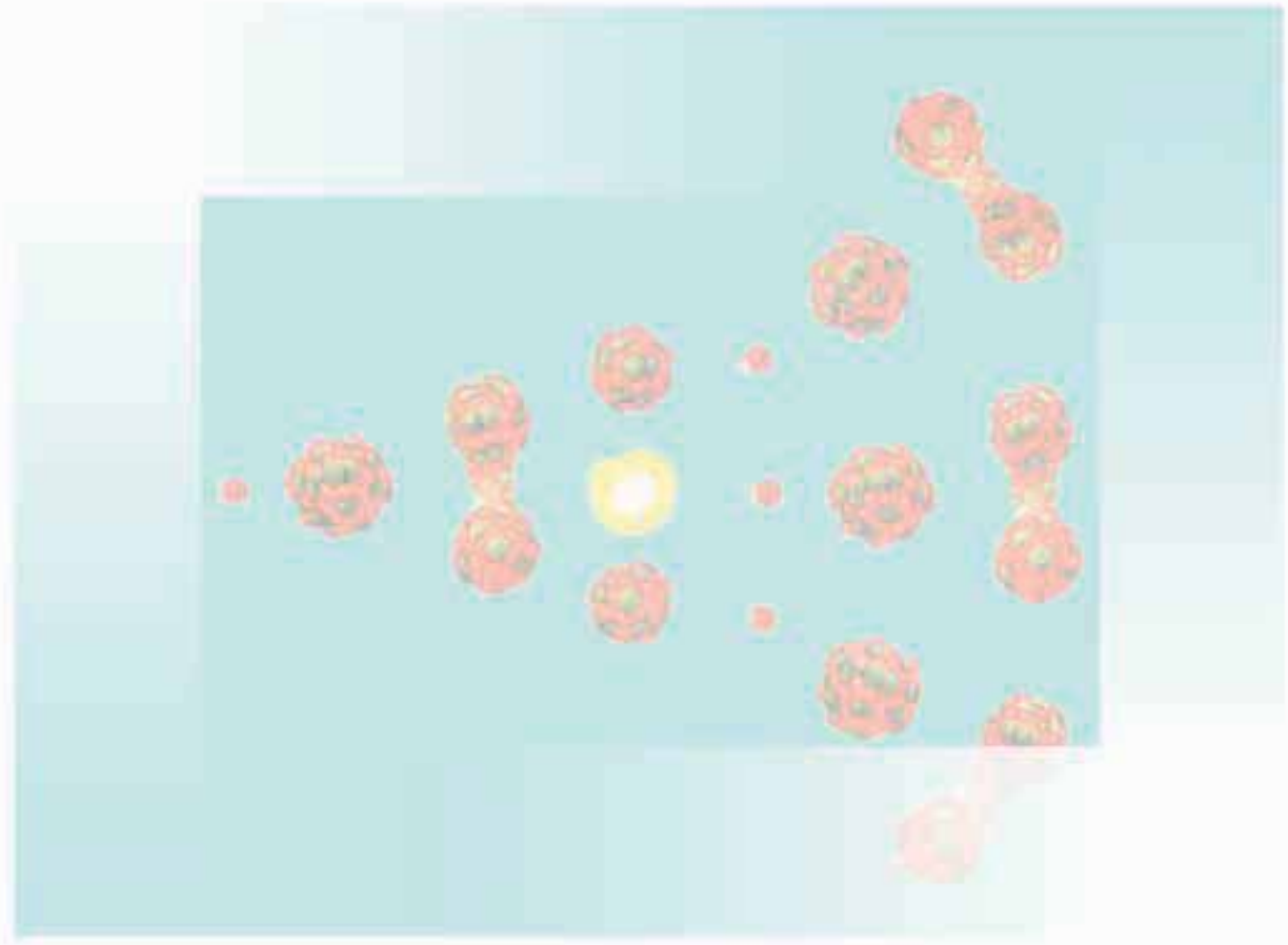
经全国中小学教材审定委员会 2005 年初审通过

普通高中课程标准实验教科书

物理

WULI

选修 3-5



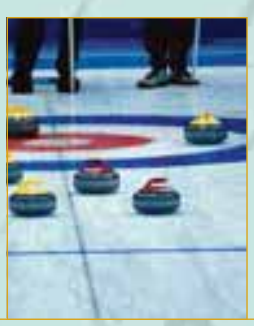
教育科学出版社
·北 京·

微信公众号：电子课本大全

目录

第一章 碰撞与动量守恒

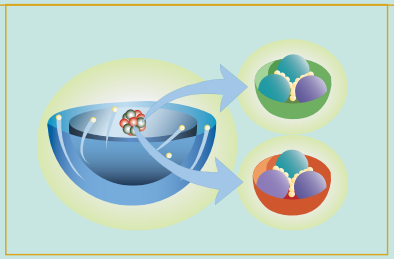
1. 碰撞……2
2. 动量……5
3. 动量守恒定律的应用……11
本章小结……16
习题……17



第二章 原子结构

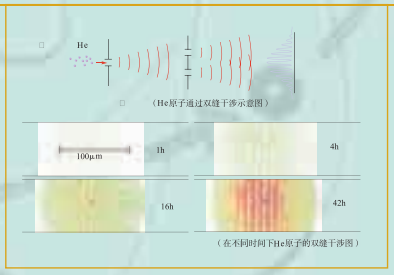
1. 电子……20
2. 原子的核式结构模型……22
3. 光谱　氢原子光谱……26
4. 玻尔的原子模型　能级……30
本章小结……33
习题……34





第三章　原子核

1. 原子核的组成与核力……36
2. 放射性　衰变……39
3. 放射性的应用、危害与防护……44
4. 原子核的结合能……48
5. 核裂变……52
6. 核聚变……56
7. 粒子物理学简介（选学）……60
本章小结……65
习题……66



第四章　波粒二象性

1. 量子概念的诞生……68
2. 光电效应与光的量子说……71
3. 光的波粒二象性……75
4. 实物粒子的波粒二象性……78
5. 不确定关系……82
本章小结……87
习题……88

附录　中英文索引……89

微信公众号：电子课本大全

第一章 碰撞与动量守恒

- 碰撞
- 动量
- 动量守恒定律的应用

碰撞是物质世界的常见现象，子弹击中飞靶给人以愉悦，汽车发生追尾会给人们带来灾难，α粒子散射使人类认识了原子结构，在这些碰撞现象的背后蕴藏着什么样的规律？



冰壶是一项广受欢迎的冰上竞技项目．在冰壶运动中，胜负取决于最终冰壶距离大本营圆心的远近．如何通过不同冰壶在光滑冰面上的滑动与碰撞，最终实现意想中的布局？这需要智慧与技巧．

微信公众号：电子课本大全

1 碰 撞

碰撞现象

观察思考

请同学们认真观察下面几幅图，从中归纳出有关碰撞现象的共同特点.



（a）白球撞击花球



（b）公路上两车相撞



（c）棒击球的一刹那



（d）跳高运动员落地

图 1-1-1

从上面的图中可以看出：做相对运动的两个（或几个）物体相遇而发生相互作用，在很短的时间内，它们的运动状态会发生显著变化，这一过程叫做**碰撞**（collision）. 如击球、子弹中靶、重物坠地等都可以看做是碰撞.

微信公众号：电子课本大全

碰撞中动能的变化

两个物体相碰，它们的运动状态将发生变化．下面我们来探讨两滑块在碰撞过程中动能的变化情况，并对碰撞进行分类．

实验探究

探究碰撞前后物体动能的变化

实验装置：气垫导轨、数字计时器（图 1-1-4）．导轨上附有滑块和光电门，如图 1-1-2 所示．滑块上装有挡光条和弹簧片，如图 1-1-3 所示．

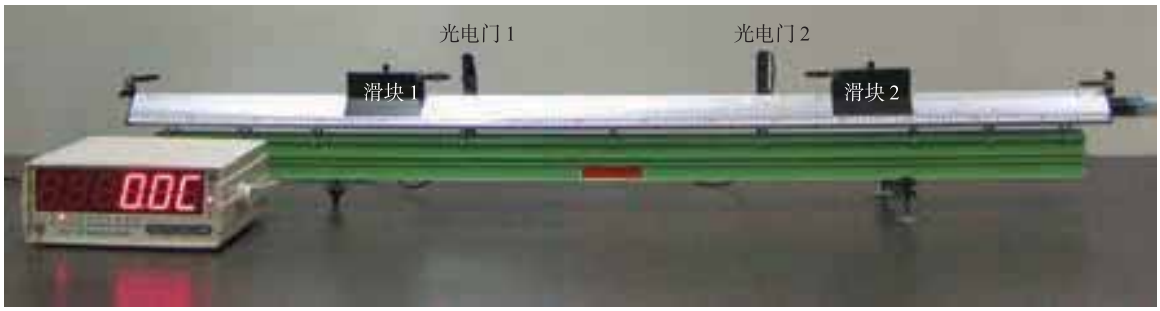


图 1-1-2　气垫导轨

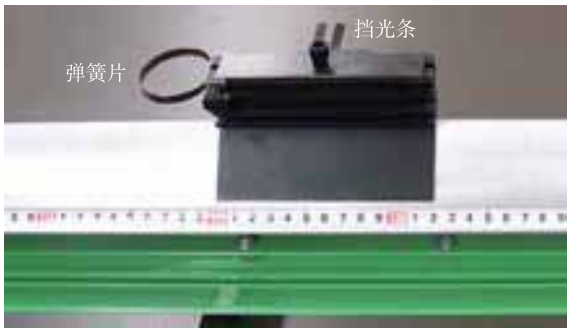


图 1-1-3　带有挡光条和弹簧片的滑块



图 1-1-4　数字计时器

探究过程

1. 先用天平分别测出带弹簧片的滑块 1、滑块 2 的质量 m_1、m_2，然后用手推动滑块 1 使其获得初速度 v_1，与静止的滑块 2 相碰（相碰时，两弹簧片要正对），测定碰撞前、后两滑块的速度大小，算出相关数据，填入表 1-1-1 中．

2. 再换用不带弹簧片的两滑块按照上面的步骤进行实验，并读取实验数据，填入表 1-1-1 中．

3. 将滑块上的弹簧片换成橡皮泥，用天平分别测出滑块 1、滑块 2 的质量；使有橡皮泥的两端正对，让滑块 1 与滑块 2 相碰，测算出相关数据，并填入表 1-1-1 中．

微信公众号：电子课本大全

表 1-1-1　碰撞前、后动能的计算

次数	滑块质量		碰前					碰后					动能改变量
			速度		动能		动能之和	速度		动能		动能之和	
	m_1	m_2	v_1	v_2	E_{k1}	E_{k2}	$E_k=E_{k1}+E_{k2}$	v_1'	v_2'	E_{k1}'	E_{k2}'	$E_k'=E_{k1}'+E_{k2}'$	$\Delta E_k=E_k'-E_k$
1													
2													
3													

碰撞的分类

上面的实验表明，对于不同情况下的碰撞，动能变化的情况不同．在第一种情况下，两个滑块的动能之和在碰撞前、后大致不变，而在第二种、第三种情况下，碰后两滑块的动能之和就变小了．

按照碰撞前后两物体总动能是否变化，可将碰撞分为弹性碰撞和非弹性碰撞两类．

上述第一种实验情况中，碰撞前后两滑块的总动能不变，这种碰撞称为**弹性碰撞**（elastic collision）．

如象牙、优质钢球等宏观物体的碰撞，碰撞后的动能损失很小，可近似看做弹性碰撞；微观粒子中，低能电子和分子的碰撞是严格的弹性碰撞．

若两滑块在碰撞后的总动能减少了，这说明两滑块在碰撞过程中，有一部分动能转化为其他形式的能量，这种碰撞称为**非弹性碰撞**（inelastic collision）．

在非弹性碰撞中，如果两物体碰后粘在一起，以相同的速度运动，物理学上把这种碰撞称为**完全非弹性碰撞**（perfect inelastic collision）．完全非弹性碰撞是非弹性碰撞中的特例．这种碰撞在现实生活中的实例很多，如子弹射入木块没有穿出，子弹和木块一起运动；跳上滑板车的人，最终与滑板车以相同的速度一起运动，等等．在微观世界中，正、负离子碰撞后共同组成分子的现象也属于完全非弹性碰撞．

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 碰撞现象有哪些特征？
2. 根据碰撞前后物体的总动能是否变化，可将碰撞分成哪几类？
3. 你在碰撞实验中，遇到了哪些问题，是如何解决的？你对此实验有什么好的建议？
4. 举出你在生活中见到的实际例子来说明碰撞的几种类型.

