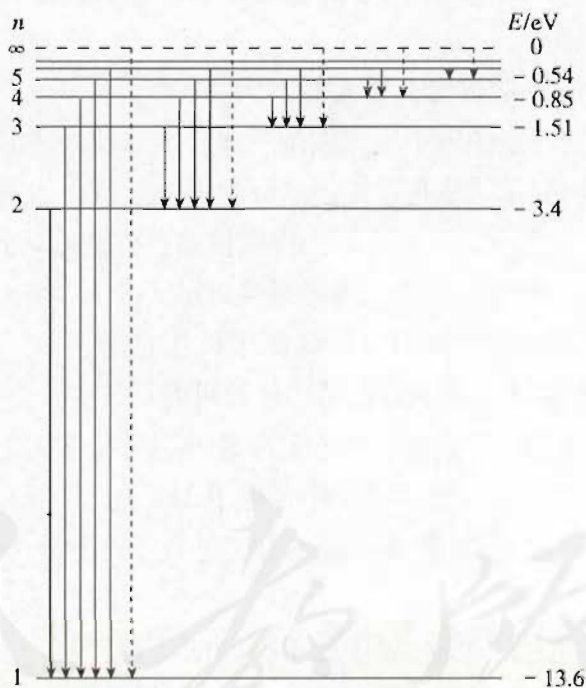


图 18.4-2 氢原子能级图

思考与讨论

巴耳末公式中有正整数 n 出现,这里我们也用正整数 n 来标志氢原子的能级,它们之间是否有某种联系?

玻尔的频率条件告诉我们,原子从较高的能级跃迁到较低的能级时,例如从 E_3 跃迁到 E_2 时,辐射的光子的能量为 $h\nu = E_3 - E_2$ 。按照玻尔理论,巴耳末公式中的正整数 n 和 2,正好代表电子跃迁之前和跃迁之后所处的定态轨道的量子数 n 和 2。因此,巴耳末公式代表的应该是电子从量子数分别为 $n = 3, 4, 5, \dots$ 的能级向量子数为 2 的能级跃迁时发出的光谱线。按照这个思路可以根据玻尔理论推导出巴耳末公式,并从理论上算出里德伯常量 R 的值。这样得到的结果与实验值符合得很好。同样,玻尔理论也能很好地解释甚至预言氢原子的其他谱线系。

通常情况下,原子处于基态,基态是最稳定的。气体放电管中的原子受到高速运动的电子的撞击,有可能向上跃迁到激发态。处于激发态的原子是不稳定的,会自发地向能量较低的能级跃迁,放出光子,最终回到基态。这就是气体导电时发光的机理。

原子从高能态向低能态跃迁时放出的光子的能量等于前后两个能级之差。由于原子的能级是分立的,所以放出的光子的能量也是分立的。因此原子的发射光谱只有一些分立的亮线。

由于不同的原子具有不同的结构,能级各不相同,因此辐射(或吸收)的光子频率也不相同。这就是不同元素的原子具有不同的特征谱线的原因。

玻尔模型的局限性 玻尔的原子理论第一次将量子观念引入原子领域,提出了定态和跃迁的概念,成功地解释了氢原子光谱的实验规律。但对于稍微复杂一点的原子如氦原子,玻尔理论就无法解释它的光谱现象。这说明玻尔理论还没有完全揭示微观粒子运动的规律。它的不足之处在于保留了经典粒子的观念,仍然把电子的运动看做经典力学描述下的轨道运动。

实际上,原子中电子的坐标没有确定的值。因此,我们只能说某时刻电子在某点附近单位体积内出现的概率是多少,而不能把电子的运动看做一个具有确定坐标的质点的轨道运动。

当原子处于不同的状态时,电子在各处出现的概率是不一样的。如果用疏密不同的点子表示电子在各个位置出现的概率,画出图来,就像云雾一样,可以形象地把它称做电子云(electron cloud)。

在巴耳末公式中如果把分母中的 2 换为其他自然数,就得到了其他谱线系的波长。它们对应于氢原子从较高能级向除 $n = 2$ 以外其他能级跃迁时辐射的光。

除了实验室中的气体放电管外,街道上的霓虹灯、试电笔中的氖管,都是由于气体导电而发光的。室内的日光灯则是由气体导电发出紫外线,玻璃管壁上的荧光物质在紫外线照射下发出了可见光。

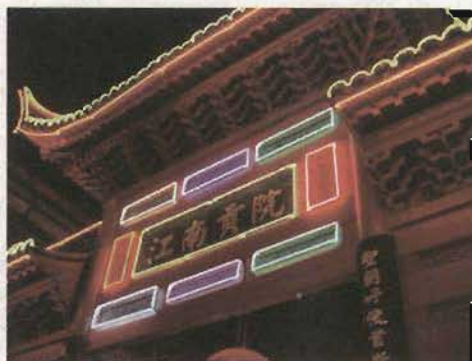


图 18.4-3 各种气体原子的能级不同,跃迁时发射光子的能量各异,因此利用不同气体可以制成五颜六色的霓虹灯。

在后来的量子力学中,玻尔提出的定态和在定态之间跃迁的概念都被保留下来了。

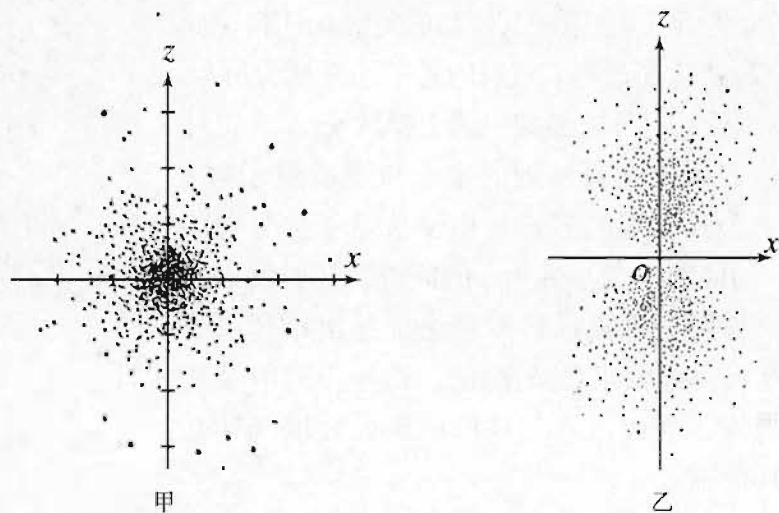


图 18.4-4 氢原子电子云示意图

图 18.4-4 甲是氢原子处于 $n = 1$ 的状态时的电子云；当 $n = 2$ 时有几个可能的状态，图乙画的是其中一个状态的电子云。

科学足迹

弗兰克—赫兹实验

玻尔理论的一个重要假设是原子能量的量子化。光谱测量发现了电磁波发射或吸收的分立特征，从而证实了原子中分立的能级的存在。

然而，激发原子的手段不只是让它吸收电磁辐射，还有加热或使粒子碰撞等方式。因此，除了光谱测量外，用其他方法也应该能够证明原子能量的量子化现象，弗兰克—赫兹实验就是其中之一。

如果原子的能级是分立的，那么用碰撞的方式使原子吸收的能量，即其他粒子转移给原子的能量，也应该是量子化的。1914 年，弗兰克 (J. Franck) 和赫兹 (G. Hertz) 利用电子轰击汞原子，发现电子损失的能量，也就是汞原子吸收的能量，是分立的，从而证明汞原子的能量确实是量子化的。

弗兰克—赫兹实验原理如图 18.4-5 所示。把汞放入抽成真空的玻璃容器，容器中就充满了汞蒸汽。容器内还密封着阴极 K、金属网制成的栅极 G 及接收极 A。阴极灯丝 K 通电加热后发射电子。在 K 与栅极 G 之间加电场使电子加速。在 G 与接收极 A 之间加 0.5 V 的反电压。当电子通过 K-G 空间加速后进入 G-A 空间时，如果能量较大，就可以克服 G-A 间的反向电场到达接收极 A，形成电流通过电流表。

电子在 K-G 区域虽然由于电场加速而获得能量，但由于与汞原子碰撞，电子把自己的一部分能量交给了汞原子，剩下的能量可能很小，以致通过栅极 G 后无法克服 G-A 间的反向电压到达接收极 A。如果大部分电子都是如此，那么到达接收极 A 的电子就很少，通过电流表的电流也很小。

实验过程中，逐渐增加 K-G 间的电压，记录通过电流表的电流，得到电流随 K-G 间电压变化

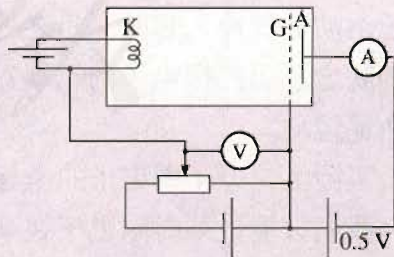


图 18.4-5 弗兰克—赫兹实验原理图

的曲线,如图 18.4-6 所示。从图中看出,每当 K-G 间的电压增加 4.9 V 时,电流就会大幅下降。

如果汞原子的能量是量子化的,而且它的基态与第一个激发态之间的能量差是 4.9 eV ,那就很容易解释观测到的现象。

当 K-G 间的电压低于 4.9 V 时,电子在 K-G 间被加速而获得的能量低于 4.9 eV 。此时如果电子与汞原子碰撞,由于汞原子的能量不能连续变化,所以碰撞不会使汞原子跃迁到激发态。也就是说,电子不会因碰撞损失能量,因而有足够的能量克服 G-A 间的反向电压到达 A 极,形成电流。在电子能量低于 4.9 eV 的情况下,电子能量越高越容易克服反向电压抵达 A 极,因此电流随着 K-G 间电压的升高也越来越大。

当 K-G 间的电压达到 4.9 V 时,电子在到达 G 极附近时获得的能量正好是 4.9 eV ,与汞原子相碰时,就有很大的可能把全部能量传递给汞原子,使汞原子从基态跃迁到最近的一个能量较高 (4.9 eV) 的激发态。这样,电子就无法克服 G-A 间的反向电压到达 A 极,因此 A 极电流大幅度下降。

等到 K-G 间的电压超过 4.9 V 较多时,电子在 K-G 空间与汞原子碰撞而转移掉 4.9 eV 的能量后,还留有足够的能量,又能克服反向电压从 G 极到达 A 极,电流又上升了。

当 K-G 间的电压是 4.9 V 的 2 倍或 3 倍时,电子在 K-G 空间有可能经过两次或三次碰撞而耗尽能量,从而使电流再次下降。

这样我们就根据汞原子能量量子化的假设解释了图 18.4-6 的实验结果。

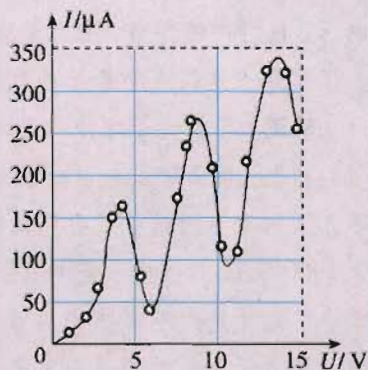


图 18.4-6 接收极电流随 K-G 电压的变化关系

必修物理课中已经学过,“ eV ”是能量单位“电子伏特”的符号,它等于具有 1 个电子电荷 e 的粒子在电势差为 1 V 的两点间移动时获得或失去的能量。

STS

从量子力学的诞生看科学技术与社会

20 世纪初是群英辈出的时代。从量子概念的首次提出,到描述微观粒子运动的量子力学的诞生,历经了大约四分之一个世纪。在通往量子论的道路上,闪耀着普朗克、爱因斯坦、玻尔、海森伯、德布罗意、薛定谔、玻恩和狄拉克等一大批杰出的物理学家的光辉的名字。

现代物理学的另一个支柱是相对论。与相对论的建立不同,量子理论并非主要由一个物理学家创立,它是许多物理学家共同努力的结晶。正如彼得·罗伯森在《玻尔研究所的早年岁月》一书中所说的那样,“量子物理学的建立可以认为是物理学研究工作方式上的转折点”。这种科学研究的群体性特点在 20 世纪后来的科学和技术研究中,例如核能的开发和利用、原子弹的研制中,都表现得十分突出。

量子力学的诞生也是与当时的社会环境分不开的。到 20 世纪初,英、法、德、美等国家相继完成了第二次工业革命,成为工业化的国家。电的应用在使人类获得极其方便的动力的同时,也为物理学的发展奠定了技术基础。真空技术的提高使汤姆孙能够利用高真空的放电管观察阴极射线在

电场、磁场中的偏转，从而导致了电子的发现。这一发现动摇了原子不可分的传统观念，拉开了人类探索原子结构的序幕，进而改变了人们的生活，改变了人们的思维。

然而，前期量子理论的出现不仅源于对原子结构的探索，而且源于对黑体辐射和光电效应等问题的研究。第二次工业革命极大地推动了冶金工业的发展，而冶金对高温测量技术的需求及天文学等方面的需要则推动了对热辐射的研究。普朗克建立了与实验符合得很好的黑体辐射公式，为此他于1900年12月提出了能量量子化的概念。五年之后，爱因斯坦在此基础上进一步提出了光量子的概念，对光电效应做出了满意的理论解释。普朗克和爱因斯坦的工作使人们认识到光的波粒二象性，为量子力学的发展奠定了坚实的基础。

在原子结构方面，人们提出了各种模型和设想，如1898年汤姆孙的“枣糕模型”，1911年卢瑟福的核式结构模型等。1913年，玻尔在卢瑟福模型的基础上，结合普朗克的量子概念，提出了自己的原子结构理论。玻尔的原子理论成功地解决了卢瑟福模型的困难。然而，由于它是建立在经典理论基础上的模型，仍然有许多无法解决的难题。

1923年后，前期量子理论的困难才有了突破性进展。首先是德布罗意，他在爱因斯坦的光量子理论的启发下，提出了实物粒子的波粒二象性，使量子理论由前期阶段转入新的量子理论——量子力学的形成阶段。

量子力学是反映微观世界运动规律的完整理论，它是沿着两条不同道路发展的。一条道路源于德布罗意的物质波，并由薛定谔的波动力学最后完成；另一条道路是海森伯等通过对玻尔的对应原理等理论的深入的、批判性的研究而形成的矩阵力学。后来证明，这两种描述微观世界的理论是等价的，只是形式不同而已。至此，现代量子理论已经基本建立起来，并在以后的几十年中得以迅速完善和发展。

量子力学的建立使人类对自然界的认识由宏观世界进入到微观世界。它的诞生带来了物理学及其他科学领域的革命性变化，导致一系列新学科和边缘学科的出现，如核物理学、固体物理学、基本粒子物理学、量子化学、量子生物学等。

对量子力学、狭义相对论和原子核物理的深入研究，为人类找到了一种实际上“取之不尽，用之不竭”的新能源——核能。当量子力学被应用到固体等复杂体系时，它解释了材料为何有导体、绝缘体和半导体之分，并提出了半导体二极管、三极管等概念，后来发展为集成电路，成为现代电子计算机的技术基础。可以说，没有量子力学就没有以计算机控制为主导的现代工业，就没有我们今天的信息时代。

问题与练习

1. 参考图 18.4-2, 用玻尔理论解释, 当巴耳末公式 $n = 5$ 时计算出的氢原子光谱的谱线, 是哪两个能级之间的跃迁造成的?
2. 请用玻尔理论解释: 为什么原子的发射光谱都是一些分立的亮线?
3. 如果大量氢原子处在 $n = 3$ 的能级, 会辐射出几种频率的光? 其中波长最短的光是在哪两个能级之间跃迁时发出的?
4. 包含各种波长的复合光, 被原子吸收了某些波长的光子后, 连续光谱中这些波长的位置上便出现了暗线, 这样的光谱叫做吸收光谱。请用玻尔理论解释: 为什么各种原子吸收光谱中的每一条暗线都跟这种原子的发射光谱中的一条亮线相对应?

万有引力、电的相互作用和磁的相互作用，可以在很远的地方明显地表现出来，因此用肉眼就可以观察到；但也许存在着另一些相互作用力，它们作用的距离如此之小，以致无法观察。

——牛顿

第十九章

原子核



秦山核电站

核能是蕴藏在原子核内部的能量。核能的发现是人们探索微观物质结构的一个重大成果。人类通过许多方式利用核能，主要的途径是发电。核能的利用可以缓解常规能源的短缺。

1991年，我国自行设计建造的秦山核电站成功地并网发电，使我国成为继美、英、法、苏和瑞典之后能够独立建造核电站的第六个国家。

通过本章的学习，你将对原子核及核能有更多的了解。

关于原子核内部的信息，最早来自天然放射现象。人们从破解天然放射现象入手，一步步揭开了原子核的秘密。

天然放射现象 1896年，法国物理学家贝可勒尔发现，铀和含铀的矿物能够发出看不见的射线，这种射线可以穿透黑纸使照相底版感光。

受到贝可勒尔的发现的鼓舞，玛丽·居里（M. S. Curie, 1867—1934）和她的丈夫法国物理学家皮埃尔·居里（P. Curie, 1859—1906）对铀和含铀的各种矿石进行了深入研究。他们发现了一种沥青中的含铀物质，根据它的含铀量计算，发出的射线不会太强，但实际测得的射线要强得多。进一步研究后，发现这种沥青中还存在着两种能够发出更强射线的新元素，玛丽·居里把其中一种元素命名为钋（Po），另一种元素命名为镭（Ra）。

物质发射射线的性质称为**放射性（radioactivity）**，具有放射性的元素称为**放射性元素**。后来发现放射性并不是少数元素才有的，原子序数大于或等于83的元素，都能自发地发出射线，原子序数小于83的元素，有的也能放出射线。放射性元素自发地发出射线的现象，叫做**天然放射现象**。

射线到底是什么 发现了天然放射现象之后不久，人们就在想，这些射线到底是什么？

把放射源铀、钋或镭放入用铅做成的容器中，射线只能从容器的小孔射出，成为细细的一束。在射线经过的空间施加磁场，发现射线分裂成三束，其中两束在磁场中向不同的方向偏转，这说明它们是带电粒子流；另一束在磁场中不偏转，说明它不带电。于是人们把这三种射线分别叫做 **α 射线（ α -ray）**、 **β 射线（ β -ray）**和 **γ 射线（ γ -ray）**。



图 19.1-1 居里夫妇在研究室

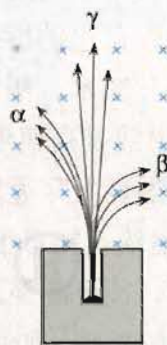


图 19.1-2 三种射线在磁场中的运动轨迹不同（示意图）

思考与讨论

如果 α 射线、 β 射线都是带电粒子流，按照图19.1-2中标出的径迹判断，它们分别带什么电荷。

如果不用磁场而用电场判断它们带电的性质，两个电极怎样放置可以使三种射线大致沿图19.1-2的方向偏转？

这三种射线穿透物质的能力是不同的。为把辐射强度减到一半所需铝板的厚度如下表所示。

射线的种类	铝板的厚度 d/cm
α 射线	0.000 5
β 射线	0.05
γ 射线	8

可见， α 射线的穿透能力最弱， γ 射线的穿透能力最强。

物理学家们经过多方面的研究后确认： α 射线是高速粒子流，粒子带正电，电荷量是电子的2倍，质量是氢原子的4倍，实际上就是氦原子核。 α 粒子的速度可以达到光速的 $\frac{1}{10}$ 。由于 α 粒子带电，质量又比较大，通过气体时很容易把气体分子中的电子剥离，使气体带电。由于与物质中的微粒作用时会损失自己的能量， α 粒子的穿透能力较差，在空气中只能前进几厘米，用一张纸就能把它挡住。

射线飞行途中遇到原子并将其部分能量转移给原子中的电子，使这个电子脱离核的束缚成为自由电子，这样的过程叫电离。射线的上述作用叫做电离作用。

β 射线是高速电子流，它的速度更大，可达光速的99%。它的电离作用较弱，穿透能力较强，很容易穿透黑纸，也能穿透几毫米厚的铝板。

γ 射线是能量很高的电磁波，波长很短，在 10^{-10} m 以下。它的电离作用更小，穿透能力更强，甚至能穿透几厘米厚的铅板和几十厘米厚的混凝土。

实验发现，如果一种元素具有放射性，那么，无论它是以单质存在，还是以化合物形式存在，都具有放射性。放射性的强度也不受温度、外界压强的影响。由于元素的化学性质决定于原子核外的电子，这就说明射线与这些电子无关，也就是说，射线来自原子核。这说明原子核内部是有结构的。

α 射线、 β 射线都是高速运动的粒子，能量很高， γ 射线是波长很短的光子，能量也很高。从原子内部能够射出这样高能的粒子，这使科学家们意识到原子核是一个能量的宝库。

原子核的组成 1919年，卢瑟福用镭放射出的 α 粒子轰击氮原子核，从氮核中打出了一种新的粒子。根据这种粒子在电场和磁场中的偏转，测出了它的质量和电荷，原来它就是氢原子核，叫做质子（proton），用p表示。以后，人们用同样的方法从氟、钠、铝等原

子核中都打出了质子,由此断定,质子是原子核的组成部分。

质子带正电荷,电荷量与一个电子的电荷量相等。质子的质量为

$$m_p = 1.672\,623\,1 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

原子核只由质子组成吗?如果原子核中只有质子,那么任何一种原子核的质量与电荷量之比,都应该等于质子的质量与电荷量之比。实际并不是这样,绝大多数原子核的质量与电荷量之比都大于质子的相应比值。卢瑟福猜想,原子核内可能还存在着另一种粒子:它的质量与质子相同,但是不带电。他把这种粒子叫做**中子(neutron)**。1932年,卢瑟福的学生查德威克通过实验证实了这个猜想。

中子不带电,用符号 n 表示。中子的质量是

$$m_n = 1.674\,928\,6 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

与质子的质量非常接近,只比质子质量约大千分之一。

质子和中子除了是否带电的差异以及质量上的微小差别外,其余性质十分相似,而且都是原子核的组成成分,所以统称**核子(nucleon)**。

由于中子不带电,原子核所带的电荷等于核内质子电荷的总和。所以,原子核所带的电荷总是质子电荷的整数倍,通常用这个整数表示原子核的电荷量,叫做原子核的**电荷数**,用 Z 表示。原子核的质量等于核内质子和中子的质量的总和,而质子与中子的质量几乎相等,所以原子核的质量几乎等于单个核子质量的整数倍,这个倍数叫做原子核的**质量数**,用 A 表示。

原子核的电荷数就是核内的质子数,也就是这种元素的原子序数,而原子核的质量数就是核内的核子数。

原子核常用符号 ${}_Z^AX$ 表示, X 为元素符号,上角标 A 表示核的质量数,下角标 Z 表示核的电荷数(即原子序数)。例如,氦核可以表示为 ${}_2^4\text{He}$,它有 2 个质子和 2 个中子,所以电荷数是 2,质量数是 4。又如, ${}_{92}^{238}\text{U}$ 代表一种铀核,它的质量数为 238,电荷数为 92,即核内有 92 个质子、146 个中子。

原子核的质子数决定了核外电子的数目,也决定了电子在核外分布的情况,进而决定了这种元素的化学性质。因此,同种元素的原子,质子数相同,核外电子数也相同,它们就会具有相同的化学性质。但是,它们的中子数可能不同。这些具有相同质子数而中子数不同的原子核,在元素周期表中处于同一位置,因而互称**同位素(isotope)**。例如,氢有三种同位素,分别叫做氕(也就是通常说的氢)、氘(也叫重氢)、氚(也叫超重氢),符号是 ${}_1^1\text{H}$ 、 ${}_1^2\text{H}$ 、 ${}_1^3\text{H}$ 。

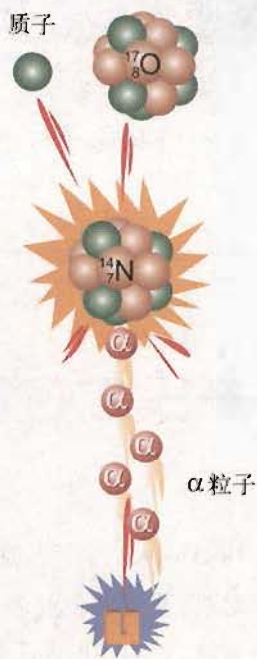


图 19.1-3 α 粒子轰击氮原子核

有时也用氢原子核的符号 ${}_1^1\text{H}$ 表示质子。

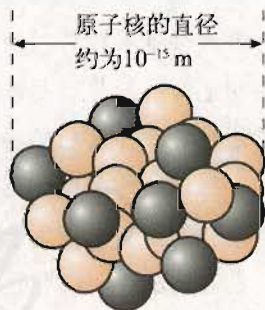


图 19.1-4 原子核的示意图

原子核的电荷数不是它所带的电荷量,质量数也不是它的质量。

思考与讨论

一种铀原子核的质量数是235,它的核子数、质子数和中子数分别是多少?