发展空间

实验室

用两个质量、大小均相同的钢球A、B，分别吊在两根等长的细绳上，静止时恰好相互接触，现将A球向左拉至位置P，如图 1-1-5（a）所示，然后无初速度地放开A球，观察A球与B球碰撞的情况，如图（b）所示．B球上升［图（c）］、下落［图（d）］，再撞击A球［图（e）］，观察A球上升的高度．再用材料不同而大小相同的均匀球相碰进行观察，思考下面的问题：

1. A球与B球在碰后的瞬间，两球的运动状态如何？
2. B球右摆的最大角度与A球开始下摆时的角度相等吗？
3. B球再与A球碰后，B球与A球运动状态如何变化？

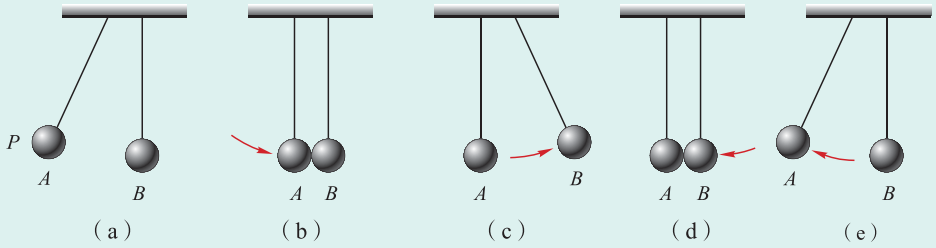


图 1-1-5　两球的碰撞

2 动　量

动量的概念

由于在物体的碰撞过程中，相互作用力是变化的，难以直接用牛顿运动定律来研究碰撞问题．能否找出一个合适的物理量来研究碰撞问题，并找出碰撞现象中遵循的规

微信公众号：电子课本大全

律呢？实验和理论都表明，确实存在着这样一个物理量，这个物理量就是动量．在力学中，把物体的质量（m）和速度（v）的乘积定义为该物体的**动量**（momentum）．用符号p表示，即

$$p = mv$$

在国际单位制中，动量的单位为kg·m/s．动量是矢量，它的方向就是运动物体的速度方向．由于速度反映物体的运动状态，所以动量也是状态量．

除了速度、动量，我们还学习过哪些状态量？

活动

在水平面上有甲、乙两滑块，其质量分别为$m_1 = 1.0$ kg和$m_2 = 2.0$ kg，且沿同一直线运动．若以甲运动的方向为正方向，则甲的速度$v_1 = 10.0$ m/s，乙的速度$v_2 = -5.0$ m/s．

（1）滑块甲的动量大小是_____，方向_____；

（2）滑块乙的动量大小是_____，方向_____．

动量守恒定律

在物理学中，有时要把相互作用的两个或多个物体作为一个整体来研究，这个整体叫做**系统**，如图1-1-2中的两个滑块就可以组成一个系统．

在一个系统中，把各个物体的动量都相加，相加后的动量称作系统的动量．大家知道，两个物体发生碰撞后，每个物体的动量都会发生变化，那么运动物体所组成的系统的动量变不变呢？

法国生物学家莫诺说："在具有无限差别的一个个现象中，科学只能去寻找其中不变的东西．"

活动

根据第1节滑块碰撞的实验数据，完成下表．

表 1-2-1　碰撞前、后动量的计算

次数	滑块质量		碰前			碰后		
			动量		动量之和	动量		动量之和
	m_1	m_2	p_1	p_2	$p = p_1 + p_2$	p'_1	p'_2	$p' = p'_1 + p'_2$
1								
2								
3								

微信公众号：电子课本大全

通过上面的活动我们可以看出，无论是何种形式的碰撞，在碰撞前后系统的动量是不变的．为了寻找碰撞前后系统动量不变的条件，我们来分析一下上述系统的受力情况：两个滑块在碰撞过程中，除了两滑块之间的相互作用力（系统的内力）外，还受到来自系统外部的作用力（系统的外力）．而在碰撞过程中，系统中每个滑块受到的外力只有重力和导轨提供的支持力，它们彼此平衡，因此两滑块组成的系统所受的合外力为零．理论研究和全部已知的客观事实都证明：系统所受的合外力为零，是系统碰撞前后动量不变的条件．

如果一个系统不受外力或所受合外力为零，无论这一系统的内部进行了何种形式的碰撞，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）．

对于在一条直线上运动的两个物体组成的系统，动量守恒定律的一般表达式为

$$m_1v_1+m_2v_2=m_1v_1'+m_2v_2'$$

式中的m_1、m_2分别为两个物体的质量，v_1和v_2分别为它们在碰前的速度，v_1'、v_2'分别为它们碰后的速度；等式左边是两物体碰前的动量，等式右边是它们碰后的动量．

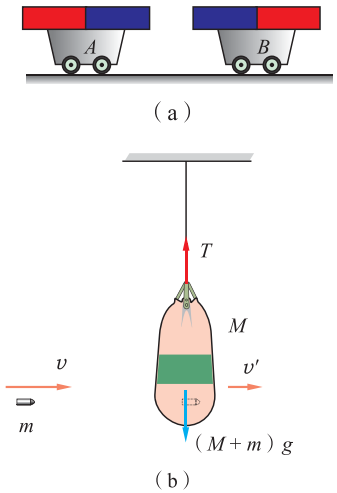
如果系统内相互作用的物体不只是两个，而是三个或者多个，同样也可证明当系统不受外力或所受的合外力为零时，系统的动量也是守恒的．

讨论交流

讨论在下述情况中系统的动量是否守恒，为什么？

（1）如图 1-2-1（a）所示，两块磁铁放在两个小车上，构成一个系统．两小车分别在光滑的水平桌面上和粗糙的水平桌面上相对运动．

（2）如图 1-2-1（b）所示，子弹与沙袋构成一个系统．子弹打入沙袋的瞬间和沙袋开始摆动后．



（a）　（b）

图 1-2-1

动量守恒定律的普遍意义

理论探究

图 1-2-2 是两球碰撞的全过程，碰撞前后两球都做匀速

微信公众号：电子课本大全

直线运动，碰撞过程中的相互作用力是 F_{12}（球 1 对球 2 的平均作用力）和 F_{21}（球 2 对球 1 的平均作用力）. 试用牛顿运动定律找出碰撞前后系统动量的关系，并考虑由此可以得出什么样的结论.

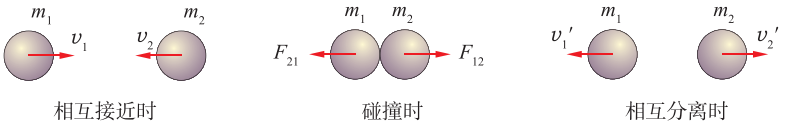


图 1-2-2

上面的探究是从牛顿运动定律导出了动量守恒定律. 随着物理学的发展，人们认识到动量守恒定律具有更大的普遍性，它比牛顿运动定律适用的范围要广得多. 无论在微观、宏观或高速领域，无论是何种形式的相互作用力，只要系统所受的合外力为零，动量守恒定律都是适用的. 动量守恒定律是自然界中最普遍、最基本的定律之一.

练习与评价

1. 下列关于动量的说法中，正确的是（　　）.

A. 物体的动量越大，其速度一定越大

B. 动量大的物体的速度比动量小的物体的速度大

C. 动量大的物体的惯性也大

D. 物体的速度变化了，其动量一定发生变化

2. 两个原来静止在水平面上的小车，质量分别是 0.5 kg 和 0.2 kg. 车之间由被压缩的弹簧相连，在弹力作用下两车分开，质量较大的小车以 0.8 m/s 的速度向右运动，求较轻的小车的速度.

3. 在气垫导轨上，一个质量为 600 g 的滑块以 15 cm/s 的速度赶上另一个质量为 400 g，速度为 10 cm/s 的滑块而发生碰撞，碰撞后两个滑块黏在一起，求两个滑块碰撞后共同的速度.

4. 如图 1-2-3 所示，在光滑的水平桌面上有一辆小车，一个木块贴着小车的上表面，以水平速度 v 被抛到小车上，最后木块和小车以共同的速度 v' 运动. 木块抛上小车前后，木块和小车的总动量守恒吗？为什么？

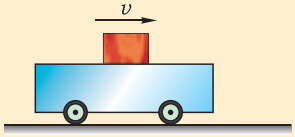


图 1-2-3

5. 在光滑的水平桌面上有两个小球 A 和 B，它们的质量分别是 $m_A = 2$ kg 和 $m_B = 4$ kg，回答以下问题：

微信公众号：电子课本大全

（1）如果小球A和B沿同一直线向同一方向运动［图1-2-4（a）］，速率分别是$v_A=5\ \text{m/s}$和$v_B=2\ \text{m/s}$，它们碰撞前的总动量是多大？方向如何？

（2）如果小球A和B沿同一直线相向运动［图1-2-4（b）］，速率仍分别是$v_A=5\ \text{m/s}$和$v_B=2\ \text{m/s}$．它们碰撞前的总动量又是多大？方向如何？

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

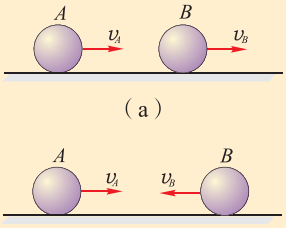


图1-2-4

（4）如果碰撞前两球沿同一直线相向运动的速率分别是$v_A=6\ \text{m/s}$和$v_B=3\ \text{m/s}$，碰撞后两个小球的动量大小有什么关系？动量方向有什么关系？为什么？

发展空间

课外阅览

动量定理

具有一定动量的物体，在外力的作用下，动量会发生变化，其动量的变化跟所受合外力有什么关系呢？我们可以用牛顿运动定律来进行分析．

设一个质量为m的物体，初速度为v，初动量为$p=mv$，在合力F（恒力）的作用下，经过一段时间t后，速度变为v'，末动量为$p'=mv'$（图1-2-5）．

在这一过程中，物体的加速度$a=\dfrac{v'-v}{t}$，由牛顿第二定律可得

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

或
$$Ft=mv'-mv$$

即
$$Ft=p'-p$$

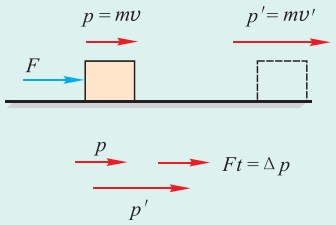


图1-2-5　滑块动量的变化

上式说明，如果我们考察一个物体运动过程的始末，那么在这一过程中物体所受合力与作用时间的乘积等于物体的动量变化，这个结论叫做**动量定理**（theorem of momentum）．