科学足迹

天然放射现象的发现

1895年末,德国物理学家伦琴发现了一种新的射线——X射线,即伦琴射线。现在我们知道,X射线是原子内层电子跃迁时发射的波长很短的电磁波。但在当时并不知道这些,所以它的发现激起了许多科学家的研究兴趣。

法国物理学家贝可勒尔对荧光研究了多年,他决定研究荧光与X射线的关系。1896年初,他选择了在日光照晒时能发出荧光的铀盐——硫酸钾铀酰做实验材料。他用黑纸把照相底片包住,放到这种铀盐的下面,在阳光下曝晒了几个小时。底片显影后,发现了铀盐在底片上的黑色轮廓,表示底片已经感“光”。阳光是不能透过黑纸的,贝可勒尔认为,这种铀盐受到阳光照射后除了能够发出可见的荧光外,还能发射X射线,是X射线透过黑纸使底片感光。

再次准备实验的时候遇到了几个阴天,贝可勒尔只好把准备好的铀盐和包好的底片一起放进了抽屉。几天以后,贝可勒尔在检查底片时意外发现底片又已经感光。这个事实使贝可勒尔认为铀盐本身能够发射一种神秘的射线,正是这种射线导致了底片感光。1896年3月2日,他在法国科学院例会上公布了这一发现。

贝可勒尔进一步用不发荧光的其他铀化合物进行实验,发现也能使底片感光。铀化合物发出的射线也像X射线一样能穿透多种物质。他还发现,只要有铀元素存在,不论是什么化合物,就一定有这种贯穿本领很强的射线发出。贝可勒尔认为这种射线不是X射线;他还进一步指出,发出射线的能力是铀原子自身的性质。

贝可勒尔的发现,实际上是人类第一次在实验室中观察到的原子核现象。但是,贝可勒尔的放射源只有铀这样一种元素,这使得他的研究有很大的局限性。

天然放射现象研究的下一个重大进展,是居里夫妇做出的。1897年,居里夫人在撰写博士论文时选择了贝可勒尔发现的射线作为研究课题。她首先证实,铀盐发出射线的强度只与化合物中铀的含量成正比,而与化合物的种类无关,也不受光照、加热、通电等因素的影响。由此,她确认这一现象的起因在于原子内部,并提出了“放射性”这个词,用来描写这一现象。

有些物质在可见光或其他射线照射下发出的可见光,叫做荧光。日光灯管发出的光、钞票上防伪标记在紫外线照射下发出的光,都是荧光。



贝可勒尔
(H. A. Becquerel, 1852—1908)

居里夫妇提出了一个重要的问题:是否还有其他元素也具有这种性质?他们决定检查当时知道的所有元素,结果发现钍也发射类似的射线。

居里夫妇还发现,某些含有铀钍混合物矿石的辐射强度比已测到的铀和钍的放射性强得多,他们大胆假定这些矿石中含有当时尚不知晓的某种其他放射性元素。

玛丽·居里和丈夫皮埃尔·居里一起开始了一项艰苦的工作:从沥青铀矿中分离这种新元素。1898年7月,他们得到了一种放射性比铀强400倍的新元素,并把它命名为钋(Polonium),以表达居里夫人对祖国波兰的热爱。同年12月,他们又发现了放射性比铀强百万倍的镭(Radium)。

镭的发现再次轰动了科学界,但是也有人怀疑它的存在。为了排除这一怀疑,居里夫妇经过艰苦繁重的工作,在几次提炼之后,终于在1902年从8t沥青铀矿渣中提炼出0.12g纯净的氯化镭,向世人证实了镭元素的存在。

居里夫妇和贝可勒尔由于对放射性的研究而一起获得1903年的诺贝尔物理学奖。在发现镭射线的治癌功能后,他们认为这种济世救人之物应该属于全世界。当镭以昂贵的价格出现在市场上时,他们自己却甘愿过着清贫的生活。居里夫人在1911年又因镭和钋的发现而获得了诺贝尔化学奖,成为两次获得诺贝尔奖的科学家。

可能是由于长期受到射线的照射,居里夫人死于白血病。

问题与练习

1. 有什么事实和理由可以说明放射性元素放出的射线来自原子核的内部?天然放射现象的发现对物质微观结构的研究有什么意义?
2. 课文中说“ γ 射线是能量很高的电磁波,波长很短”。为什么说电磁波的光子能量高,它的波长就一定短?
3. 一个验电器带正电,因为空气干燥,验电器金属箔的张角能维持很长的时间。现有一束 α 射线射向这个验电器上端的金属球,验电器金属箔的张角将会怎样变化?为什么?
4. 当人们发现了质子,并在很多原子核中打出了质子以后,有什么理由可以认定原子核中一定还存在着另外不同种类的粒子?
5. 用符号表示以下原子核:(1)铀238;(2)有6个中子的碳原子核;(3)质量数为14的碳原子核;(4)电荷数为8、质量数为17的原子核;(5) α 粒子。
6. 说出以下原子核的质子数、中子数:(1)钾40;(2) ${}^{66}_{29}\text{Cu}$;(3) ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ 。

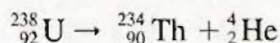
2

放射性元素的衰变

在古代,不论是东方还是西方,都有一批人追求“点石成金”之术,他们试图利用化学方法将一些普通的矿石变成黄金。当然,这些炼金术士的希望都破灭了,因为他们不知道一种元素变成另一种元素的根本在于原子核的变化。不过,类似于“点石成金”的事一直就在自然界中进行着,这就是伴随着天然放射现象发生的“衰变”。

原子核的衰变 原子核放出 α 粒子或 β 粒子,由于核电荷数变了,它在周期表中的位置就变了,变成另一种原子核。我们把这种变化称为原子核的衰变(decay)。

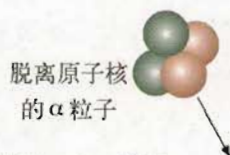
铀238核放出一个 α 粒子后,质量数减少4,电荷数减少2,成为新核。这个新核就是钍234核。这种衰变过程叫做 α 衰变。这个过程可以用下面的衰变方程表示



在这个衰变过程中,衰变前的质量数等于衰变后的质量数之和;衰变前的电荷数等于衰变后的电荷数之和。大量事实表明,原子核衰变时电荷数和质量数都守恒。



放射性衰变后的原子核

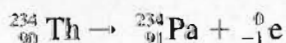
脱离原子核的 α 粒子图 19.2-1 α 衰变

“电荷数之和”指代数之和,因为发生 β 衰变时,电子的电荷数是-1。

思考与讨论

在 α 衰变中,新核的质量数与原来的核的质量数有什么关系?相对于原来的核在周期表中的位置,新核在周期表中的位置应当向前移还是向后移?要移动几位?你能概括出 α 衰变的质量数、核电荷数变化的一般规律吗?

${}_{92}^{238}\text{U}$ 在 α 衰变时产生的 ${}_{90}^{234}\text{Th}$ 也具有放射性,它能放出一个 β 粒子而变为 ${}_{91}^{234}\text{Pa}$ (镤)。由于电子的质量比核子的质量小得多,因此,我们可以认为电子的质量数为0、电荷数为-1,可以把电子表示为 ${}_{-1}^0\text{e}$ 。这样,原子核放出一个电子后,因为其衰变前后电荷数和质量数都守恒,新核的质量数不会改变但其电荷数应当加1。其衰变方程为^①



β 粒子在原子核里产生并射出



放射性衰变后的原子核

图 19.2-2 β 衰变

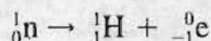
① 发生 β 衰变时,除了产生电子 ${}_{-1}^0\text{e}$ 外,还产生反电子中微子 $\bar{\nu}_e$ 。由于 $\bar{\nu}_e$ 的质量数和电荷数都是0,所以在中学教科书中一般都不写出。

放出 β 粒子的衰变叫做 β 衰变。

思考与讨论

在 β 衰变中，质量数、核电荷数有什么变化规律？

原子核里没有电子， β 衰变中的电子来自哪里？进一步的研究发现， β 衰变的实质在于核内的中子(${}_0^1\text{n}$)转化成了一个质子和一个电子。其转化方程是



这种转化产生的电子发射到核外，就是 β 粒子；与此同时，新核少了一个中子，却增加了一个质子。所以，新核质量数不变，而电荷数增加1。

事实表明，2个中子和2个质子能十分紧密地结合在一起，因此在一定条件下它们会作为一个整体从较大的原子核中被抛射出来，于是，放射性元素就发生了 α 衰变。

原子核的能量也跟原子的能量一样，其变化是不连续的，也只能取一系列不连续的数值，因此也存在着能级，同样是能级越低越稳定。放射性的原子核在发生 α 衰变、 β 衰变时，蕴藏在核内的能量会释放出来，使产生的新核处于高能级，这时它要向低能级跃迁，能量以 γ 光子的形式辐射出来。因此， γ 射线经常是伴随 α 射线和 β 射线产生的。当放射性物质连续衰变时，原子核中有的发生 α 衰变，有的发生 β 衰变，同时伴随着 γ 辐射。这时，放射性物质发出的射线中就会同时具有 α 、 β 和 γ 三种射线。

半衰期 放射性同位素衰变的快慢有一定的规律。例如，氡222经过 α 衰变成为钋218，如果隔一段时间测量一次剩余氡的数量就会发现，每过3.8天就有一半的氡发生了衰变。也就是说，经过第一个3.8天，剩有一半的氡；经过第二个3.8天，剩有 $\frac{1}{4}$ 的氡；再经过3.8天，剩有 $\frac{1}{8}$ 的氡（图19.2-3）……因此，我们可以用“半衰期”来表示放射性元素衰变的快慢。放射性元素的原子核有半数发生衰变所需的时间，叫做这种元素的半衰期(half life)。

不同的放射性元素，半衰期不同，甚至差别非常大。例如，氡222衰变为钋218的半衰期是3.8天，镭226衰变为氡222的半衰期是1620年，铀238衰变为钍234的半衰期竟长达 4.5×10^9 年。

衰变是微观世界里原子核的行为，而微观世界规律的特征之一在于“单个的微观事件是不可预测的”，即对于一个特定的氡原子，我们只知道它发生衰变的概率，而不知道它将何时发生衰变。一个特定的氡核可能在下1s就衰变，也可能在10min之内衰变，也可能在

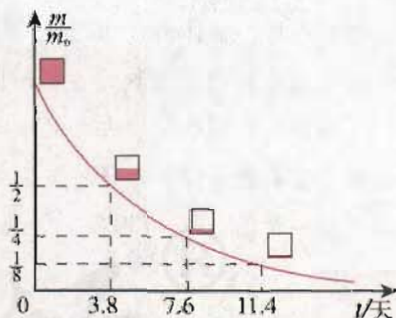


图19.2-3 氡的衰变。纵坐标表示的是任意时刻氡的质量 m 与 $t=0$ 时的质量 m_0 的比值。

200万年之后再衰变。然而,量子理论可以对大量原子核的行为做出统计预测。例如,对于大量氢核,可以准确地预言在1 s后、10 min后,或200万年后,各会剩下百分之几没有衰变。放射性元素的半衰期,描述的就是这样的统计规律。

放射性元素衰变的快慢是由核内部自身的因素决定的,跟原子所处的化学状态和外部条件没有关系。例如,一种放射性元素,不管它是以单质的形式存在,还是与其他元素形成化合物,或者对它施加压力、提高温度,都不能改变它的半衰期。这是因为压力、温度或其他元素的化合等,都不会影响原子核的结构。

科学漫步

一、碳14测年技术

1996年开始的“夏商周断代工程”,是我国“九五”计划的重要科研项目,经过200多位专家历时5年的合作研究,标志性成果《夏商周年表》于2000年11月9日正式公布。研究成果将我国的历史纪年由西周晚期的共和元年,即公元前841年,向前延伸了1200多年。夏商周断代工程综合研究不仅利用了历史学、古文献学、古文字学、天文学的研究成果,而且也利用了碳14衰变来进行年代测定。

自然界中的碳主要是 ^{12}C ,也有少量 ^{14}C 。 ^{14}C 是高层大气中的 ^{12}C 原子核在太阳射来的高能粒子流的作用下产生的。 ^{14}C 具有放射性,能够自发地进行 β 衰变,变成氮,半衰期为5730年。 ^{14}C 原子不断产生又不断衰变,达到动态平衡,因此它在大气中的含量相当稳定,大约每 10^{12} 个碳原子中有一个 ^{14}C 。活的植物通过光合作用和呼吸作用与环境交换碳元素,体内 ^{14}C 的比例与大气中的相同。植物枯死后,遗体内的 ^{14}C 仍在衰变,不断减少,但是不能得到补充。因此,根据放射性强度减小的情况就可以推算植物死亡的时间。

例如,要推断一块古木的年代,可以先把古木加湿,制取1 g碳的样品,再用粒子计数器进行测量。如果测得样品每分钟衰变的次数正好是现代植物所制样品的一半,表明这块古木经过了 ^{14}C 的一个半衰期,即5730年,如果测得每分钟衰变的次数是其他值,也可以根据半衰期计算出古木的年代。

在夏商周断代工程中,通过改进设备、严格控制样品质量等措施,已经使 ^{14}C 测年精度达到 ± 20 年。

当然,一种文物年代的最终确定,也不能只用 ^{14}C 这一种方法,而是要通过多方面比较对照。例如,我国考古人员用 ^{14}C 对长沙马王堆一号汉墓的外椁盖板杉木测量。结果表明该墓距今 2130 ± 95 年;再通过历史文献考证,该墓主人生活在西汉早期,应在2100年前,两者符合得很好。

在经济建设中也会用到碳14测定年代的方法。例如,进行基本建设时,地质基础的力学性质是个重要指标。一般说来,地层形成年代越早,固结程度越高,抗冲击性和承压性越好。北京饭店新楼施工时,在地面以下13 m深的位置发现了两棵直径达1 m的榆树。用碳14测定,这两棵树距今 29285 ± 1350 年。据此数据,建设部门认为这个地层已经足够古老,可以作为地基,于是停止下挖,这样就节约了资金。

二、碳 13 与胃病检测

幽门螺杆菌可以引发多种胃病，因此能否准确、迅速地检测病人是否受到感染，对于治疗方案的选择是个关键。幽门螺杆菌在生命过程中会产生一种酶，它使尿素分解，生成物中包括二氧化碳。如果在检测前让病人服下少量尿素，根据呼出的气体中是否含有酶分解尿素产生的二氧化碳，即可做出诊断。

然而，正常新陈代谢也会产生二氧化碳。为了将二者区分，可以请病人服下用 ^{14}C 合成的尿素。 ^{14}C 与 ^{12}C 的化学性质相同，不过具有放射性，因此检测呼出的二氧化碳是否具有放射性即可准确判断。但是射线对人体有害，所以这不是很好的办法。

现在医院里普遍选用的尿素是用无放射性的 ^{13}C 合成的。用质谱仪或光谱分析的方法检测呼出的二氧化碳中是否含有 ^{13}C ，就可以判断病人的胃部是否被幽门螺杆菌感染。这种方法准确、迅速，现在已经得到了广泛应用。

问题与练习

1. β 射线是高速电子流。原子核中没有电子，为什么有些放射性元素的原子核会放射 β 粒子？
2. 写出放射性元素 $^{210}_{84}\text{Po}$ （钋核）的 β 衰变方程。
3. 写出放射性元素 $^{234}_{90}\text{Th}$ （钍核）的 α 衰变方程。
4. $^{238}_{92}\text{U}$ （铀核）衰变为 $^{222}_{86}\text{Rn}$ （氡核）要经过几次 α 衰变，几次 β 衰变？
5. 已知钍 234 的半衰期是 24 天，1 g 钍经过 120 天后还剩多少？
6. 铋 210 的半衰期是 5 天，经过多少天后，20 g 铋还剩 1.25 g？

3

探测射线的方法

肉眼看不见射线，但是，射线中的粒子与其他物质作用时产生的现象，会显示射线的存在。例如，下面这些现象可以用来探知射线和各种运动的粒子。

1. 粒子使气体或液体电离，以这些离子为核心，过饱和的蒸气会产生雾滴，过热液体会产生气泡。

2. 使照相乳胶感光。
3. 使荧光物质产生荧光。

根据射线的这些效应,可以制成多种探测器。下面是几种常在学校中用到或在科学研究中用到的探测方法。

威耳逊云室 图19.3-1是威耳逊云室的结构图,其主要部分是一个圆筒状容器,底部可以上下移动,相当于活塞,上盖是透明的,可以通过它观察粒子运动的径迹。云室里面有干净的空气。实验时,先往云室里加少量酒精,使室内充满酒精的饱和蒸气,然后迅速向下拉动活塞,室内气体膨胀,温度降低,酒精蒸气达到过饱和状态。这时如果有粒子在室内气体中飞过,使沿途的气体分子电离,过饱和酒精蒸气就会以这些离子为核心凝结成雾滴,于是显示出射线的径迹。这种云室是英国物理学家威耳逊在1912年发明的,叫做威耳逊云室。

图19.3-2甲、乙两图分别是 α 射线和 β 射线在云室中的径迹。 α 粒子的质量比较大,在气体中飞行时不易改变方向。由于它的电离本领大,沿途产生的离子多,所以它在云室中的径迹直而清晰。高速 β 粒子的径迹又细又直,低速 β 粒子的径迹又短又粗而且是弯曲的。 γ 粒子的电离本领很小,在云室中一般看不到它的径迹。

根据径迹的长短和粗细,可以知道粒子的性质;把云室放在磁场中,从带电粒子运动轨迹的弯曲方向,还可以知道粒子所带电荷的正负。

气泡室 气泡室的原理同云室的原理类似,所不同的是气泡室里装的是液体,如液态氢。控制气泡室内液体的温度和压强,使温度略低于液体的沸点。当气泡室内压强突然降低时,液体的沸点变低,因此液体过热,粒子通过液体时在它的周围就有气泡形成。图19.3-3为气泡室中粒子径迹的照片。根据照片可以分析粒子的动量、能量及带电情况等。

盖革-米勒计数器 盖革-米勒计数器的主要部分是盖革-米勒计数管(图19.3-4)。它的外



甲 示意图



乙 实物

图19.3-1 威耳逊云室

甲 α 粒子乙 β 粒子

图19.3-2 粒子在威耳逊云室中的径迹

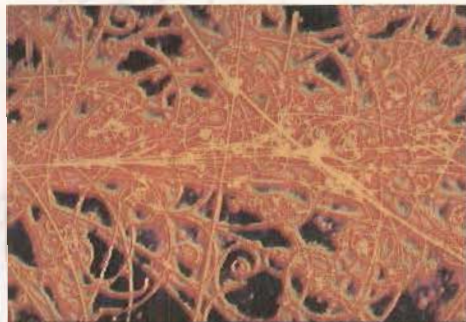


图19.3-3 粒子通过气泡室时的照片。带电粒子的径迹呈曲线是由于在磁场中受到了洛伦兹力的作用。

面是玻璃管,里面有一个接在电源负极的导电圆筒(或在玻璃管上镀导电膜代替),筒的中间有一条接正极的金属丝。玻璃管中装有低压的惰性气体,如氩、氖等,以及少量酒精蒸气或溴蒸气,管内压强约为 $10 \sim 20 \text{ kPa}$ 。金属丝和圆筒间的电压约 100 V ,这个电压稍低于管内气体的电离电压。



图 19.3-4 盖革-米勒计数管

当射线粒子进入管内时,它使管内的气体电离,产生的电子在电场中加速。电子跟管中的气体分子碰撞时,又使气体分子电离,产生电子……这样,一个粒子进入管中可以产生大量电子。这些电子到达阳极,正离子到达阴极,在电路中就产生一次脉冲放电,利用电子仪器可以把放电次数记录下来。

这种装置是德国物理学家盖革(H. W. Geiger)与米勒(P. Müller)在1928年研制成的,又称G-M计数器。G-M计数器非常灵敏,用它检测射线十分方便。但是不同的射线在盖革-米勒计数器中产生的脉冲现象相同,因此只能用来计数,不能区分射线的种类。此外,如果同时有大量粒子,或两个粒子射来的时间间隔小于 $200 \mu\text{s}$,盖革-米勒计数器也不能区分它们。

做一做

用传感器测量放射性

G-M管可以把射入粒子的数目转换为电脉冲的数目,所以它是一种辐射传感器。

把G-M管产生的脉冲输入计算机,就可以即时统计粒子数目,从而探知辐射的强弱,并可对不同辐射源的强度进行对比。

图19.3-5中,传感器盒子边缘的倾斜部分里面装着G-M管。开始计数后,计算机荧光屏上每隔1 min跳出一个竖直的狭长矩形,表示G-M管在这1 min内接收粒子的数目,如图19.3-6。



图 19.3-5 安放 G-M 管的盒子

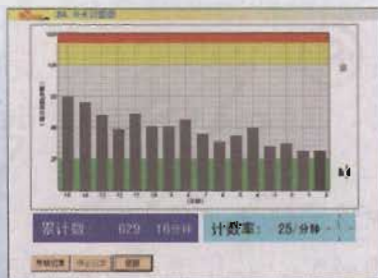


图 19.3-6 过去 16 min 内每分钟辐射次数的直方图

放射源可用学校实验室里与威耳逊云室配套的弱放射源。此外,目前有些地区还可以买到气灯罩,它含有硝酸钍 $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$,具有微弱的放射性。图19.3-6就是对气灯罩的射线计数得到的直方图。

图19.3-6的下部用绿色标出,即使没有放射源,G-M管也会记录微弱的辐射,但不会高于这个区域。这些辐射称为本底辐射,来自宇宙射线或地壳中的放射性物质。

用传感器还可以研究射线强度与距离的关系,不同物质对射线的吸收能力等许多课题。

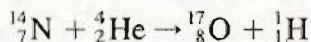
问题与练习

1. 用威耳逊云室探测射线时,为什么 α 粒子的径迹直而清晰?为什么利用威耳逊云室一般看不到 γ 粒子的径迹?
2. 威耳逊云室和盖革-米勒计数管都利用了放射线使气体电离的性质。它们各用什么方法显示气体离子的存在?
3. 根据课文的介绍,请你比较威耳逊云室和盖革-米勒计数器的优缺点。

4

放射性的应用与防护

核反应 衰变是原子核的自发变化,科学家更希望人工控制原子核的变化。当初卢瑟福用 α 粒子轰击氮原子核,产生了氧的一种同位素——氧17和一个质子,即

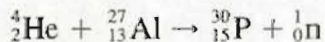


那是人类第一次实现的原子核的人工转变。

不仅用 α 粒子,用质子、中子甚至用 γ 光子去轰击一些原子核,都可以实现原子核的转变,通过这种方式可以研究原子核的结构,还可以发现和制造新元素。

原子核在其他粒子的轰击下产生新原子核的过程,称为核反应(nuclear reaction)。与衰变过程一样,在核反应中,质量数守恒、电荷数守恒。

人工放射性同位素 有些同位素具有放射性,叫做放射性同位素。1934年,约里奥-居里夫妇发现经过 α 粒子轰击的铝片中含有放射性磷 ${}^{30}_{15}\text{P}$,即



自然界没有天然的 ${}^{30}_{15}\text{P}$,它是通过核反应生成的人工放射性同位素。在这之前人们只知道有铀、钍、镭、钋等天然存在的放射性元素,这些元素都是位于元素周期表末尾的重核元素。

天然放射性同位素不过40多种,而今天人工制造的放射性同位素已达1 000多种,每

I. 约里奥-居里(I. Joliot-Curie)和F. 约里奥-居里(F. Joliot-Curie)是M. 居里和P. 居里的女儿和女婿,由于发现了人工放射性而获1935年诺贝尔化学奖。

种元素都有了自己的放射性同位素。丰富的放射性同位素资源，使它在国民经济和科学研究的各个领域得到了广泛的应用。与天然放射性物质相比，人工放射性同位素的放射强度容易控制，还可以制成各种所需的形状。特别是，它的半衰期比天然放射性物质短得多，因此放射性废料容易处理。由于这些优点，凡是用到射线时，现在用的都是人工放射性同位素，而不用天然放射性物质。

放射性同位素的应用 工业部门可以使用射线来测厚度。例如轧钢厂的热轧机上可以安装射线测厚仪，仪器探测到的 γ 射线强度与钢板的厚度有关，轧出的钢板越厚，透过的射线越弱。因此，将射线测厚仪接收到的信号输入计算机，就可以对钢板的厚度进行自动控制。

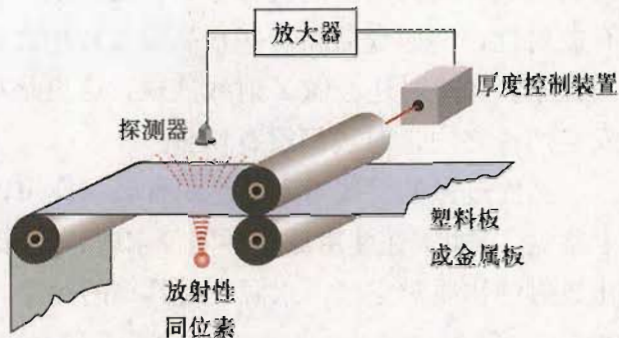


图 19.4-1 射线测厚装置

在医疗方面，患了癌症的病人可以接受钴60的放射治疗。为什么射线能够用于治疗癌症呢？原来人体组织对射线的耐受能力是不同的，细胞分裂越快的组织，它对射线的耐受能力就越弱。像癌细胞那样，不断迅速繁殖的、无法控制的细胞组织，在射线照射下破坏得比健康细胞快。



图 19.4-2 放射治疗

利用 γ 射线照射种子，会使种子的遗传基因发生变异，经过筛选，可以培育出优良品种。用 γ 射线照射食品可以杀死使食物腐败的细菌，抑制蔬菜发芽，延长保存期。

一种放射性元素的原子核，跟这种元素其他同位素的原子核具有相同数量的质子，因此核外电子的数量也相同。由此可知，一种元素的各种同位素都有相同的化学性质。这样，我们可以用放射性同位素代替非放射性的同位素来制成各种化合物，这种化合物的原子跟通常的化合物一样参与所有化学反应，但却带有“放射性标记”，可以用仪器探测出来。这种原子就是示踪原子。



图 19.4-3 射线的照射能延长草莓的保质期

棉花在开花、结桃的时候需要较多的磷肥，把磷肥喷在棉花叶子上，磷肥也能被吸收。但是，什么时候的吸收率最高、磷在作物内能存留多长时间、磷在作物体内的分布情况等，用通常的方法很难研究。如果用磷的放射性同位素制成肥料喷在棉花的叶面上，然后每隔一定时间用探测器测量棉株各部位的放射性强度，上面的问题就解决了。

人体甲状腺的工作需要碘，碘被吸收后聚集在甲状腺内。给人注射碘的放射性同位素碘 131，然后定时用探测器测量甲状腺及邻近组织的放射强度，有助于诊断甲状腺的

疾病。

近年来,有关生物大分子的结构及其功能的研究,几乎都要借助于示踪原子。

辐射与安全 人类一直生活在放射性的环境中。例如,地球上的每个角落都有来自宇宙的射线,我们周围的岩石,其中也有放射性物质。我们的食物和日常用品中,有的也具有放射性,例如食盐和有些水晶眼镜片中含有钾40,香烟中含有钋210,这些也是放射性同位素。体检时还会做X射线透视,这更是剂量比较大的照射。不过这些辐射的强度都在安全剂量之内,对我们没有伤害。

然而过量的射线对人体组织有破坏作用,这种破坏往往是对细胞核的破坏,有时不会马上察觉。因此,在使用放射性同位素时,必须严格遵守操作规程,注意人身安全,同时要防止放射性物质对空气、水源、用具等的污染。

STS

贫铀弹

在1999年的科索沃战争中,贫铀弹被用于战场。以美国为首的北约军队共发射了31000多枚贫铀弹。贫铀弹的使用及其带来的严重后果,引起了世人的高度关注。

所谓“贫铀”是从天然铀中提取铀235后的废料,99%以上是铀238,由于它具有低水平的放射性,故称贫铀。贫铀合金具有高密度、高强度、高韧性的特点,用它做弹芯可以摧毁坚固的建筑物甚至坦克等装甲目标。贫铀弹爆炸后的残留物会产生一定的放射性,对人体造成危害。由于残留物分布广泛,清理困难,所以贫铀弹的使用造成了环境灾难。

问题与练习

- 原子核的人工转变与放射性元素的衰变有什么区别?
- 写出下列原子核人工转变的核反应方程。
 - $^{23}_{11}\text{Na}$ (钠核) 俘获1个 α 粒子后放出1个质子;
 - $^{27}_{13}\text{Al}$ (铝核) 俘获1个 α 粒子后放出1个中子;
 - $^{16}_8\text{O}$ (氧核) 俘获1个中子后放出1个质子;
 - $^{30}_{14}\text{Si}$ (硅核) 俘获1个质子后放出1个中子。
- 完成下列核反应方程。
 - $^{19}_9\text{F} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{22}_{10}\text{Ne} + (\quad)$;
 - $^{10}_5\text{B} + (\quad) \rightarrow ^1_0\text{n} + ^{10}_4\text{Be}$;
 - $^{14}_7\text{N} + ^1_0\text{n} \rightarrow (\quad) + ^{14}_6\text{C}$ 。

4. 在人体中,碳占整个身体质量的18%。生物体的每克碳内含有大约500亿个碳14原子,其中每分钟大约有10个碳14原子衰变。请根据这些数据估计,我们身体中1s内衰变的碳原子的个数是多少?
5. 存在射线危险的地方,常能看到如图19.4-4所示的标志。你在什么地方见过这个标志?为了保护人身安全,在有这样的标志的场所,应该注意什么?