物理学中把力与力的作用时间的乘积叫做力的**冲量**（impulse）．如果用I代表冲量，用Δp表示过程始末动量的改变量，那么动量定理也可以写为

$$I=\Delta p$$

动量定理的表达式是矢量关系式．运用它分析问题要用矢量运算法则．

在上述推导中，我们假定力是恒定的．实际上，在讨论碰撞问题中，物体所受的力通常不是恒定的．用球棒击打垒球，用铁锤钉钉子，垒球和钉子所受的作用力就不是恒定的．可以证明，动量定理不但适用于恒力，也适用于随时间而变化的变力．对于变力的情况，动量定理中的F可理解为变力在作用时间内的平均值$\overline{F}$．

微信公众号：电子课本大全

守恒定律与对称性

对称的概念源于生活，在日常生活中通常是指某物体或某图形上存在着A与A'两个部分，这两个部分在大小、形状、排列、距离等方面都互相对应，例如人体的四肢、耳朵、眼睛等，左右两部分十分相似，这种情况就叫做左右对称．事物具有对称性，就会表现出均衡、有序、和谐，给人以美的感受．

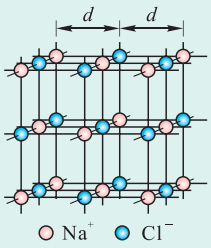
大自然在造就万物时，处处都呈现了对称美．建筑师、艺术家们在创作中也常常追求对称美．科学家们也在寻找自然规律的对称美．看来自然与人类都喜欢对称美！

从科学范畴来看，什么是对称呢？一个事物A，如果通过某种操作（平移、转动或其他变换）发生变化后成为事物A'，且A'能完全复原为A，则事物A具有某种对称性，A与A'是对称的．这种操作也叫做对称操作．因为A与A'完全相同，所以对称性也叫做不变性，或不可区分性．图 1-2-6 就显示了几种具体的对称操作．

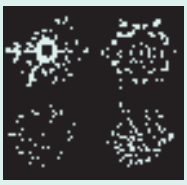
物理定律是从实验中得到的．我们都知道这样一个事实：在空间某处做一个实验，然后将这套实验仪器移动到另一处（是一种操作），以同样的方式进行同样的实验，我们会获得相同的结论；同样，实验的结论也应当与实验开始的时刻无关，今天做这个实验，明天再做（也是一种操作）这个实验，应当获得完全相同的结论．物理定律在空间和时间上经上述操作之后的不变性，正是反映了空、时对物理定律的对称性．

关于物理定律的对称性有一条很重要的定律：对应于每一种对称性，都存在一条守恒定律．这是由德国女数学家诺特（Emmy Noether，1882—1935）首先提出来的．对于空间的均匀性，即物理定律在空间平移中的不变性，可以导出动量守恒定律．例如在光滑平整的冰面上运动的冰球，不计各种阻力，动量是不变的，一旦出现了动量的变化，则一定是由于冰面凹凸不平，使冰球在空间的平移中失去了对称性的缘故．对于时间的均匀性，即物理定律在时间平移中的不变性，可以导出能量守恒定律．例如做自由落体运动的小球，机械能是不变的，一旦出现了机械能的变化，则一定是由于时间不能均匀流逝，时间变慢（或变快），小球的速度变大（或变小），使小球在时间的平移中失去了对称性的缘故．

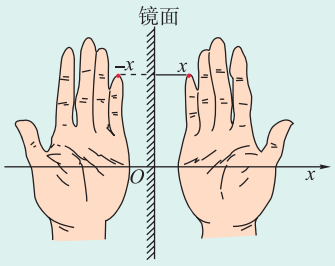
守恒定律是与时、空的对称性相关联的，而时、空性质呈现的规律比一般物理学规律更普遍，因此，守恒定律比一般的物理学规律具有更大的普遍性．在进入了 21 世纪的今天，在物理学的基础研究中人们正给予对称性和相关的守恒定律越来越多的关注．



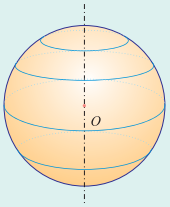
（a）平移对称操作：NaCl晶体沿箭头方向平移 2d 后与原来一模一样



（b）转动对称操作：六角形雪花绕垂直于纸面的中心轴转过60°后就恢复原状



（c）镜像对称操作：将一半图形的坐标x值变为$-x$值，就得到另一半图形．图的每一半是另一半在平面镜内的像



（d）转动对称操作：一只球绕通过球心的轴转过任意角度都可以与原球重合

图 1-2-6

微信公众号：电子课本大全

3 动量守恒定律的应用

碰撞问题的定量分析

动量守恒定律的重要应用之一，是处理碰撞问题. 在碰撞现象中，相互作用的时间很短，外力通常远小于碰撞物体之间的内力，可以忽略不计，认为碰撞过程中动量守恒.

【例题1】如图1-3-1所示，钢球1的质量为m_1=100 g，钢球2的质量为m_2=200 g. 球2原来静止，球1以速度v_1=10 m/s向球2运动. 碰后球2的速度v_2'= 6 m/s. 水平面对球施加的阻力不计，两球可看做质点，求碰撞后球1的速度v_1'.

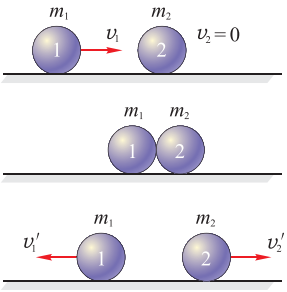


图 1-3-1　两球相撞

【分析】本题中两球组成的系统所受到的合外力为零，系统动量守恒. 两球碰撞前后都运动在同一直线上，可用代数式代替矢量式来进行计算.

【解】以v_1的方向为坐标的正方向，系统动量守恒的表达式是

$$m_1v_1 = m_1v_1' + m_2v_2'$$

得

$$v_1' = \frac{m_1v_1 - m_2v_2'}{m_1}$$

$$= \frac{100 \times 10^{-3} \times 10 - 200 \times 10^{-3} \times 6}{100 \times 10^{-3}}\ \text{m/s}$$

$$= -2\text{m/s}$$

负号表示碰后球1的速度方向与初速度方向相反.

碰撞中的一种特殊情况是两物体碰后粘在一起，获得共同速度，也就是前面我们在对碰撞的分类中所提及的“完全非弹性碰撞”.

【例题2】在列车编组站里，一辆质量$m_1 = 1.8 \times 10^4$ kg的货车在平直轨道上以$v_1 = 2$ m/s的速度运动，碰上一辆质量$m_2 = 2.2 \times 10^4$ kg的静止的货车，它们碰后接合在一起继

微信公众号：电子课本大全

续运动，求其运动速度.

【分析】两辆货车组成一个系统，在碰撞过程中相互作用力远大于作用在系统上的外力（主要是摩擦力），此时外力可忽略不计，系统动量守恒.

【解】取碰撞前货车运动的方向为正方向，设两车碰撞后的共同速度为 v，则由动量守恒定律可得

$$m_1v_1=(m_1+m_2)\,v$$

得

$$v=\frac{m_1v_1}{m_1+m_2}=\frac{1.8\times10^4\times2}{1.8\times10^4+2.2\times10^4}\ \text{m/s}=0.9\ \text{m/s}$$

两车碰后的速度为 0.9 m/s，沿 v_1 方向运动.

中子的发现

在人类认识原子核的历程中，中子的发现有着一段曲折的过程. 1928 年，德国物理学家玻特（Walther Bothe，1891—1957）用 α 粒子去轰击轻金属铍（Be）时，发现有一种贯穿力很强的中性射线. 当时他认为这是 γ 射线. 后来，法国物理学家约里奥·居里夫妇进行类似的实验，用玻特发现的射线去轰击石蜡，结果从石蜡中打出了质子流，如图 1-3-2 所示. 对于这一现象，约里奥·居里夫妇认为是 γ 射线撞击石蜡里的氢原子核的结果. 到了 1932 年，卢瑟福的学生英国物理学家查德威克研究了这种中性射线，测出它的速度不到光速的10%，从而否定了这种中性射线是 γ 射线的看法. 查德威克认为，要确定这种中性粒子究竟是什么，就必须测定它的质量. 他用这种中性射线与质量已知的氢核和氮核分别发生碰撞，并认为这种碰撞是完全弹性的. 他在实验中先测出了碰撞后氢核和氮核的速度，于是就可以用动量守恒定律和能量守恒定律求出了这种中性粒子的质量.

α 粒子由 2 个质子和 2 个中子构成，是氦原子的核.



查德威克
（James Chadwick，1891—1974）

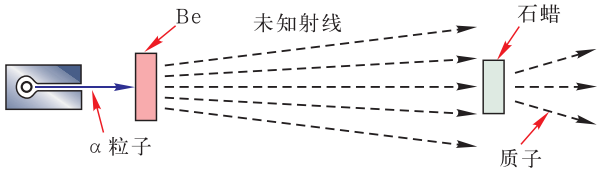


图 1-3-2　α 粒子轰击轻金属铍

查德威克因发现中子而获得了 1935 年的诺贝尔物理学奖. 中子的发现揭开了原子核组成的神秘面纱，开创了人类认识原子核的新纪元. 中子发现后，对中子性质以及中子和原子之间相互作用的研究开创了物理学的一个新分支——中子物理学，进而导致了核裂变的发现.

微信公众号：电子课本大全

反冲现象与火箭的发射

反冲现象我们在《物理　必修1》中已有所研究，它遵循动量守恒定律，也可以反过来说，正因为在一定条件下系统的动量守恒，才会出现反冲现象．火箭的发射就是利用了反冲现象．火箭向后喷出高速气体，使火箭获得较大的向前速度．

火箭飞行所能达到的最大速度，就是燃料燃尽时获得的最终速度．火箭的最大速度主要取决于两个条件：一是向后的喷气速度；二是质量比（火箭开始飞行时的质量与燃料燃尽时的质量之比）．喷气速度越大，质量比越大，最终速度就越大．提高喷气速度，需要使用高质量的燃料，目前常用的液体燃料是液氢，用液氧作氧化剂．质量比与火箭的结构和材料有关，现代火箭能达到的质量比不超过10．在现有技术条件下，一级火箭的最终速度还不能达到发射人造卫星所需要的速度，因而发射卫星要用多级火箭．

多级火箭是由几个单级火箭组成的（图1-3-3）．发射时先点燃第一级火箭，燃料用完以后，空壳自动脱落，然后下一级火箭开始工作．多级火箭能及时把空壳抛掉，使火箭的总质量减少，因而能够达到更高的速度．用这种火箭可发射洲际导弹、人造卫星、宇宙飞船等．但火箭的级数不是越多越好，因为级数越多，构造越复杂，工作的可靠性就越差．目前的多级火箭一般都是二级或三级．

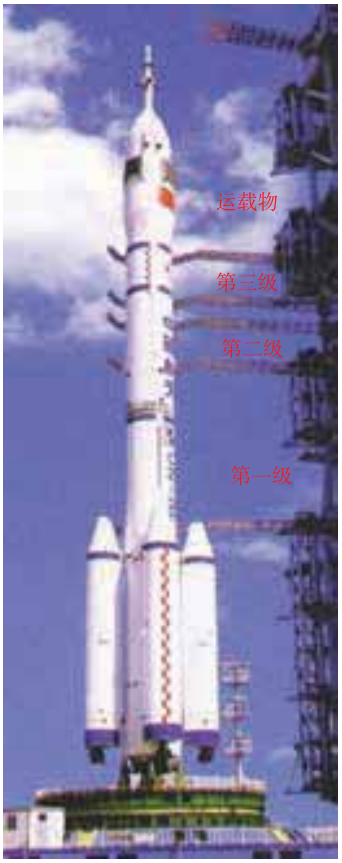


图 1-3-3　待发火箭

练习与评价

1．动量守恒定律的成立条件是什么？运用动量守恒定律应注意什么？

2．质量为1 kg的手榴弹，掷出后达到最高点时水平速度为5 m/s，此时手榴弹炸成两块，一块弹片的质量是0.6 kg，以15 m/s的速度沿原方向运动，求另一块弹片爆炸后的速度大小是多少？方向又如何？