图 19.4-4 国际通用的放射性标志

5

核力与结合能

中子和质子构成原子核,这样的模型提出以后有个问题当时未能得到解释——在原子核那样狭小的空间里,带正电的质子为什么能挤在一起而不飞散?

核力与四种基本相互作用 20世纪初,人们只知道自然界存在着两种力:一种是万有引力,另一种是电磁力。对于带电粒子,在相同的距离上这两种力的强度差别很大,电磁力大约要比万有引力强 10^{35} 倍。

基于这两种力的性质,原子核中的质子要靠自身的万有引力来抗衡相互间的库仑斥力是不可能的。核物理学家猜想,原子核里的核子间有第三种相互作用存在,即存在着一种核力,是核力把核子紧紧地束缚在核内,形成稳定的原子核。后来的实验证实了科学家的猜测,并进一步揭示了核力的以下特点。

(1) 核力是强相互作用(强力)的一种表现。在原子核的尺度内,核力比库仑力大得多。

(2) 核力是短程力,作用范围在 $1.5 \times 10^{-15} \text{ m}$ 之内。核力在大于 $0.8 \times 10^{-15} \text{ m}$ 时表现为吸引力,超过 $1.5 \times 10^{-15} \text{ m}$ 时,核力急剧下降几乎消失;而在距离小于 $0.8 \times 10^{-15} \text{ m}$ 时,核力表现为斥力,因此核子不会融合在一起。

电磁力和万有引力都是“长程力”,即它们可以作用到无限远。当然距离越远,力就越小。

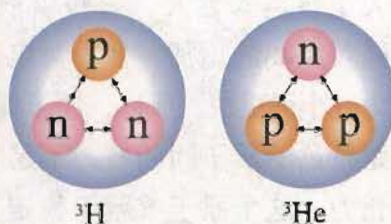


图 19.5-1 核力与电荷无关

万有引力、电磁力和强力分别在不同的尺度上发挥作用。在原子核内,强力将核子束缚在一起。在原子核外,电磁力使电子不脱离原子核而形成原子,使原子结合成分子,使分子结合成液体和固体。引力主要在宏观和宇观尺度上“独领风骚”,是引力使行星绕着恒星转,并且联系着星系团,决定了宇宙的现状和未来。

(3) 每个核子只跟邻近的核子发生核力作用, 这种性质称为核力的饱和性。

然而, 直到今日, 人们对核力的了解还很不够, 特别是在小于 $0.8 \times 10^{-15} \text{ m}$ 时核力的变化规律还不清楚。这些是科学家们正在奋力攻克堡垒。

除核力外, 核物理学家还在原子核内发现了自然界的第四种相互作用——弱相互作用(弱力), 弱相互作用是引起原子核 β 衰变的原因, 即引起中子-质子转变的原因。弱相互作用也是短程力, 其力程比强力更短, 为 10^{-18} m , 作用强度则比电磁力小。

物理学家一直梦想将自然界中的四种相互作用纳入某种统一的理论之中。爱因斯坦为此做了大半生的努力, 但没有成功。1967年, 温伯格(S. Weinberg)和萨拉姆(A. Salam)在格拉肖(S. Glashow)电弱统一模型的基础上提出了电弱统一的完善理论。他们三人因此获得了1979年的诺贝尔物理学奖。

原子核中质子与中子的比例 大家已经知道, 一个质子与一个中子结合在一起是氢的一种同位素——氘。两对质子-中子相结合就是氦, 8对质子-中子的结合是氧。这些都是自然界中存在的原子核。那么, 这样质子数与中子数相等的结构, 能够形成很大的原子核吗? 不会的。从图19.5-2看出, 自然界中较轻的原子核, 质子数与中子数大致相等, 但对于较重的原子核, 中子数大于质子数, 越重的元素, 两者相差越多。

这个现象能够用核力与电磁力的不同特点来解释。

可以设想, 我们把质子与中子成对地放在一起, 人工构建原子核, 它的质子数与中子数相等。人工核越来越大, 有些核子间的距离越来越远。随着距离的增加, 核力与电磁力都会减小, 但核力减小得更快。所以, 原子核大到一定程度时, 相距较远的质子间的核力不足以平衡它们之间的库仑力, 这个原子核就不稳定了。这时, 如果不再成对地增加质子和中子, 而只增加中子, 中子与其他核子没有库仑斥力, 但有相互吸引的核力, 所以有助于维系原子核的稳定。由于这个原因, 稳定的重原子核里, 中子数要比质子数多。由于核力的作用范围是有限的, 以及核力的饱和性, 如果我们继续增大原子核, 一些核子间的距离会大到其间根本没有核力的作用, 这时即使再增加中子, 形成的核也一定是不稳定的。

在宇宙演化的进程中, 各种粒子有机会进行各种组合, 但那些不稳定的组合逐渐瓦解了, 只有200多种稳定的原子核长久地留了下来。

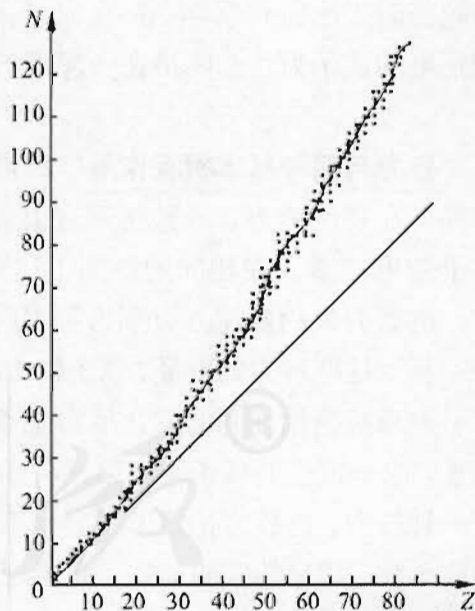


图 19.5-2 稳定核的质子数与中子数的关系

地壳中放射性元素的原子核正处于瓦解过程之中。

结合能 我们考虑下面的问题。相距很远的两个物体，由于万有引力而相互接近，运动速度越来越大，引力势能转化为动能。最后撞在一起，动能变成它们的内能散失掉了。两个物体为了结合而付出了代价——失去了一些能量，如果要把它们分开，还要重新赋予它们这份能量。

这是用宏观物体做的一个例子。原子核是核子凭借核力结合在一起构成的，要把它们分开，也需要能量，这就是原子核的**结合能 (binding energy)**。

其实我们还遇到过其他类似的例子。要使基态氢原子电离，也就是要从氢原子中把电子剥离，需要通过碰撞、施加电场、让氢原子吸收光子等途径使它得到 13.6 eV 的能量。这个能量实际上就是电子与氢原子核的结合能，不过我们把它叫做氢原子的电离能，而结合能一词通常只用在原子核中。

结合能并不是由于核子结合成原子核而具有的能量，而是为把核子分开而需要的能量。

自然，组成原子核的核子越多，它的结合能越高。因此，有意义的是它的结合能与核子数之比，称做**比结合能 (specific binding energy)**，也叫平均结合能。比结合能越大，原子核中核子结合得越牢固，原子核越稳定。

质量亏损 原子核的结合能很难直接测量。幸好，爱因斯坦已经给我们指出了物体的能量与它的质量的关系，即

$$E = mc^2$$

单个的质子、中子的质量已经精确测定。用质谱仪或其他仪器测定某种原子核的质量，与同等数量的质子、中子的质量之和相比较，看一看两条途径得到的质量之差，就能推知原子核的结合能。

例题 已知中子的质量是 $m_n = 1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，质子的质量是 $m_p = 1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，氦核的质量是 $m_0 = 3.3436 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，求氦核的比结合能。

解 单个的质子与中子的质量之和为

$$m_p + m_n = (1.6726 + 1.6749) \times 10^{-27} \text{ kg} = 3.3475 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

这个数值与氦核质量之差

$$\begin{aligned} (m_p + m_n) - m_0 &= (3.3475 - 3.3436) \times 10^{-27} \text{ kg} \\ &= 0.0039 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{aligned}$$

与这个质量差相对应的能量为

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0.0039 \times 10^{-27} \times (3.00 \times 10^8)^2 \text{ J} = 3.51 \times 10^{-13} \text{ J}$$

在核物理中，能量单位常常使用电子伏特： $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ ，所以，氦核的结合能是

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

氦核的比结合能为

$$\frac{2.19 \text{ MeV}}{2} = 1.10 \text{ MeV}$$

通过这个例题可以看出,原子核的质量小于组成它的核子的质量之和,这个现象叫做**质量亏损 (mass defect)**。质量亏损表明,的确存在着原子核的结合能。

不同原子核的比结合能是不一样的,图19.5-3是按照实际测量结果画的图线。可以看出:中等大小的核的比结合能最大(平均每个核子的质量亏损最大),这些核最稳定。

这个现象在20世纪20年代末曾经引起遐想:如果使较重的核分裂成中等大小的核,或者把较小的核合并成中等大小的核,核子的比结合能都会增加,即核子将发生新的质量亏损,释放新的结合能。这些能量岂不是可以供人使用?

前景的确诱人,但是怎样使原子核发生分裂或者合并呢?这在当时是无法解决的问题。

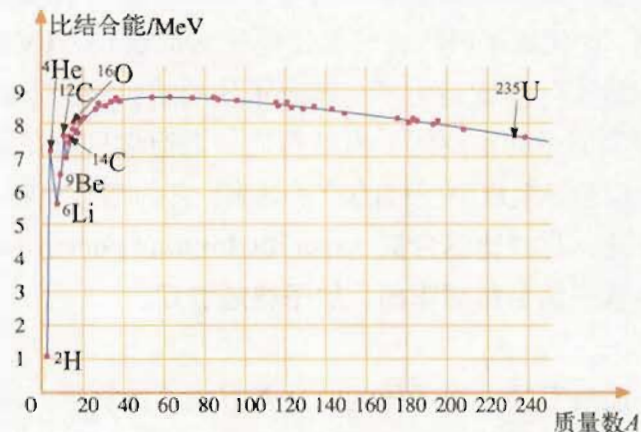


图 19.5-3 原子核的比结合能

问题与练习

- 从以下几个方面比较核反应与化学反应的相同和相异之处。
 - 它们各自涉及四种基本力中的哪一种?
 - 每种反应分别改变了或重新安排了什么?
- 通常我们看到物体的能量发生变化时,为什么觉察不到物体质量发生的变化?
- 碳原子质量的 $\frac{1}{12}$ 叫做原子质量单位,用 u 表示。请根据 $E = mc^2$ 证明: $1 u$ 相当于 931 MeV 。
- 印刷“两弹一星”这四个字的油墨的质量大约是 $1 \mu\text{g}$ (10^{-9} kg)。与这些质量相当的能量如果完全用来增加重力势能,它可以使一架本身质量 6000 kg 、载有 60 名体重 50 kg 学生的直升机升到多高?

20 世纪 30 年代，物理学家的一个重大发现改变了人类历史。

核裂变 1938 年底，德国物理学家哈恩（O. Hahn）和他的助手斯特拉斯曼（F. Strassmann）在用中子轰击铀核的实验中发现，生成物中有原子序数为 56 的元素钡。

奥地利物理学家迈特纳（L. Meitner）和弗里施（O. R. Frisch）对此做出了解释：铀核在被中子轰击后分裂成两块质量差不多的碎块。弗里施借用细胞分裂的生物学名词，把这类核反应定名为**核裂变（nuclear fission）**。

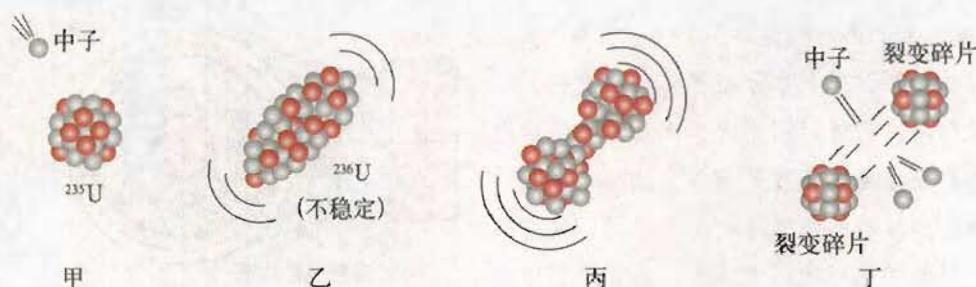
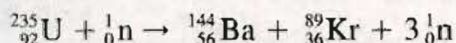


图 19.6-1 核裂变示意图

铀核裂变的产物是多样的，一种典型的铀核裂变是生成钡和氪，同时放出 3 个中子，核反应方程是



裂变中放出中子，数目有多有少，中子的速度也有快有慢。以铀 235 为例，裂变时产生 2 或 3 个中子，如果这些中子继续与其他铀 235 核发生反应，再引起新的裂变，就能使核裂变反应不断地进行下去。这种由重核裂变产生的中子使裂变反应一代接一代继续下去的过程，叫做核裂变的**链式反应（chain reaction）**。

铀块的大小是链式反应能否进行的重要因素。原子核的体积非常小，原子内部的空隙很大，如果铀块不够大，中子在铀块中通过时，就有可能碰不到铀核而跑到铀块外面去，链式反应不能继续。只有当铀块足够大时，裂变产生的中子才有足够的概率打中某个铀核，使链式反应进行下去。通常把裂变物质能够发生链式反应的最小体积叫做它的**临界体积**，相应的质量叫做**临界质量**。

铀核裂变时如果生成物不同，释放的能量也有差异。一个铀 235 核裂变时释放的能量如果按 200 MeV 估算，1 kg 铀

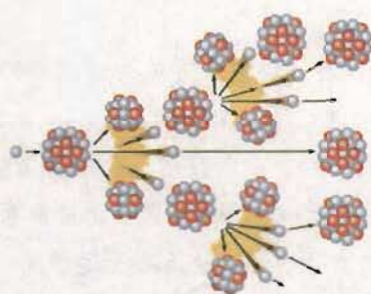


图 19.6-2 链式反应示意图

我国科学家钱三强、何泽慧夫妇于 1947 年在实验中观察到铀核也可能分裂为三部分或四部分，其概率大约是分裂为两部分的概率的千分之三。

1 t 标准煤燃烧时发出 $2.93 \times 10^{10} \text{ J}$ 的热量。

235 全部裂变时放出的能量就相当于 2 800 t 标准煤完全燃烧时释放的化学能!

STS

原子弹与科学家的责任

原子弹是利用重核裂变的链式反应制成的,在极短时间内能够释放大量的核能,发生猛烈爆炸。

原子弹的燃料是 ^{235}U 或 ^{239}Pu 。在天然铀中只有 0.7% 的 ^{235}U ,剩下的 99.3% 是不易裂变的 ^{238}U 。为得到高浓度的 ^{235}U ,就必须进行同位素分离,形成 ^{235}U 含量较高的浓缩铀。 ^{239}Pu 在自然界并不存在,人们利用核反应堆中产生的中子打击 ^{238}U ,生成物衰变后成为 ^{239}Pu ,然后再利用化学方法将 ^{239}Pu 从 ^{238}U 中分离出来。

原子弹的结构有“内爆式”和“枪式”两种。

“内爆式”原子弹的构造如图 19.6-3 所示。核燃料一般做成球形,体积小于临界体积。它的外部安放化学炸药,引爆时利用化学炸药爆炸的冲击波将核燃料压缩至高密度的超临界状态,聚心冲击波同时压缩放在核燃料球心的中子源,使它释放中子,引起核燃料的链式反应。为了降低中子逃逸率以减小临界质量,节省核燃料,四周用铀 238 做成中子反射层,使逃出燃料区的部分中子返回。

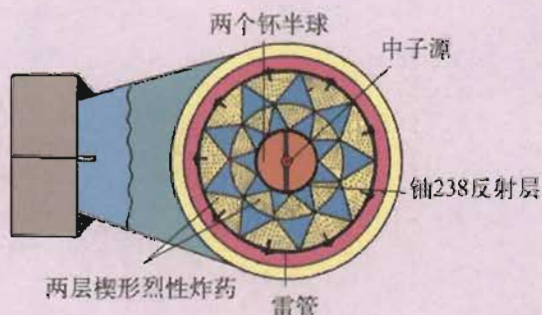
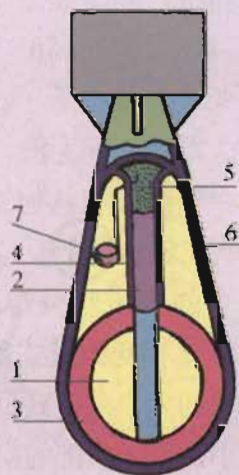


图 19.6-3 内爆式原子弹示意图

“枪式”原子弹的构造如图 19.6-4,弹壳里分开放置着一块球形和一块圆柱形高浓度铀 235。每一块的体积都小于临界体积而大于临界体积的一半,在贮存时不会发生爆炸。这两块铀 235 彼此隔开一段距离,其中球形的被固定,圆柱形的后面安装普通炸药和引爆装置。当普通炸药爆炸时,两块铀压在一起形成一个整块,其体积超过临界体积,立刻发生链式核反应而爆炸。

第二次世界大战时核裂变的研究已经成熟。当时法西斯侵略战争在蔓延,一些科学家,特别是那些从法西斯迫害下逃亡出来的科学家,已经预感到制造原子弹的危险,尤其是风传德国正在加紧链式反应的研究,又获悉德国采取了禁止铀矿石出口等措施,他们更加焦虑万分。1939 年 7 月,核物理学家西拉德 (L. Szilard) 等人一起找到爱因斯坦,想借助他的名声敦促美国赶在德国之前造出原子弹。于是爱因斯坦在 1939 年 8 月 2 日签署了给美国总统罗斯福的著名信件。罗斯福总统采纳了他们的建议,下令成立了铀顾问委员会,开始了代号为“曼哈顿工程”的原子弹研制工作,并于 1942 年 7 月委任奥本海默 (J. R. Oppenheimer, 1904—1967) 为这项工程的技术负责人。



1. 球形铀块 2. 圆柱形铀块
3. 中子反射层 4. 导向槽
5. 普通炸药 6. 原子弹外壳
7. 雷管

图 19.6-4 枪式原子弹示意图

1945年7月16日,第一颗原子弹在新墨西哥州的荒漠上爆炸成功,其爆炸力相当于1.8万吨TNT炸药。爆炸时安放原子弹的钢塔全部熔化,在半径400 m的范围内,沙石都被烧成黄绿色的玻璃状物质,半径1 600 m范围内所有动植物全部死亡。

原子弹的巨大威力震惊了世界,也使反对原子武器的呼声空前高涨。舆论不仅谴责下令使用原子弹的人,也要追究科学家的责任。大部分原子弹研制的倡议者成了反核战争的积极分子,奥本海默本人则辞去了职务,去进行宇宙线的纯科学研究。

为了打破核垄断,最终消灭核武器,1964年10月16日我国第一颗原子弹爆炸成功。同时,我国政府郑重承诺:中国在任何时候、任何情况下,都不首先使用核武器,不对无核国家或地区使用或威胁使用核武器。我国研制成功原子弹,极大地增强了我国的国防力量。



图 19.6-5 1964年10月16日,我国第一颗原子弹爆炸成功。

核电站 原子核的链式反应也可以在人工控制下进行。这样,释放的核能就可以为人类的和平建设服务。其实在第一个原子弹制成以前,科学家们已经实现了核能的可控释放。1942年,费米(E. Fermi, 1901—1954)就主持建立了世界上第一个称为“核反应堆”的装置,首次通过可控制的链式反应实现了核能的释放。

图 19.6-6 是当前普遍使用的“热中子(慢中子)”核反应堆的示意图。实际上,中子的速度不能太快,否则会与铀 235 原子核“擦肩而过”,铀核不能“捉”住它,不能发生核裂变。实验证明,速度与热运动速度相当的中子最适于引发裂变。这样的中子就是“热中子”,或称慢中子。但是,裂变产生的是速度很大的快中子,因此还要设法使快中子减速。为此,在铀棒周围要放“慢化剂”,快中子跟慢化剂中的原子核碰撞后,中子能量减少,变为慢中子。常用的慢化剂有石墨、重水和普通水(也叫轻水)。

为了调节中子数目以控制反应速度,还需要在铀棒之间插进一些镉棒。镉吸收中子的能力很强,当反应过于激烈时,将镉棒插入深一些,让它多吸收一些中子,链式反应的速度就会慢一些。这种镉棒叫做控制棒。

核燃料裂变释放的能量使反应区温度升高。水或液态的金属钠等流体在反应堆内外循环流动,把反应堆内的热量传输出去,用于发电,同时也使反应堆冷却。

反应堆放出的热使水变成水蒸气,这些高温高压的蒸汽推动汽轮发电机发电。这一部分的工作原理跟火力发电站相同。

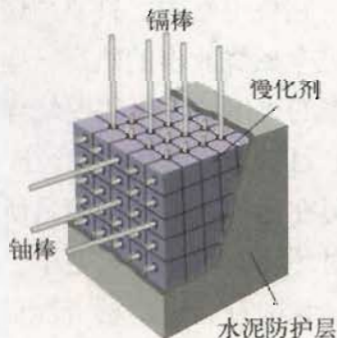


图 19.6-6 反应堆示意图

热中子反应堆的核燃料是铀棒,其成分是天然铀或浓缩铀(铀 235 的含量占 2%—4%)。

重水是两个氢原子与一个氧原子形成的化合物。它的化学性质与普通水相同,但分子量比普通水大。

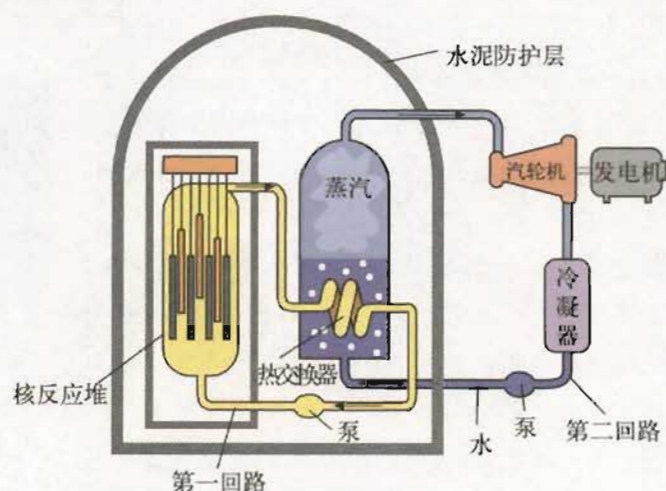


图 19.6-7 核电站工作流程

第一回路中的水被泵压入反应堆，通过堆芯时核反应放出的热使水的内能增加，水温升高。第一回路的水进入热交换器，把热量传给第二回路的水，然后又被泵压回反应堆里。

在热交换器内，第二回路中的水被加热生成高温高压蒸汽，驱动汽轮机运转。

在核电站中，只要“烧”掉一枝铅笔那么多的核燃料，释放的能量就相当于 10 吨标准煤完全燃烧放出的热。一座百万千瓦级的核电站，每年只消耗 30 吨左右的浓缩铀，而同样功率的火电站，每年要烧煤 250 万吨！

目前，核电技术已经成熟，在经济效益方面也跟火力发电不相上下。作为核燃料的铀、钍等在地球上的可采储量所能提供的能量，比煤、石油等所能提供的能量大 15 倍左右。核电对环境的污染比火电小。目前核能发电已经超过世界总发电量的六分之一。

我国有一定的核资源储量、相当规模的核技术装备和核技术队伍，已经具备了发展核电的基本条件。2009 年，我国已经成为世界上核电在建规模最大的国家。

建造核电站时需要特别注意防止射线对人体的伤害，还要防止放射性物质对水源、空气和工作场所造成放射性污染。为此，在反应堆的外面需要修建很厚的水泥层，用来屏蔽裂变产物放出的各种射线。核反应堆用过的核废料具有很强的放射性，需要装入特制的容器，深埋地下。

我国具有完全自主知识产权的三代百万千瓦级核电技术电站——华龙一号（图 19.6-8），设置了完善的严重事故预防和缓解措施，其安全指标和技术性能已达到国际最先进的三代水平。我国的核能发电技术已居于世界领先地位。



图 19.6-8 华龙一号压力容器

一、石墨堆、重水堆、轻水堆、压水堆、沸水堆

近年来,在新闻中常常见到标题上的这些术语,它们各代表什么意思,为什么会引起公众的注意?分别用石墨、重水、轻水做慢化剂,相应的反应堆就是石墨堆、重水堆、轻水堆。

我们在第十六章已经学过,一个运动的小球与另一个静止的小球发生弹性碰撞时,如果两球的质量相等,原来运动的小球会静止下来,把能量全部传递给后者。快中子与普通水中的氢原子的碰撞正是这样的情形,所以普通水对中子的减速效果很好。但是,普通水中的氢核容易吸收中子,使链式反应难以进行,而重水中的氘不易吸收中子,所以最初的反应堆用重水做慢化剂。后来,由于核燃料浓缩技术的进步,可以制造高浓度的核燃料了,反应中损失一些中子影响不大,这样就能够用廉价的普通水做慢化剂。因此,现在建造的反应堆多数是轻水堆。当初用石墨做慢化剂,也是由于它不吸收中子,现在有了高浓度的核燃料,石墨堆也就不再用了。除此之外,石墨堆和重水堆运行过程中可以生产制造原子弹用的钚,常引起国际政治问题,这也是目前发展轻水堆的原因之一。