3．大炮水平发射一枚质量为10 kg的炮弹，炮弹飞出的速度是600 m/s，大炮自身的质量是2.0 t，求大炮后退的速度．如果大炮后退中受到的阻力是自身重力的30%m，大炮能后退多远？

4．如图1-3-4所示，小球A以速度v_0向右运动时跟静止的小球B发生碰撞，碰撞后A球以$\frac{v_0}{2}$的速度弹回，而B球以$\frac{v_0}{3}$的速率向右运动，求A、B两球的质量之比．

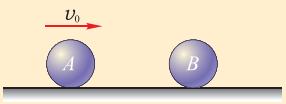


图 1-3-4

微信公众号：电子课本大全

发展空间

实验室

制作喷气船

取一个没有打开的易拉罐，在底部偏心处钻一底孔，再在同侧罐壁上钻一侧孔（钻孔时请注意安全），倒出饮料．用两根铁丝将罐绑在半个肥皂盒上，在盒中架一金属小盖，在金属盖里放置蘸有酒精的棉花．

实验时，先从侧孔注入少量清水，再将侧孔用胶带贴严．使肥皂盒漂浮在水上，如图 1-3-5 所示．点燃棉花加热易拉罐中的水，使水沸腾，水蒸气从底孔喷出，船就可以前进了．

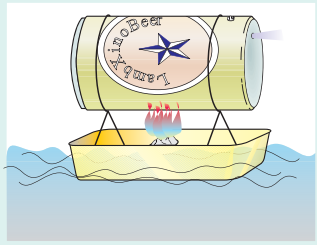


图 1-3-5

课外阅览

中子发现的定量分析

设中性粒子的质量为 m，碰前速率为 v，碰后速率为 v'，氢核的质量为 m_H，碰前速率为零，碰后速率为 v_H，碰撞前后的动量和动能都守恒，则

$$mv = mv' + m_H v_H$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv'^2 + \frac{1}{2}m_H v_H^2$$

解得

$$v_H = \frac{2mv}{m + m_H}$$

同理，对氮原子核的碰撞可解得

$$v_N = \frac{2mv}{m + m_N}$$

由上述两式可得

$$\frac{v_H}{v_N} = \frac{m + m_N}{m + m_H}$$

已知氮核质量与氢核质量的关系为 $m_N = 14m_H$，查德威克在实验中测得氢核速率和氮核速率的关系是 $v_H \approx 7.5\, v_N$，由此得 $m = m_H$．

由此可见，这种中性粒子的质量与氢核（质子）的质量相同，因其不带电，故称之为中子．

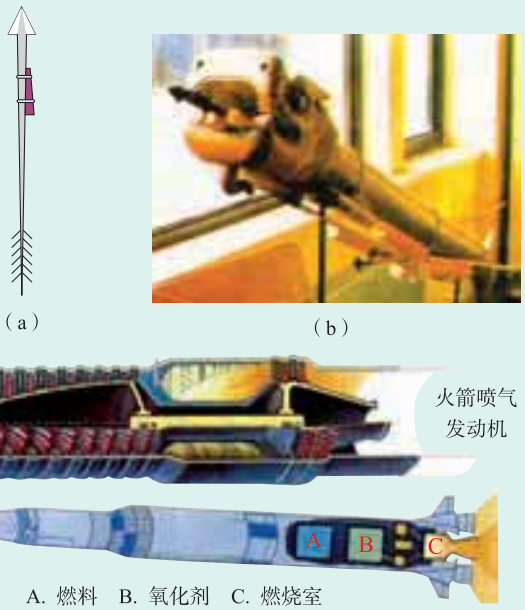
我国航天技术发展简介

我国早在宋代就发明了原始形态的火箭［图 1-3-6（a）（b）］．这种火箭是在一根箭杆上绑一个火药筒，火药筒的前端是封闭的，火药点燃后生成的燃气会以很大速度向后喷出，由于反冲，火箭就向上运动．这是现代火箭的雏形．

微信公众号：电子课本大全

现代火箭［图 1-3-6（c）］的原理仍然与古代的相同，但构造却复杂得多．现代火箭主要由壳体和燃料两大部分组成，壳体是圆筒形的，前端是封闭的尖端，后端是尾喷管，燃料燃烧产生的高温高压燃气从尾喷管迅速喷出，火箭就向前飞去．现代火箭主要用作运载工具发射探测仪器、常规弹头、核弹头、人造卫星或宇宙飞船等．

火箭技术是一门尖端技术．我国自行研制的大型系列运载火箭以“长征”命名．1970 年 4 月 24 日，“长征一号”火箭把我国第一颗人造地球卫星送入轨道．1990 年 4 月，“长征三号”火箭首次为国外用户成功地发射了卫星．1990 年 7 月，“长征二号”捆绑式大推力运载火箭发射试验成功，表明我国已经具有了发射重型卫星的能力．我国的火箭技术已经跨入了世界先进行列．



（a）　（b）

A. 燃料　B. 氧化剂　C. 燃烧室

（c）

图 1-3-6　从古代到现代的火箭

而另一方面，自 1956 年建立专门的航天研究机构到现在，我国的卫星发射技术有了迅速的发展．1964 年 6 月，自行研制的运载火箭腾空而起．此后，我国发射了各种科学试验卫星、资源勘察卫星、通信卫星、气象卫星等人造地球卫星，掌握了使卫星返回地面的回收技术以及用一枚火箭把多颗卫星送入轨道的“一箭多星”等尖端技术．1999 年 11 月 20 日，我国发射了“神舟”号试验飞船，它在太空遨游了 21 小时，于 11 月 21 日成功着陆．2003 年 10 月 15 日，我国“神舟”五号载人飞船被送入太空，绕地球 14 周后，于 10 月 16 日从太空安全返回．2005 年 10 月 12 日上午 11 时，我国又成功地发射了“神舟”六号载人飞船，2 位宇航员遨游太空 115 个小时后安全返回地面，实现了载人飞船的成功发射与回收．2007 年 10 月 24 日 18 时 5 分，“嫦娥”一号绕月探测卫星在西昌发射成功．2008 年 9 月 25 日“神舟”七号载人飞船成功升空，航天员首次成功出舱进行太空行走．这是我国航天史上的又一个里程碑，它标志着我国载人航天技术有了重大突破．



图 1-3-7　中国的“长征”系列运载火箭已成功地发射了几十颗各种用途的卫星．

微信公众号：电子课本大全

本章小结

1. **碰撞** 碰撞可分为弹性碰撞、非弹性碰撞和完全非弹性碰撞. 弹性碰撞是指在碰撞过程中，只发生机械能的转移而不发生能量的转化，系统的机械能没有损失；非弹性碰撞是指在碰撞过程中发生了能量转化，一般是机械能转化为内能. 完全非弹性碰撞是指碰撞后两物体获得共同速度，是非弹性碰撞中的特例.

2. **动量** 物体的质量和速度的乘积叫做动量，动量是矢量，其方向与速度方向相同，$p = mv$.

3. **动量守恒定律** 如果一个系统不受外力或所受外力的合力为零，这个系统的动量保持不变，这一规律叫做动量守恒定律. 对于在一条直线上运动的两个质点组成的系统，动量守恒定律的一般表达式为：$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v_1' + m_2v_2'$.

4. **反冲** 当物体的某一部分向某一方向抛出时，其余部分就会同时发生向相反方向的运动，这种现象叫做反冲.

微信公众号：电子课本大全

习　题

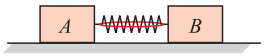
1．如图所示，在光滑水平面上有静止物体 A 和 B．物体 A 的质量是 B 的 2 倍，两物中间有细绳捆绑的弹簧相接．当把绳剪开的瞬间（　　）．

A．A 的速率是 B 的一半

B．A 的动量大于 B 的动量

C．A 受的力大于 B 受的力

D．A、B 和弹簧组成的系统的总动量为零



（第 1 题图）

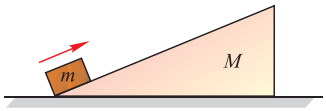
2．如图所示，物体 m 置于斜面 M 上，M 与水平面间无摩擦，当 m 沿 M 的斜面由底端冲上顶端时，m 和 M 组成的系统（　　）．

A．系统的动量守恒

B．在竖直方向上系统的动量守恒

C．在水平方向上系统的动量守恒

D．在任何方向上系统的动量都不守恒



（第 2 题图）

3．如图所示，静止在光滑水平面上的小车，站在车上的人将右边筐中的球一个一个地投入左边的筐中，在投球过程中（球仍在车上）（　　）．

A．由于人和车系统所受的合外力为零，故车不动

B．由于人和车系统所受的合外力不为零，故车右移

C．投完球后，小车将向右做匀速直线运动

D．投完球后，小车将静止不动


（第 3 题图）

4．如图所示，小车放在光滑地面上静止，A、B 两人站在车的两头．两人同时开始相向行走，发现小车向左运动，小车运动的原因可能是（　　）．

A．A、B 质量相等，但 A 的速率比 B 大

B．A、B 质量相等，但 A 的速率比 B 小

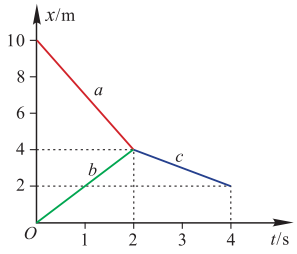
C．A、B 速率相等，但 A 的质量比 B 大

D．A、B 速率相等，但 A 的质量比 B 小



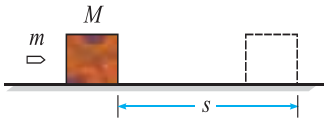
（第 4 题图）

5．A、B 两球沿同一条直线运动，所给的 $x-t$ 图像记录了它们碰撞前后的运动情况，其中 a、b 分别为 A、B 碰撞前的 $x-t$ 图像，c 为碰撞后它们的 $x-t$ 图像．若 A 球质量为 1 kg，则 B 球质量是多少？



（第 5 题图）

6．如图所示，质量为 M 的木块放在动摩擦因数为 μ 的粗糙水平面上，一颗质量为 m 的子弹，以某一初速度 v_0 水平击中木块，并嵌在其中，随后木块在水平面上滑行距离 s 而停止，求子弹的初速度 v_0．（用 M、m、μ、s、g 表示）



（第 6 题图）

微信公众号：电子课本大全

7．质量为 4.9 kg 的沙袋静止在光滑水平面上，现有 5 颗质量为 20 g 的子弹分别以 200 m/s 的水平速度射入沙袋，并留在沙袋内随沙袋一起运动．假如5颗子弹射入沙袋时的速度方向均沿一直线，求沙袋最后的速度．

8．一辆轿车与迎面驶来的另一辆轿车相撞，两车前身因碰撞挤压，都缩短了约0.3 m，据测算相撞时两车的速度均为 108 km/h．试计算在车内质量为 70 kg 的人受到的平均撞击力是多大．

9．一火箭喷气发动机每次喷出 $m = 200$ g 的气体，气体离开发动机喷出时，相对地面的速度 $v = 1\,000$ m/s，设火箭质量 $M = 300$ kg，发动机每秒喷气 20 次．试求：（1）当第 3 次气体喷出后，火箭的速度多大？（2）运动第 1 秒末，火箭速度多大？

微信公众号：电子课本大全

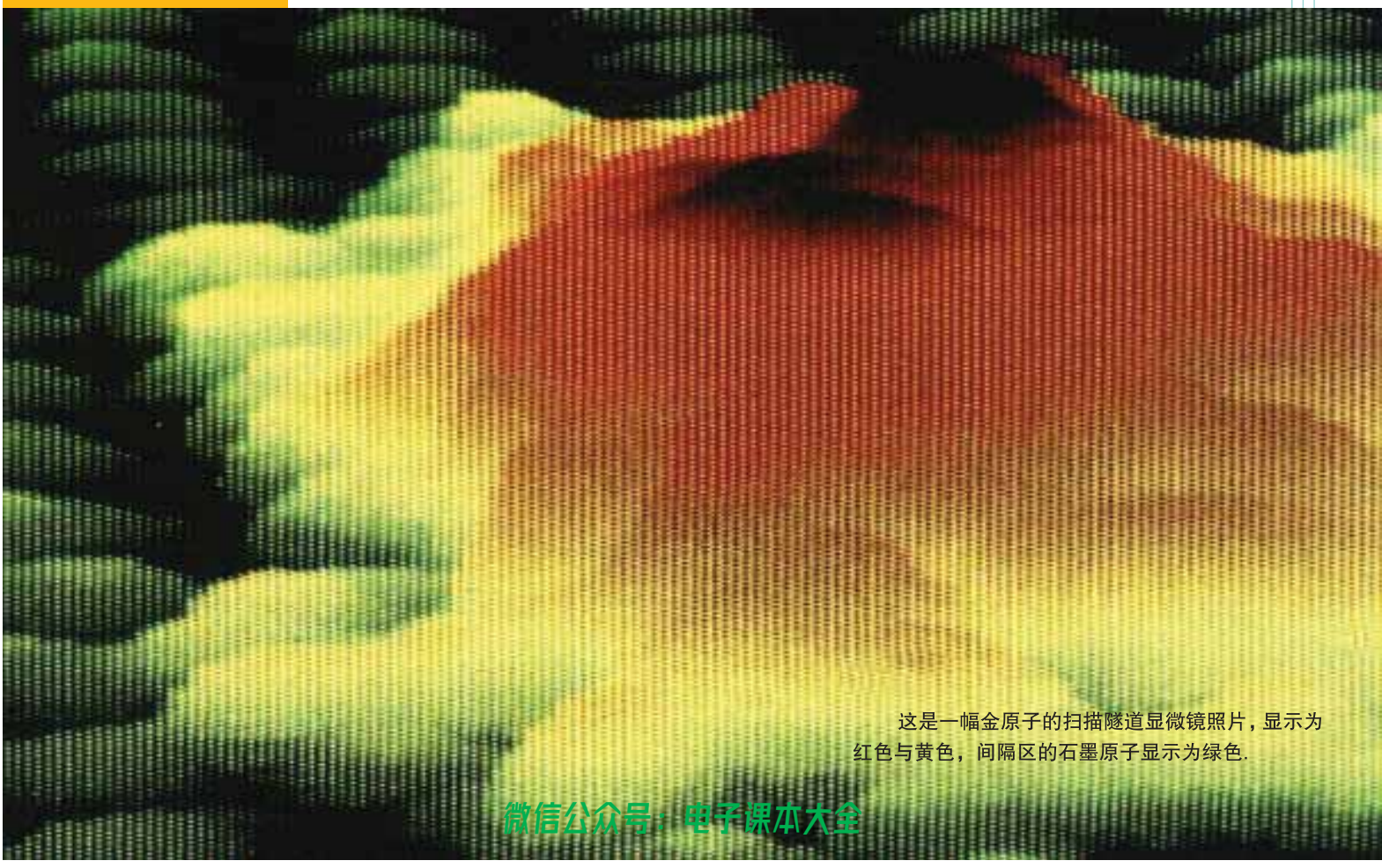
第二章

原子结构

- 电子
- 原子的核式结构模型
- 光谱　氢原子光谱
- 玻尔的原子模型　能级

“一尺之棰，日取其半，万世不竭.”(《庄子·天下篇》)这句话说的是：物质是连续的，无限可分的. 古希腊人德谟克利特则说，万物是由不可再分的原子构成的.

2 000多年前，东西方的先哲们就有着对世界构成的两种不同观点. 从此人们对这个问题一直在探幽索隐.



这是一幅金原子的扫描隧道显微镜照片，显示为红色与黄色，间隔区的石墨原子显示为绿色.

微信公众号：电子课本大全

德谟克利特提出原子概念时还未被观察结果证实，它只是一种猜想和假说．到了 18 世纪下半叶，道尔顿沿用了“原子”这一名称，他通过大量的化学实验，认为原子是元素不可再分的最小单元，并认为万物都是由几十种元素的原子构成的．

然而，人类探索物质组成的问题并没有到此止步．19 世纪末，阴极射线的研究成了物理学的热门课题，许多物理学家都致力于这方面的研究．1897年，英国物理学家J. J. 汤姆孙（Joseph John Thomson，1856—1940）通过对阴极射线的研究，发现了比原子还小的微粒——电子的存在．

与此同时，德国科学家伦琴也通过研究阴极射线意外发现了 X 射线．

近代的原子结构理论就是建立在电子、X 射线的发现等事实的基础上的，这些发现也使当时的物理学家们面临着一个既陌生又奇特的原子世界．

1 电 子

带负电的微粒

这里的“真空”是指空气稀薄的空间．“真空度很高”是指在这个空间里残存的气体已很少，对在此空间中进行的物理过程已无明显影响．

19 世纪中期，科学家用真空度很高的真空管做放电实验时，发现真空管的阴极会发射出一种射线．这种射线沿直线传播，撞击到玻璃壁上会产生黄绿色的荧光（图 2-1-1）．科学家们把这种射线称为**阴极射线**（cathode ray）．

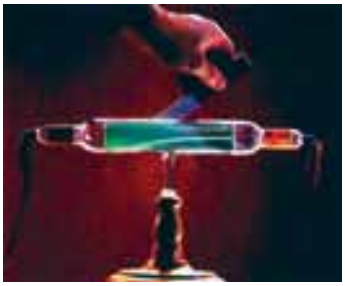


图 2-1-1　条形磁铁使阴极射线偏转

观察思考

接通真空管（又称阴极射线管）的电源．将条形磁铁的一个磁极靠近射线管，观察阴极射线是否偏转，向什么方向偏转；把另一个磁极靠近射线管，观察射线的偏转情况．

你认为射线的偏转是什么原因造成的？你能通过射线偏转的情况来确定射线粒子流携带的是哪种电荷吗？

微信公众号：电子课本大全

英国物理学家 J. J.汤姆孙正是通过下面的实验，使阴极射线在磁场和电场中产生偏转，来确定射线微粒的带电性质的．实验表明阴极射线就是带负电的粒子流．

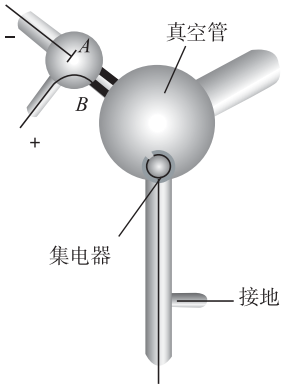


图 2-1-2　汤姆孙实验 1：*A* 为阴极，带狭缝的金属塞 *B* 为阳极．连接高压电源后，在阴极射线管前方的玻璃泡壁上能够观察到荧光，而集电器中的静电计几乎没有反应；用一块磁体使射线发生偏转，射线进入集电器，静电计立刻接收到大量负电荷．说明阴极射线是带负电的粒子流

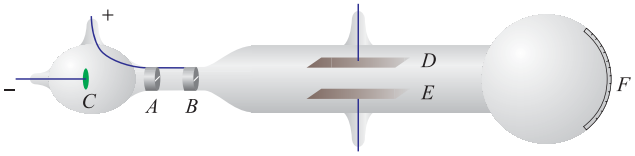


图 2-1-3　汤姆孙实验 2：由阴极 *C* 发射的射线穿过带有狭缝的阳极 *A*、*B*，在玻璃管中有两块平行的铝板 *D*、*E*．铝板可以提供电场．借助玻璃管右端的标尺 *F* 和射线打在玻璃管右端形成的线状荧光斑，汤姆孙观察到射线在电场中发生了偏转，其偏转情况与带负电荷的微粒相同

● 微粒比荷（荷质比）的测定

带电粒子的电荷量与质量之比称为**比荷**（specific charge），又称荷质比．比荷是带电微粒的基本参量之一．1897 年，J. J.汤姆孙根据对这种微粒流在电场和磁场中的偏转情况的计算，发现这种粒子的比荷是氢离子比荷的 1 000 多倍．之后，他和他的学生又测量了这种粒子的电荷量，发现与氢离子的电荷量相同，因此断定这种粒子的质量不到氢原子的 1/1 000，是比原子更小的“微粒”！ J. J.汤姆孙采用斯坦尼的“**电子**”（electron）一词来命名他发现的这种新粒子．目前测量到的电子静质量为 $9.109\,381\,88\ (72) \times 10^{-31}$ kg.

J. J.汤姆孙在实验中又变换了几种阴极的材料，发现实验结果是相同的，他推定电子广泛地存在于各种不同的原子之中．电子的发现使人们认识到原子是可分的，2 000 多年来认为“原子是物质的不可分割的最小单元”的传统观念终于被否定了，这标志着人类对物质结构的认识进入了一个崭新的阶段．

1874 年爱尔兰物理学家斯坦尼（George Johnstone Stoney，1826—1911）根据法拉第电解定律，认为任何电荷都由若干个基本电荷组成．1891 年他取这个基本电荷作为一个自然单位，叫做电子．

● 电子电荷量的精确测定　元电荷

电子电荷量的测量最早（1913 年）是由美国科学家密

微信公众号：电子课本大全

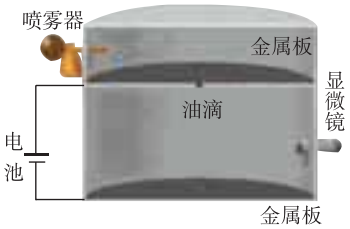


图 2-1-4　密立根油滴实验

立根采用油滴实验实现的．这一实验我们在《物理　选修 3-1》已略有了解．

如图2-1-4所示，两块平行放置的金属板分别与电源连接，上板带正电，下板带负电．将油雾从小孔中喷入，在喷雾过程中因摩擦而使小油滴带电，油滴经上金属板中间小孔，落到两板间的匀强电场中．调节在两金属板间的电压，使油滴受到的电场力等于它所受的重力，即 $qE = mg$，这时油滴达到平衡．匀强电场 E 可通过两板间的电压 U 和距离 d（$E = \frac{U}{d}$）来求出．密立根又通过油滴在空气中下落的速度来测量油滴的质量，从而得到了油滴的电荷量．

密立根测定了数千个带电油滴的电荷量，发现各个油滴所带电荷量是不连续的，它们都是某一最小电荷——元电荷的整数倍．这一最小电荷所带的电荷量就是电子的电荷量．目前测定的元电荷的电荷量 $e = 1.602\ 176\ 462\ (63) \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$，通常可以取 $e = 1.6 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$．

练习与评价

1. 怎样判断阴极射线的微粒流带的是负电？
2. 汤姆孙为什么认为阴极射线中的微粒是比原子更小的物质？
3. 计算一下电子的比荷．
4. 在阴极射线管内两电极之间的电压为 $3 \times 10^3\ \mathrm{V}$，如果电子离开阴极表面时速度为零，试求电子到阳极时的速度．
5. 一个半径为 $1.64 \times 10^{-4}\ \mathrm{cm}$ 的带负电的油滴，在电场强度为 $1.92 \times 10^5\ \mathrm{N/C}$ 的竖直向下的匀强电场中，如果油滴受到的库仑力恰好等于重力，问这个油滴带有几个电子的电荷？已知油滴密度为 $0.851 \times 10^3\ \mathrm{kg/m^3}$．

2 原子的核式结构模型

在我们生活的物质世界中，通常情况下物质都是电中性的．后来，人们发现金属受到光照后会逸出电子．这个事实使人们推测原子是否应当由两部分组成：一部分是电

微信公众号：电子课本大全

子，带负电；另一部分则带正电，而且其所带的正电荷应与电子所带的负电荷相等，原子在整体上才呈电中性.