压水堆和沸水堆都用普通水做慢化剂和冷却剂,其主要区别在于压水堆内水压很高,达到大气压的150倍,水在堆内温度升得很高但不沸腾,流到蒸汽发生器来为另一个循环中的水加热,产生发电用的蒸汽。而沸水堆则容许水在堆芯内沸腾,产生蒸汽,并把蒸汽直接送去推动汽轮机发电。沸水堆由于压力小,所以安全性能较好,但堆芯体积和反应堆的外壳要比压水堆大得多。

二、燃料越烧越多的“魔炉”——快中子增殖反应堆

前面介绍的慢中子(热中子)反应堆属于第一代实用核反应堆,以铀235为裂变燃料。但是铀235在天然铀中只占0.7%,其余99.3%的铀238不能利用。为了解决这个问题,更充分地利用铀资源,科学家们研究出了一种能使铀238变成高效核燃料从而使核燃料越烧越多的“魔炉”——快中子增殖反应堆。

“快堆”中用的核燃料是钚239。钚239裂变释放出快中子,装在反应区周围的铀238吸收快中子后变成钚239,钚239很不稳定,经过两次 β 衰变后变成钚239。这就是说,在反应堆中一边“烧”掉钚239,又一边使铀238转变成新的钚239,而且新产生的钚239比“烧”掉的还多。这就是燃料增殖的秘密。

当快堆中相当多的铀238转变成钚239时,就可取出来再做燃料。一般来说,一座快堆核电站在5~15年的时间内增殖的燃料与起初投入的燃料一样多,即燃料的数量翻了一番。利用快堆,可以将天然铀资源的利用率由慢中子堆的1%~2%提高到60%~70%,相当于使天然铀资源增加了60~70倍。

快中子增殖反应堆目前还处于研制阶段。我国实验性快堆已于2009年建成。

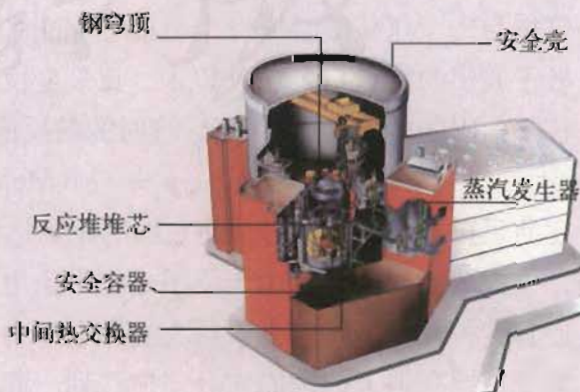


图 19.6-9 快堆剖面示意图

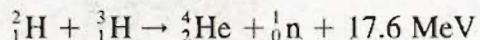
问题与练习

1. 什么是核裂变？什么是链式反应？
2. 在核反应堆中，用什么方法控制核裂变的速度？
3. 已知 $^{226}_{88}\text{Ra}$, $^{222}_{86}\text{Rn}$, ^4_2He 的原子量分别是 226.025 4, 222.017 5, 4.002 6。求出 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 在 α 衰变 $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^4_2\text{He}$ 中放出的能量（以电子伏特为单位）。
4. 在一个反应堆中用石墨做慢化剂使快中子减速。碳核的质量是中子的 12 倍，假设中子与碳核的每次碰撞都是弹性正碰，而且认为碰撞前碳核都是静止的。
(1) 设碰撞前中子的动能是 E_0 ，经过一次碰撞，中子失去的动能是多少？
(2) 至少经过多少次碰撞，中子的动能才能小于 $E_0 \times 10^{-6}$ ？
5. 一个铀核衰变为钍核时释放一个 α 粒子。已知铀核的质量为 $3.853\,131 \times 10^{-25} \text{ kg}$ ，钍核的质量为 $3.786\,567 \times 10^{-25} \text{ kg}$ ， α 粒子的质量为 $6.646\,72 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，在这个衰变过程中释放的能量等于多少焦耳？
6. 秦山核电站一期工程装机容量为 30 万千瓦。如果 1 g 铀 235 完全裂变时产生的能量为 $8.2 \times 10^{10} \text{ J}$ ，并且假定所产生的能量都变成了电能，那么每年要消耗多少铀 235？

7

核聚变

核聚变 两个轻核结合成质量较大的核，这样的核反应叫做核聚变 (nuclear fusion)。从比结合能的图线中看 (图 19.5-3)，聚变后比结合能增加，因此反应中会释放能量。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)，释放 17.6 MeV 的能量，平均每个核子放出的能量在 3 MeV 以上，比裂变反应中平均每个核子放出的能量大 3~4 倍。这时的核反应方程是



要使轻核发生聚变，必须使它们的距离达到 10^{-15} m 以内，核力才能起作用。由于原子核都带正电，要使它们接近到这种程度，必须克服巨大的库仑斥力。也就是说，原子核要有很大的动能才会“撞”到一起。什么办法能使大量原子核获得足够的动能来发生聚变呢？有一种办法，就是把它们加热到很高的温度。当物质的温度

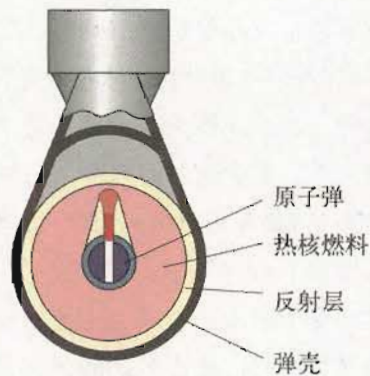


图 19.7-1 氢弹原理图

达到几百万开尔文时,剧烈的热运动使得一部分原子核具有足够的动能,可以克服库仑斥力,碰撞时十分接近,发生聚变。因此,聚变又叫热核反应。热核反应一旦发生,就不再需要外界给它能量,靠自身产生的热就会使反应继续下去。

目前,热核反应主要用在核武器上,那就是氢弹。氢弹原理如图 19.7-1 所示,首先由普通炸药引爆原子弹,再由原子弹爆炸产生的高温高压引发热核爆炸。

实际上,热核反应在宇宙中时时刻刻地进行着,太阳就是一个巨大的热核反应堆。

太阳的主要成分是氢。太阳的中心温度达 $1.5 \times 10^7 \text{ K}$ 。在这样的高温下,氢核聚变成氦核的反应不停地进行着,不断地放出能量。现在地球上消耗的能量,追根溯源,绝大部分还是来自太阳,即太阳内部聚变时释放的核能。

太阳在“核燃烧”的过程中“体重”不断减轻。它每秒有 7 亿吨原子核参与反应,辐射出的能量与 400 万吨的物质相当。科学家估计,太阳的这种“核燃烧”还能维持几十亿年。当然,与人类历史相比,这个时间很长很长!



图 19.7-2 太阳的巨大能量就是核聚变产生的。几十亿年来,太阳每秒辐射出的能量约为 $3.8 \times 10^{26} \text{ J}$, 相当于 1 千亿吨煤燃烧所放出的能量,其中 20 亿分之一左右的能量被地球接收。

太阳的寿命已经有 50 亿年了。

受控热核反应 聚变与裂变相比有很多优点。第一,轻核聚变产效率高,也就是说,相同质量的核燃料,反应中产生的能量比较多。第二,地球上聚变燃料的储量丰富,每升水中就含有 0.03 g 氘,地球上的河流、湖泊、海洋等有 138.6 亿亿立方米的水,大约有 40 多万亿吨氘。反应中所用的氘可以利用锂来制取。地球上锂的储量有 2 000 亿吨,用来制取氘足以满足聚变的需要。第三,轻核聚变更安全、清洁。实现核聚变需要高温,一旦出现故障,高温不能维持,反应就自动终止了。另外,氘和氘聚变反应中产生的氦是没有放射性的,放射性废物主要是泄漏的氘,以及聚变时高速中子、质子与其他物质反应而生成的放射性物质,比裂变反应堆生成的废物数量少、容易处理。

实现核聚变的难点是,地球上没有任何容器能够经受如此高的温度。为了解决这个难题,科学家设想了两种方案,即磁约束和惯性约束。

带电粒子运动时在均匀磁场中会由于洛伦兹力的作用而不飞散,因此有可能利用磁场来约束参加反应的物质,这就是磁约束。环流器(即 tokamak, 音译为托卡马克)是目前性能最好的一种磁约束装置,图 19.7-3 是其结构示意图。



图 19.7-3 环流器的结构

也可以利用聚变物质的惯性进行约束。由于聚变反应的时间非常短,聚变物质因自身的惯性还来不及扩散就完成了核反应。在惯性约束下,可以用激光从各个方向照射参加反应的物质,使它们“挤”在一起发生反应。

总的来说,实现受控核聚变还有一段很长的路要走,比较乐观的估计是在21世纪中叶有可能实现技术突破。一旦能够稳定地输出聚变能,世界上将不再有“能源危机”。

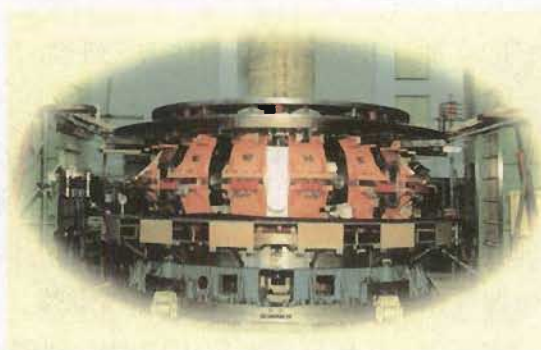


图 19.7-4 中国环流器新一号

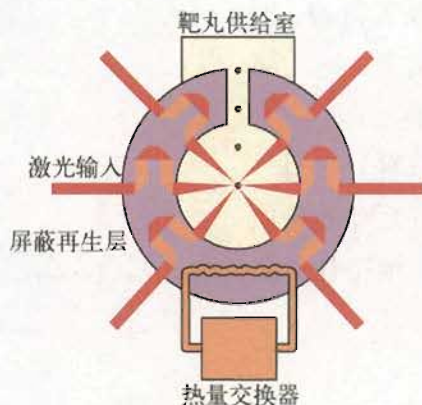


图 19.7-5 惯性约束示意图



图 19.7-6 用激光引发核聚变的设备

问题与练习

1. 什么是核聚变? 聚变过程中的能量转化有什么特点?
2. 一个 α 粒子融合到一个 ^{16}O 核中, 写出这个核反应的方程式。这个反应式左右两边的原子核相比, 哪边具有较多的结合能?
3. 太阳的总输出功率为400亿亿瓦 ($4 \times 10^{26} \text{ W}$), 它来自三种核反应, 这些反应的最终结果是氢转变为 ^4He 。按照总输出功率计算, 太阳每秒失去多少质量? 尽管有这么大的质量损失, 太阳仍将在上百亿年以后才结束它的生命, 这期间太阳质量将只减少0.5%!
4. 在某些恒星内, 三个 α 粒子结合成一个 ^{12}C 核。从元素周期表中查出 ^{12}C 的质量和 ^4He 的质量, 计算这个反应中放出的能量。
5. 请分析: 在地球上实现受控热核反应的必要性、可能性和困难是什么?

“基本粒子”不基本 直到19世纪末,人们都认为原子是组成物质的不可再分的最小微粒。后来发现了电子、质子和中子,并且知道了原子核和电子组成了原子,质子和中子组成了原子核。于是许多人认为光子、电子、质子和中子是组成物质的不可再分的最基本的粒子,并把它们叫做“基本粒子”。然而,随着科学的进一步发展,科学家们认识到这些粒子并不“基本”。这是因为,一方面,科学家们逐渐发现了数以百计的不同种类的新粒子,它们都不是由质子、中子、电子组成的;另一方面,科学家们又发现质子、中子等本身也有自己的复杂的结构。所以,从20世纪后半期起,就将“基本”二字去掉,统称为粒子。

发现新粒子 从20世纪30年代以来,人们在对宇宙线的研究中陆续发现了一些新的粒子。1932年发现了正电子,1937年发现了 μ 子,1947年发现了K介子和 π 介子。后来还发现了一些粒子,质量比质子的质量大,叫做超子。

1932年发明的加速器,能使带电粒子加速到很高的能量。人们用它进行了许多核物理实验而不再依赖天然的宇宙射线,于是发现了更多的粒子。实验中发现,存在着这样一类粒子,它们的质量、寿命、自旋等物理性质与过去已经发现的粒子相同,而电荷等其他性质相反,这些粒子叫做反粒子。例如,电子的反粒子是正电子,它的电荷量与电子相同,但带的是正电荷。质子的反粒子是反质子,它的电荷量与

最初发现的介子的质量介于核子与电子之间,故称介子。后来发现一些新的粒子,它们的性质应该属于介子,但质量比核子还大,不过介子这个名称沿用下来了。

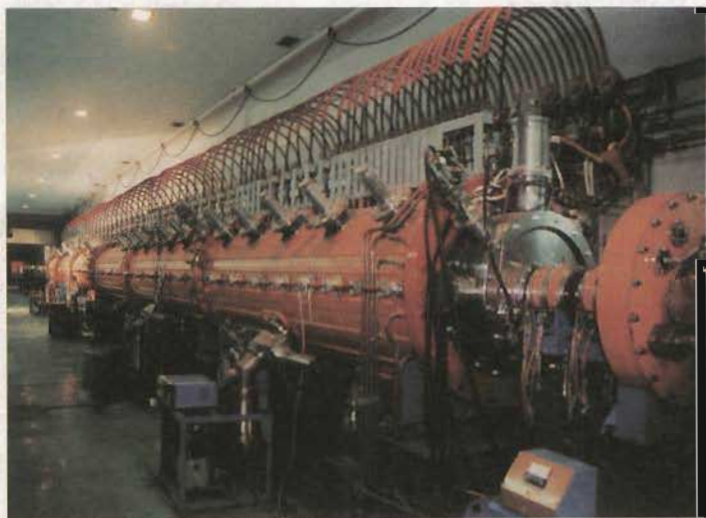


图 19.8-1 加速器

质子相同,但带的是负电荷。现在已经发现的粒子达400多种。按照粒子与各种相互作用的不同关系,可以将粒子分为三大类:强子、轻子和媒介子。

强子 强子是参与强相互作用的粒子。质子是最早发现的强子。强子又分为介子和重子两类。

轻子 轻子是不参与强相互作用的粒子。最早发现的轻子是电子,后来发现的轻子有电子中微子、 μ 子和 μ 子中微子、 τ 子和 τ 子中微子。每种轻子都有对应的反粒子。目前发现的轻子只有这6种,其中 τ 子的质量比核子的质量还大,但从力的性质上讲它仍然属于轻子。现代实验还没有发现轻子的内部结构。

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

夸克模型 许多实验事实表明,强子是有内部结构的。1964年提出的夸克模型,认为强子由更基本的成分组成,这种成分叫做**夸克(quark)**。夸克模型经过几十年的发展,已经被多数物理学家接受。夸克有6种,它们是上夸克、下夸克、奇异夸克、粲夸克、底夸克、顶夸克,它们带的电荷分别为元电荷的 $+\frac{2}{3}$ 或 $-\frac{1}{3}$ 。每种夸克都有对应的反夸克。到目前为止,人们已经从实验中发现了所有6种夸克及其反夸克存在的证据。

夸克模型的提出是物理学发展中的一个重大突破,它指出电子电荷不再是电荷的最小单元,即存在分数电荷。目前人们对夸克的认识还是很初步的,科学家们直到今天都还未捕捉到自由的夸克。夸克不能以自由的状态单个出现,这种性质称为夸克的“禁闭”。能否解放被禁闭的夸克,是21世纪物理学面临的重大课题之一。

宇宙的演化 物理学中有一个非常有趣的现象:研究微观世界的粒子物理、量子理论,与研究宇宙的理论竟然相互沟通、相互支撑。正如诺贝尔物理学奖获得者格拉肖所说:“隐藏在原子内心的,是宇宙结构的秘密。”

根据宇宙大爆炸的理论,在宇宙形成之初是“粒子家族”尽显风采的时期。在大爆炸之后约 10^{-44} s,那时的温度为 10^{32} K,产生了夸克、轻子、胶子等粒子。大爆炸后约 10^{-6} s,温度下降到 10^{13} K左右,夸克构成了质子和中子等强子,成为强子时代。再晚一些时候,温度下降到 10^{11} K时,只剩下少量夸克,而自由的光子、中微子和电子等轻子大量存在,此时代称为轻子时代。当温度下降到 10^9 K时,中子和质子结合成氘核,并很快生成氦核,同时有氚核、氦3等轻核及其他轻核生成,此时成为核合成的时代。目前宇宙中存在的大部分氦是那时形成的。大爆炸1万年之后,温度降到了 10^4 K,此时的宇宙由电子、质子和氦核的混合电离气体组成。当温度降到3 000 K时,电子与质子复合成为中性的氢原子。继续冷却,质子、电子、原子等与光子分离而逐步组成恒星和星系。

恒星的演化 根据大爆炸宇宙学,大爆炸10万年后,温度下降到了3 000 K左右,出现了由中性原子构成的宇宙尘埃。某些尘埃间的距离相对近些,由于万有引力的作用,形成了更密集的尘埃。尘埃像滚雪球一样越滚越大,形成了气体状态的星云团。星云团的进一步凝聚使得引力势能转变为内能,温度升高。温度上升到一定程度就开始发光。于是,恒星诞

生了。

这颗星继续收缩、继续升温。当温度超过 10^7 K 时，氢通过热核反应成为氦，释放的核能主要以电磁波的形式向外辐射。辐射产生的向外的压力与引力产生的收缩压力平衡，这时星体稳定下来。恒星在这一阶段停留的时间最长。太阳目前正处于这一阶段的中期，要再过 50 亿年才会转到另一个演化阶段。

当恒星核心部分的氢大部分聚变为氦以后，核反应变弱，辐射压力下降，星核在引力作用下收缩。这时引力势能产生的热将使温度升得更高，于是发生了氦核聚合成碳核的聚变反应。类似的过程一波接一波地继续下去，出现了氧、硅，直到铁等更重的元素。恒星在这个阶段要经历多次膨胀与收缩，光度也会反复变化。



图 19.8-2 编号为 M42 的猎户座大星云，距太阳系约 1 700 光年，在冬季的南部天空肉眼依稀可见。其中一些新恒星的年龄只有几十万年。

当各种热核反应都不再发生时，由热核反应维持的辐射压力也消失了。星体在引力作用下进一步收缩，中心密度达到极大。

恒星最后的归宿是什么？这与恒星的质量大小有关。天体物理的研究表明，如果恒星的质量大致介于 1~8 倍太阳质量之间，它会演变为白矮星，即体积很小，但质量不太小的恒星。如果恒星的质量是太阳质量的约 10~20 倍，更强大的压力使得原子被“压碎”，电子和质子被压在一起，整个恒星成为中子组成的天体，叫做中子星。当恒星的质量更大时，其内部的任何物质都无法抵抗巨大引力产生的压力，物质被“压”成了更为神奇的天体——黑洞。要进一步了解白矮星、中子星、黑洞等天体物理学知识，同学们可在科普书籍、杂志和互联网上查找。



科学足迹

华人科学家在粒子物理领域的杰出贡献

一批华人科学家在粒子物理领域有着众多举世瞩目的重大贡献。

在所有粒子物理发展史专著上都会提到华人科学家赵忠尧、王淦昌、杨振宁、李政道、吴健雄、丁肇中等人的成果。他们是粒子物理天穹上耀眼的巨星。

赵忠尧院士于 1929~1930 年发现硬 γ 射线在重元素中的反常吸收。

王淦昌院士1942年提出证实中微子存在的一种实验方案：观察轻原子K俘获过程中的核反冲。半年后，美国物理学家阿伦照此方案进行实验，找到了中微子。王淦昌还预言在100亿电子伏特质子同步加速器上有可能找到反超子，并于1959年找到了一个与反西格玛负超子有关的事例。

1956年，杨振宁和李政道提出，在弱相互作用过程中宇称不守恒，并提出了实验验证的建议。1957年，吴健雄领导的小组在 ^{60}Co 的 β 衰变中证实了宇称不守恒的论断。不久，宇称不守恒在其他弱作用过程中也得到了证实。为此，李政道、杨振宁获得1957年的诺贝尔物理学奖。

1974年，丁肇中领导的小组发现了一种新的粒子。这种粒子有两个奇怪的性质：质量大，大约是质子质量的3.3倍，寿命长，比一般介子的寿命长5000倍。这个发现证实了人们对存在第四夸克——C（粲）夸克的预测。美国科学家里克特也在这一年独立地发现了这种粒子，丁肇中与里克特共获1976年的诺贝尔物理学奖。这种新粒子被命名为 J/ψ 粒子。

作业：查找华人科学家在粒子物理领域的更多成果和事迹，在课堂上交流。

问题与练习

1. 请设计和绘制一个合理的表格，在表格中填上相关的内容，全面概括你对粒子分类的了解。
2. 制作一个或两个方框图，描述宇宙演化和恒星演化的过程。

人教版®

课题研究

研究建筑石材的放射性

背景知识

建筑材料造成的放射性危害有两类，即体外辐射与体内辐射。

体外辐射指天然石材中的辐射物对人体的直接超剂量辐射。体内辐射指放射源衰变时形成的放射性气体氡被人体吸入，从而对人造成的放射伤害。氡是自然界惟一的放射性气体，氡进入人的呼吸系统能诱发肺癌；另外，氡对脂肪有很高的亲和力，从而影响人的神经系统，使人精神不振，昏昏欲睡。

建筑用的天然石材分为大理石、花岗岩两大类。花岗岩有多种成分共生，其中很可能有放射性元素。大理石的成分相对单纯，主要是碳酸钙，存在放射性物质的可能性比花岗岩小。一般来说，红色、绿色、深红色石材如杜鹃红、印度红、枫叶红、玫瑰红等辐射超标的可能性较大。

为了防止放射性元素含量过高的石材进入我们的环境，我国早在 1993 年就制定了《天然石材放射性保护分类控制标准》。在这个标准中，石材分为 A、B、C 三类，每一类都有分

日常生活中的辐射剂量

项目	剂量
国家规定的安全标准	5 mSv/ 年
北京地区的天然本底	2 mSv/ 年
吃食物	0.2 mSv/ 年
砖制居室	0.4 mSv/ 年
泥土、空气	0.5 mSv/ 年
吸烟 20 支/ 天	1 mSv/ 年
乘飞机	0.001 mSv/ 小时
门诊透视(向荧光板投影)	> 0.3 mSv/ 次
胸部 X 光片(向胶片投影)	> 0.1 mSv/ 次

注：Sv 为剂量当量单位，名称为“希沃特”，mSv 为“毫希沃特”。

在现代医用放射投影设备中，一种光电转换板代替了荧光板或感光胶片。它的作用与电视摄像管中的感光板相似，可以把人体在 X 光下的投影转换成电子图像。医生在显示器上观察，或用激光扫描在胶片上成像。由于这种光电转换器件的灵敏度很高，X 射线可以很弱，所以大大减少了病人和医生接受的辐射剂量。

类控制值。符合这三类指标的石材都算符合标准，只是使用范围不同。标准规定：符合A类标准的石材，其使用范围不受限制；符合B类标准但不符合A类标准的石材，不宜用做居室的内饰面，但可用于其他建筑物的内饰面和任何建筑物的外饰面；C类石材只可用于建筑物的外饰面或作为海堤、桥墩及碑石、园林等外装修材料。

购买石材时应该认真了解是否达到相应的放射性安全标准。

调查研究

1. 查阅资料，或到当地的地矿所、防疫站、环保局访问，了解上述A、B、C三类控制标准的具体内容。了解家庭装修中使用石材应该注意的问题。

2. 到建材市场，了解经销商对他们自己经营的石材放射性的认识。了解建筑材料放射性污染的规定和建材市场上不同石材的放射性强度。

3. 选取几种石材样品，参照本章第3节“做一做”介绍的方法，用传感器和计算机对比几种石材的放射性，并与已知放射源（如学校威尔逊云室的配套放射源）的放射强度做对比。

最后写出调查研究的综合报告。

人教版®

后 记

根据《基础教育课程改革纲要(试行)》的精神,我们按照《普通高中物理课程标准(实验)》的要求编写了共同必修及其他三个系列的全套教科书,本册经全国中小学教材审定委员会2005年初审通过,供普通高中试用。

这套教科书在编写中,得到了诸多教育界前辈和各学科专家学者的热情帮助和大力支持。在本套教科书同课程改革实验区的师生见面时,我们特别感谢担任教科书总顾问的丁石孙、许嘉璐、叶至善、顾明远、吕型伟、王梓坤、梁衡、金冲及、白春礼、陶西平同志,感谢担任教科书编写指导委员会主任委员的柳斌同志和编写指导委员会委员的江蓝生、李吉林、杨焕明、顾泠沅、袁行霈等同志。

这套书的编写者以教育部物理课标组的核心成员为基础,由高校教师、中学教师和出版社的编辑人员三结合组成。共同必修部分和三个选修系列的编写小组分别起草,然后全体编写人员反复讨论、相互修改,因此,本书是编写组集体创作的成果。

在本书的编写过程中,由刘彬生、汪维澄、刘军组成的实验研究小组做过了全书所有的实验,检验和改进了书稿中的实验部分;由黄恕伯、李友安、叶柯、毛宗致组成的习题研究小组筛选和设计了全书的“问题与练习”。

董振邦、窦国兴、刘家福在编写的不同阶段审阅了书稿,提出了重要修改意见。

我们还要感谢使用本套教材的实验区的师生们。希望你们在使用本套教材的过程中,能够及时把意见和建议反馈给我们,对此,我们深表谢意。让我们携起手来,共同完成教材建设工作。

我们的联系方式如下:

电 话: 010-58758396

E-mail: jcfk@pep.com.cn

人民教育出版社 课程教材研究所
物理课程教材研究开发中心
2005年5月

谨向为本书提供照片的人士和机构致谢

第十六章章首图,《Physics at work》, Oxford University Press, 2000年/第2页左图,《The Physics of Everyday Phenomena》, McGraw-Hill, 2001年/第10页上图,《Physics for Tomorrow》, 文达出版(香港)有限公司, MANHATTAN PRESS(H.K.) LTD, 2004年/图16.5-3, 朱京/图16.5-8甲,《中国航天》, 中国航天科技集团公司, 2003年第10期/图16.5-8丙,《航天》, 宇航出版社, 1999年/第十七章章首图,《Physics Matters》, Hodder & Stoughton, 1995年/图18.4-3, 东方IC新闻图片网/第十九章章首图, 中国图片库/图19.6-3, 图19.6-4, 图19.6-5, 图19.6-8, 图19.7-4, 图19.7-6,《核能》, 宇航出版社, 1999年/图19.8-2, Kerry-Aim Lecky Hepburn.