19 世纪末至 20 世纪初，电子、X 射线、放射性元素的发现，成为人们构思原子模型的依据. 当时曾想出了许多原子模型. 1904 年 J. J. 汤姆孙提出了影响较大的“枣糕模型”，假想正电荷构成一个密度均匀的球体，电子“浸浮”其中，并分布在一些特定的同心圆环或球壳上. 这些模型是否反映了原子结构的特点，还需要经实验事实来检验.

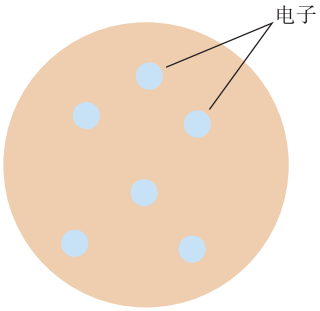


图 2-2-1　枣糕模型

α 粒子散射实验



卢瑟福
（Ernest Rutherford，1871 — 1937）

1909 年，英籍新西兰物理学家卢瑟福及盖革等用 α 粒子轰击金箔，研究 α 粒子被散射的情况，其实验装置如图 2-2-2 所示. α 粒子源封装在铅盒中，铅盒壁上有一个小孔，α 粒子可以从小孔中射出，打到前方的金箔上. 探测器可以绕着金箔做圆周运动. 被金箔向各个方向散射的 α 粒子打在探测器上时会发出荧光，从而被探测到. 沿圆周移动探测器，就可以探测 α 粒子在各个方向上的散射情况. 从 α 粒子源到探测器之间是真空的.

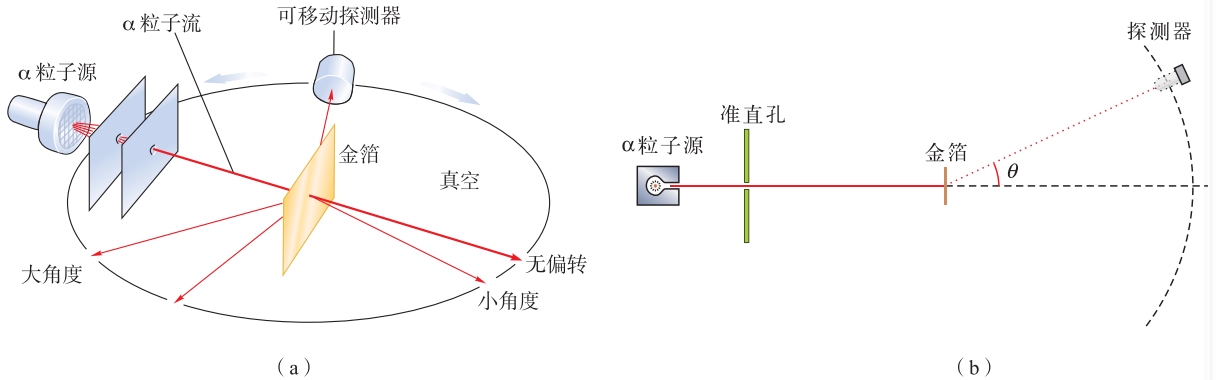


图 2-2-2　α 粒子散射实验装置示意图

实验中发现，绝大多数 α 粒子穿过金箔后仍沿原来的方向前进或只发生很小的偏转，但有些 α 粒子发生了较大的偏转，大约 1/8 000 的 α 粒子偏转角度超过了 90°，个别的甚至接近 180°，就像被弹回来了一样. 这是一个令人震惊的现象，因为按照汤姆孙的模型，α 粒子在轰击金箔时，不可能发生大角度的散射，而且无论是极轻的电子，还是

微信公众号：电子课本大全

均匀分布的正电荷都不足以把α粒子反弹回来. 卢瑟福对实验现象进行了分析，得出了极有意义而且影响深远的结果.

原子的核式结构模型

讨论交流

为什么绝大多数α粒子在散射实验中几乎不偏转，而有些α粒子却发生了较大角度的偏转呢？用“枣糕模型”能解释这个实验现象吗？

有些α粒子发生了较大的偏转，你认为这些偏转是由电子造成的吗？为什么？

物理学的研究常常要根据实验或观测的结果来建立模型. 模型可以帮助我们分析问题，解释和预言现象. 随着研究的不断深入，当模型与新的实验事实不符合时，我们要修正或放弃它，再构建新的能说明更多实验事实的模型.

卢瑟福在经过深思熟虑和仔细的计算之后，否定了汤姆孙的“枣糕模型”，提出了新的原子结构模型. 他设想在原子中间有一个体积很小、带正电荷的核，而电子在核外绕核运动，这种结构称为原子的“核式结构模型”，如图2-2-3所示.

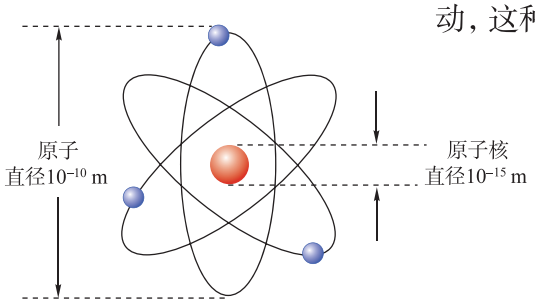


图 2-2-3　核式结构模型示意图

卢瑟福推算出原子核的直径约为10^{-15} m，只有原子直径的1/100 000. 如果把原子线度放大到1 000 m，原子核的线度只有约1 cm. 卢瑟福还指出：原子核几乎集中了原子的所有质量，其密度大得惊人. 对于中性原子，所有电子带的负电荷之和等于原子核所带的正电荷. 这个原子模型

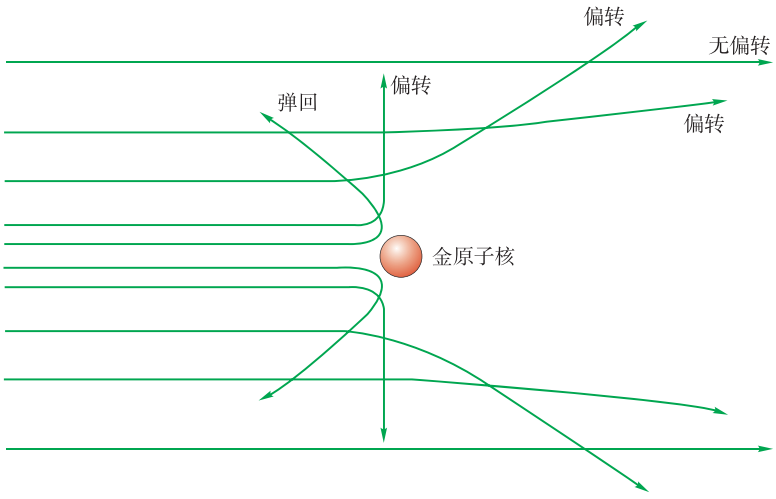


图 2-2-4　用原子的核式结构模型说明α粒子的散射

微信公众号：电子课本大全

类似于行星绕太阳运动的太阳系，所以也称作原子的行星模型.

如图2-2-4所示，正因为原子核很小，原子内部非常“空旷”，所以绝大多数α粒子从离核较远的地方经过时，受到的带有同种电荷的原子核的排斥力很小，因而几乎不发生偏转；只有极少数的α粒子有机会从离核很近的地方经过，受到比较大的排斥力，才会发生大角度的偏转.

● 原子的核式结构模型与经典理论的矛盾

卢瑟福提出的核式结构模型，很好地解释了α粒子散射实验，但它同经典理论之间存在着抵触.

在核式结构模型中，电子绕原子核做圆周运动，电子具有加速度. 根据经典电磁理论，带电粒子做加速运动时，要向外发射电磁波，要辐射能量. 因此，绕核运动的电子将不断向外辐射电磁波，能量不断减少，轨道半径会越来越小，经计算，大约只需 10^{-11} s，电子就会沿螺旋轨道坠入原子核内，原子将不复存在！这个推论明显与事实不符，因为宇宙万物中的原子结构大都是稳定的.

此外，根据经典电磁理论，电子绕核运动所辐射的电磁波频率应当是连续分布的，即形成一个连续的频谱. 但是在实验中实际观察到的现象并非如此，只存在某些特定的分立的频率，形成的频谱是线状的. 面对这些问题，卢瑟福的学生、丹麦物理学家玻尔进行了深刻的思考，发展了原子的核式结构模型.

练习与评价

1. 根据汤姆孙的模型，为什么α粒子在轰击金箔时，不会发生大角度的散射？
2. α粒子轰击金箔时会出现大角度散射现象，说明了什么问题？为什么？
3. 你能否用原子核式结构模型解释摩擦起电和导体中形成电流的现象.
4. 如果把原子扩大为直径 100 m 的球，则核的大小约为多少？你常常见到的原子核式结构模型图，核所占的空间与整个原子大小的比例画得符合实际吗？为什么？
5. 氢原子核的质量为 $1.672\,6 \times 10^{-27}$ kg，核半径约为 10^{-13} cm，请你估算一下氢原子核的密度.
6. 谈谈你对物理学建立模型的看法.

微信公众号：电子课本大全

3 光谱 氢原子光谱

物体发出的光，通常不是单色光，而是由许多不同波长的光组成的复色光．复色光通过棱镜分光后，分解为一系列单色光，而且按波长长短的顺序排列成一条光带，称为**光谱**（spectrum）．例如太阳光经过三棱镜后形成按红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫次序排列的光谱，称为太阳光谱，如图 2-3-1 所示．复色光分解为单色光而形成光谱的现象，称为色散．人类研究光谱已有几百年的历史．



图 2-3-1　太阳光谱

光谱的几种类型

活动



图 2-3-2　分光镜

分光镜（图 2-3-2）是一种能获得光谱、观察光谱的仪器．它由平行光管、三棱镜、望远镜组成．使用分光镜，分组进行下面的活动．

1．准备一个白炽灯泡，让其发出强光，使光线通过一个狭缝进入分光镜，记录观察到的现象．

2．在暗室中点燃酒精灯，在火焰上撒一些钠盐，使用分光镜观察火焰．记录观察到的现象．

3．用弧光灯发出的白光，照射钠蒸气（在酒精灯的灯芯上撒上一些钠盐，钠盐受热分解产生钠蒸气），用分光镜观察通过钠蒸气后的强光．记录观察到的现象．

在以上三个活动中，你所观察到的光谱有什么不同？

在“活动 1”中，观察到的是如图 2-3-3 所示的连续彩

微信公众号：电子课本大全

色光带．这种光谱称为**连续谱**（continuous spectrum），它是由波长连续分布的光组成的．

在“活动2”中，可以观察到在光谱中出现一些彩色亮线，如图2-3-4所示，这种光谱称为明线光谱．而每一条亮线称为光谱线，它对应一定波长的单色光，不同原子的明线光谱是不同的．两条相距很近的黄色谱线是钠原子谱线的典型特征，这两条谱线的波长分别为589.0 nm和589.6 nm．

连续谱和明线光谱都是由发光物质直接产生的光谱，所以也称为**发射光谱**（emission spectrum）．炽热的固体、液体及高压气体发光产生的光谱一般为连续谱，而稀薄气体发光产生的光谱多为明线光谱．



图2-3-3　连续光谱



图2-3-4　钠的明线光谱（片断）



图2-3-5　钠的吸收光谱（片断）

在“活动3”中，可以观察到在连续的彩色背景下有一些暗线，如图2-3-5所示．这是由于被火焰加热的钠盐产生的蒸气吸收了白光中的一些特定频率的光而形成的谱线．这类光谱称为**吸收光谱**（absorption spectrum）．

图2-3-4和图2-3-5分别是钠原子的发射光谱和吸收光谱，它们都是分立的谱线，称为**线状谱**（line spectrum）．两图中明线与暗线的位置相同，这表示了钠原子光谱的特征．人们通过大量的实验观察发现：只有对于同一种原子，线状谱的位置才是相同的，这样的谱线称为**原子光谱**（atomic spectrum）．它只决定于原子的内部结构．

光谱分析的应用

由于原子发光的频率只与原子结构有关，因此可以把某种原子的光谱当作该原子的“指纹”，用来鉴别物质的化学组成中是否存在这种原子，含量的多少等，这种方法叫做**光谱分析**（spectral analysis）．光谱分析在化工、材料、医疗等领域具有广泛的应用．

光谱分析极为灵敏，它的精确度远高于化学分析和运用其他技术手段所做的分析．光谱分析的另一个特点是它可以在不破坏、不接触研究对象的情况下，获取其内部信息，这使得它已经成为科研领域的一种重要研究手段．历史上应用光谱分析，科学家们发现了许多元素如铯、铷、铊、铟、氦等，还准确地测出了1.50×10^8 km之外的太阳的元素组成．而在此前，曾经有人认为人类永远不可能了解太阳的组成成分，理由是人类永远不能把太阳上的物质取回地球来进行分析．

微信公众号：电子课本大全

小资料

人们在研究星体运动时，把运动恒星的光谱与太阳的光谱进行比较，根据多普勒效应，如果光谱向红端移动即波长变长，说明恒星在远离我们运动. 1868 年，英国天文学家哈金斯通过对天狼星光谱中氢谱线的分析，发现该谱线出现了红移，由此求出了天狼星以47 km/s的速度远离我们而去. 1929 年美国天文学家哈勃也是通过光谱的红移，提出了星系的退行速度与距离成正比、宇宙在不断地膨胀中的惊人看法. 人们又通过计算星系的退行速度与离我们的距离来判断遥远的星系大约在 140 亿年前应当聚集在一个地方. 据此，1948 年美籍俄裔科学家伽莫夫提出了为现代大多数科学家所认同的宇宙大爆炸学说. 这一学说我们在《物理　选修3-4》中有所接触.

在医学上，光谱分析被用来分析药物的组成，血液的成分以及对肿瘤进行诊断，为治病救人做出贡献. 在食品检测中，借助光谱分析可以检测食品中添加剂、重金属的含量，为我们的健康保驾护航. 光谱分析还可用来分析空气质量，探测环境污染等，在生产生活和科研的各个领域发挥重要作用.

天文学家利用光谱分析，在弥漫天宇的星云里找到了有机分子，这一重要发现暗示着茫茫太空中可能存在着生命的种子；他们又利用光谱分析发现遥远的星体发出的光谱有所谓“红移”，据此提出了宇宙起源的大爆炸学说.

氢原子光谱

在真空管中充入稀薄的氢气，两极加上 2 ~ 3 kV 的高压，在电场的激发下，氢原子就会发光，通过分光镜就可以观察到氢原子光谱.

图2-3-6为氢原子光谱的片段，它是由氢原子内部状态发生变化而产生的发射光谱. 这些谱线的波长遵循怎样的规律呢?

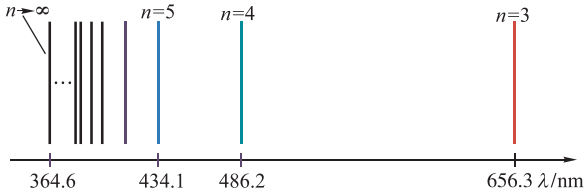


图 2-3-6　氢原子光谱的片段

巴尔末（Johann Jakob Balmer，1825—1898）是瑞士的一位中学教师，他在1885年将已发现的氢光谱的可见光部分 4 条谱线的波长归纳为一个数学公式

$$\lambda = B\frac{n^2}{n^2-4} \quad (n=3,\ 4,\ 5,\ 6)$$

这个公式被称为巴尔末公式. 巴尔末后来发现，若n = 7，8，9，10，11，这些谱线也可以用上式表示.

在此研究的基础上，科学家又在紫外区和红外区发现了一些新的氢原子谱线系，经过多年的努力，人们终于找到了描述氢谱线的简洁而优美的公式，称之为广义巴尔末公式：

微信公众号：电子课本大全

$$\frac{1}{\lambda}=R_{\mathrm{H}}\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right)\quad(m=1,2,3,\cdots;\ n=m+1,$$

$$m+2,m+3,\cdots)$$

式中 R_{H} 称为**里德伯常量**（Rydberg constant）.

此后又陆续发现了一些描述其他元素谱线的公式. 当科学家们为这些发现而欣喜的同时，却也为无法说明这些谱线产生的原因而苦恼.

练习与评价

1. 你能把观察到的光谱进行分类吗?
2. 为什么光谱分析方法可以用来鉴别物质的组成?
3. 光谱分析有哪些应用?
4. 氢原子光谱有哪些特征?

发展空间

课外阅览

巴尔末公式与氢原子光谱

1895 年，里德伯将巴尔末公式改写为

$$\frac{1}{\lambda}=R_{\mathrm{H}}\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{n^2}\right)\quad(n=3,4,5,6,\cdots)$$

满足这个公式的各条氢谱线均属于巴尔末系.

自从巴尔末系发现后，人们又在紫外区和红外区发现了一些新的氢原子谱线系. 这些线系也可用类似巴尔末的简单公式来表示. 如：

赖曼系　$\frac{1}{\lambda}=R_{\mathrm{H}}\left(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{n^2}\right)$　$(n=2,3,4,\cdots)$（紫外）

帕邢系　$\frac{1}{\lambda}=R_{\mathrm{H}}\left(\frac{1}{3^2}-\frac{1}{n^2}\right)$　$(n=4,5,6,\cdots)$（近红外）

布喇开系　$\frac{1}{\lambda}=R_{\mathrm{H}}\left(\frac{1}{4^2}-\frac{1}{n^2}\right)$　$(n=5,6,7,\cdots)$（红外）

这些谱线波长公式统一起来，就是广义巴尔末公式：

$$\frac{1}{\lambda}=R_{\mathrm{H}}\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right)\quad(m=1,2,3,\cdots;\ n=m+1,m+2,m+3,\cdots)$$

由上式，当 $m=1$ 时，得到赖曼系（在紫外区）；当 $m=2$ 时，得到巴尔末系；当 $m=3$ 时，得到帕邢系；当 $m=4$ 时，得到布喇开系.

微信公众号：电子课本大全

4 玻尔的原子模型 能级

玻尔了解到卢瑟福的原子模型所遇到的困难，但他认为产生困难的原因不在于模型本身，而在于经典理论，应当对这一理论进行改造.

正当玻尔在为改造经典理论而苦思冥想时，他见到了巴尔末的公式，这一公式的简洁性使玻尔很受启发. 他以后不止一次地说过：“当我一看到巴尔末公式，整个事情就豁然开朗了.”玻尔正是在这个公式的启发下，建立了自己的原子模型与理论.

物理学不能仅仅是一些实验事实，它还应当是人们对这些事实的缜密思考与丰富想象.

玻尔的原子结构理论

玻尔把原子的核式结构模型、原子光谱和普朗克量子概念（见本册第四章）结合起来，用来阐明原子结构. 1913 年玻尔发表了著名的原子结构和氢光谱理论，这本论著成了原子物理的划时代文献. 他的原子结构理论主要有以下两方面的内容.

1. 电子围绕原子核运动的轨道不是任意的，而是一系列分立的、特定的轨道. 当电子在这些轨道上运动时，原子是稳定的，不向外辐射能量，也不吸收能量，这些状态称为**定态**（stationary state）.

2. 原子处在定态的能量用 E_n 表示，此时电子以 r_n 的轨道半径绕核运动，n 称为**量子数**（quantum number）. 当原子中的电子从一定态跃迁到另一定态时，才发射或吸收一个光子，光子的能量

$$h\nu = E_n - E_m$$

上式被称为玻尔频率条件，式中 E_n 和 E_m 分别是原子的高能级和低能级. 这里的“跃迁”可以理解为电子从一种能量状态到另一个能量状态的瞬时过渡.

在玻尔的原子结构模型（图 2-4-1）中，围绕原子核运动的电子轨道半径只能是某些分立值，我们称之为轨道量子化. 不同的轨道实际上对应了原子的不同状态，不同状态的原子有不同的能量. 因此原子的能量也是不连续的，这

爱因斯坦于 1905 年提出光在空间的传播是不连续的，是一份一份的，每一份叫做一个光量子，简称**光子**. 光子的能量 $E = h\nu$，其中，$h = 6.626 \times 10^{-34}\,\mathrm{J\cdot s}$，为普朗克常量，$\nu$ 为频率.

微信公众号：电子课本大全

些不同的能量值就称为**能级**（energy level）.

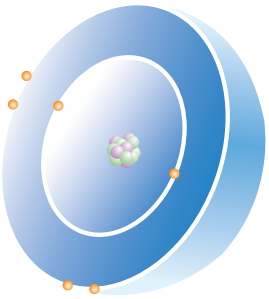


图 2-4-1　玻尔原子模型

用玻尔的原子结构理论解释氢光谱

玻尔根据他的假设，导出氢原子的能级公式是

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

$E_1=-13.6\ \text{eV}$，$E_2=-3.4\ \text{eV}$，$\cdots$

对应的轨道半径是

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

$r_1=0.53\times10^{-10}\ \text{m}$，$r_2=0.212\times10^{-9}\ \text{m}$，$\cdots$

能量最低的状态叫做**基态**（ground state），其他状态叫做**激发态**（excited state）.

由频率条件和上述能级公式，可得光子能量

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

由于光子频率 $\nu=\frac{c}{\lambda}$，因此上式可写成

$$\frac{1}{\lambda}=-\frac{E_1}{hc}\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right)$$

用实际数据代入计算，$\left(-\frac{E_1}{hc}\right)$ 与上节巴尔末公式中的里德伯常量符合得很好. 玻尔理论除了很好地解释了已知的氢原子谱线，也预言了氢原子的其他谱线. 这进一步说明微观世界是量子化的.

玻尔原子结构理论的意义

玻尔的原子结构理论比较完满地解释了氢光谱. 他用能级跃迁的概念阐明了光谱的吸收和发射. 同时也揭示了微观世界中的“量子”现象，由此推动了量子理论的发展.

但是，玻尔的原子结构理论也有它的局限性，它不能说明谱线的强度和偏振情况. 在解释有两个以上电子的原子的复杂光谱时也遇到了困难，这说明玻尔的理论是不完善的. 然而玻尔冲破了旧理论的桎梏，将量子概念引入原子模型，取得了原子理论的新成就，并为推动量子力学的发展起到了重大的历史作用.

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 玻尔原子结构理论的主要内容是什么？举例说明玻尔假设的合理性.

2. 用实际数据代入 $-\frac{E_1}{hc}$ 中进行计算，并与 R_H 值相比较.

3. 在氢原子光谱中有一个布喇开系，它的表述公式为

$$\frac{1}{\lambda}=R_H\left(\frac{1}{4^2}-\frac{1}{n^2}\right) \quad (n=5,\ 6,\ 7,\ \cdots)$$

请你用玻尔的原子结构理论解释形成这些谱线的原因，并计算当 $n=5$ 时，布喇开系中这条谱线的波长.

发展空间

从玻尔的原子模型结构中，如何看出他把卢瑟福、普朗克（本册第四章第 1 节）和爱因斯坦的工作结合在一起了？

课外阅览

玻 尔

玻尔1885年出生于丹麦哥本哈根，1911年获得哥本哈根大学哲学博士学位后，即赴英国曼彻斯特大学卢瑟福实验室工作. 1913 年回国，当年发表了《论原子和分子结构》的长篇论文. 文中首次把量子概念引入原子系统，对氢原子提出定态、跃迁等“玻尔假设”，从而在半经典的基础上解决了氢原子的结构问题，满意地解释了当时观察到的氢光谱的频率规律，打开了用量子概念研究原子结构的大门. 他还提出了由放射性衰变产生的α射线和β射线来自原子核的想法，并给出了放射性引起原子核结构变化的规律. 由于以上的创见，他于 1922 年获得了诺贝尔物理学奖.

1921 年，他在哥本哈根创建丹麦理论物理研究所（现名玻尔研究所）. 丹麦是一个小国，但玻尔凭其个人的魅力与威望，吸引了许多来自四面八方的杰出物理学家，如德国的海森堡、泡利，俄国的朗道，意大利的费米等. 玻尔待人诚恳，善于激发年轻科学家们的探索热情，研究所成了物理学的圣地和天才们的乐园，也成为原子和微观世界的全球研究中心，对现代物理学的发展做出了巨大贡献.

1937 年夏季，玻尔携子到我国上海、杭州、南京和北平（现北京）等地访问，表达了他对中国人民的友谊. 1947 年他亲自设计了自己的族徽，其中心图案是中国古代的“太极图”，形象地表达了他在量子力学中提出的互补思想.



玻尔
（Niels Bohr，1885—1962）



图 2-4-2 玻尔的族徽. 太极图中阴、阳两“鱼”呈反对称形状，且天衣无缝合并为圆，貌似对立的东西，构成了和谐的统一体. 太极图符号之上的拉丁文铭文的意思是：“互斥即互补”

微信公众号：电子课本大全

玻尔理论中的各谱线系

从玻尔理论来看，赖曼系谱线是电子由 $n > 1$ 的轨道跃迁到 $n = 1$ 的轨道时向外辐射的光子形成的；巴尔末系谱线是电子由 $n > 2$ 的轨道跃迁到 $n = 2$ 的轨道时向外辐射的光子形成的；帕邢系谱线是电子由 $n>3$ 的轨道跃迁到 $n = 3$ 的轨道时向外辐射的光子形成的（图 2-4-3）.

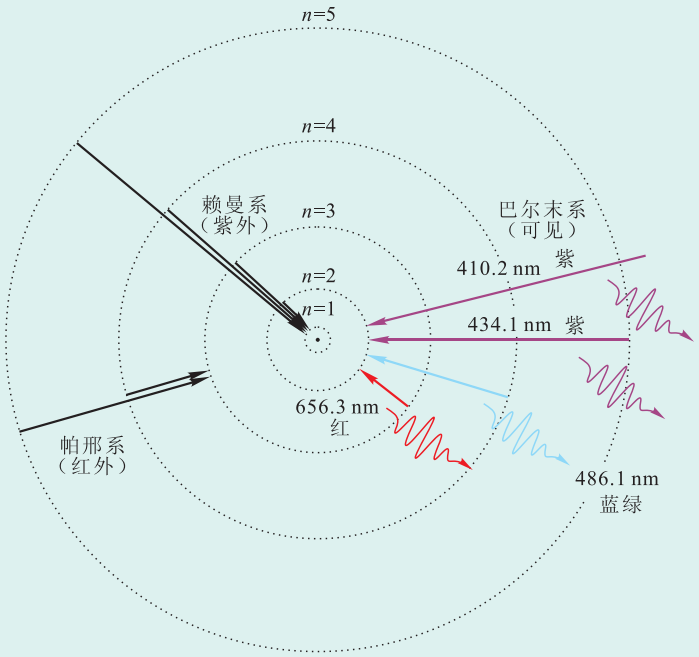


图 2-4-3　用玻尔理论解释的氢光谱

本章小结

1．**电子的发现**　1897 年，汤姆孙发现了比原子更小的“微粒”——电子，并且推定它广泛地存在于各种原子内部，从而打破了原子不可分的观念.

2．**原子的核式结构模型**　卢瑟福基于 α 粒子散射实验的事实提出了原子的“核式结构模型”：在原子中间有一个体积很小的、带正电荷的核，原子核的直径约为 10^{-15} m，只有原子直径的 1/100 000，但它几乎集中了原子的所有质量，电子在核外绕核运动.

3．**光谱与光谱分析**　原子光谱是认识原子内部结构的重要标志．原子的发射光谱和吸收光谱都是分立的线状谱，不同原子的光谱，明线和暗线的位置不同．光谱分析在科学技术中有广泛的应用.

4．**玻尔关于原子结构的理论**

（1）电子绕原子核运动的轨道不是任意的，而是一系列分立的、特定的轨道．当电子在这些轨道上运动时，原子是稳定的，不向外辐射能量，也不吸收能量，这些状态称为定态.

微信公众号：电子课本大全

（2）原子处于定态的能量用 E_n 表示，n 称为量子数．当原子从一个定态跃迁到另一个定态时，即电子从一个轨道跃迁到另一个轨道时，会向外辐射或吸收光子．光子的频率满足

$$h\nu = E_n - E_m$$

E_n、E_m 分别为原子的高能级和低能级．用玻尔的原子结构理论可以很好地解释氢原子及其他类氢原子的光谱规律，但它也有局限性．

习　题

1．在 α 粒子散射实验中，使少数 α 粒子产生大角度偏转的作用力是（　　）．

A．原子核对 α 粒子的万有引力　　B．原子核对 α 粒子的库仑斥力

C．原子核对 α 粒子的磁场力　　D．核外电子对 α 粒子的引力

2．下列说法中正确的是（　　）．

A．原子的质量几乎全部集中在原子核内　　B．原子核的半径约为 10^{-10} m

C．原子是一个质量均匀分布的球体　　D．核既带负电，也带正电

3．根据玻尔原子结构理论，原子中电子绕核运动的半径（　　）．

A．可以取任意值　　B．是一系列不连续的特定值

C．可以在某一范围内任意取值　　D．不同的轨道半径与不同的能量状态相对应

4．氢原子在辐射出一个光子后（　　）．

A．电子绕核的半径增大　　B．原子会跃迁到较高的能级

C．电子的动能增大　　D．核外电子的电势能增大

5．有一些氢原子处于 $n = 3$ 的激发态，当它们跃迁时，可能发射几种能量的光子？所发出的光子的波长最长是多少？

6．肉眼可见的最小尘埃粒子线度大约为 0.05 mm，在这样一个尘埃中大约包含了多少个原子？（提示：可以将尘埃看做一个球体）

7．氢原子处于基态时的能量为 $E_1 = -13.6$ eV，在光的照射下，一个氢原子从基态跃迁到 $n = 2$ 的定态，需要吸收多少能量？如果用可见光照射，它能发生这样的跃迁吗？

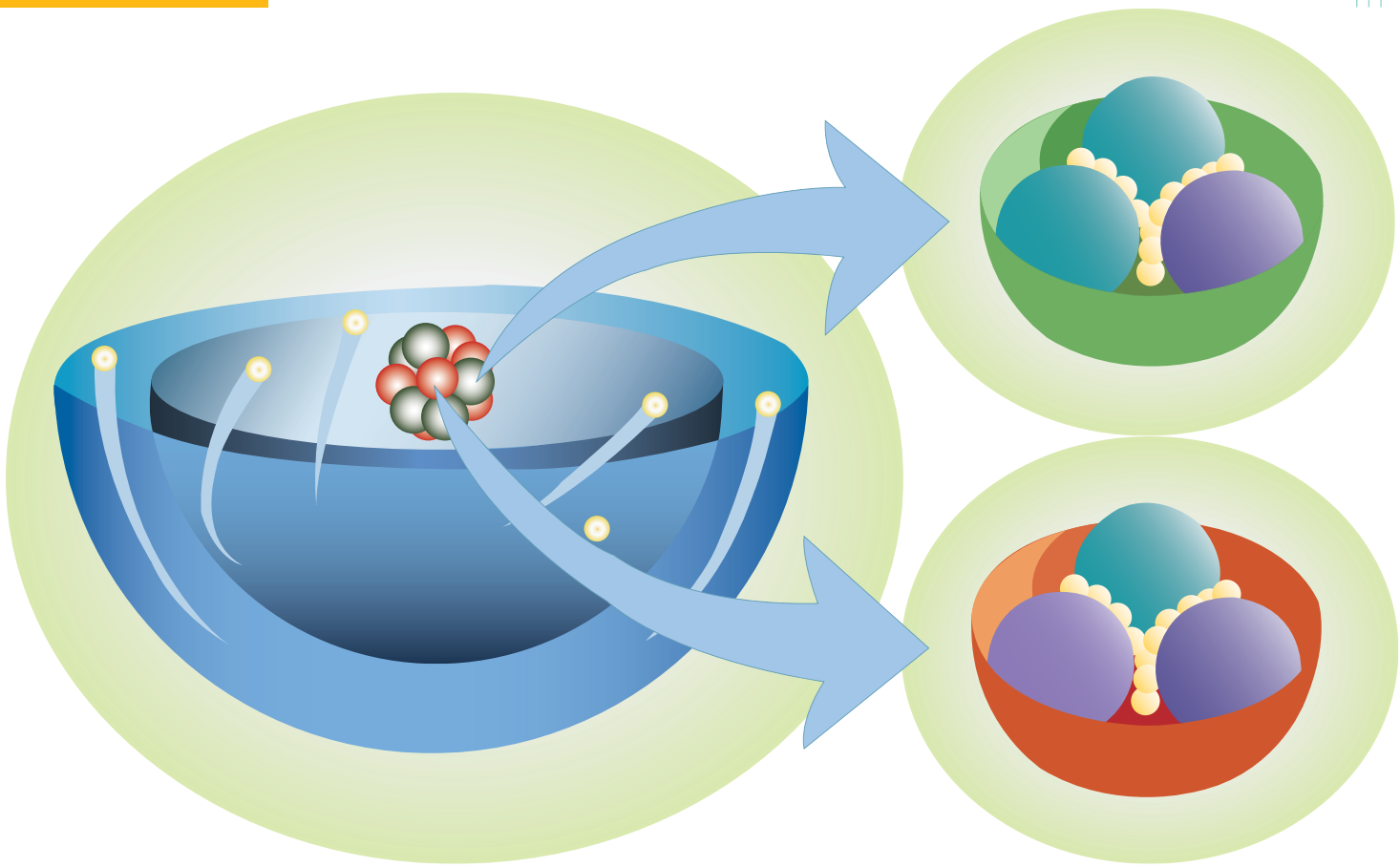
微信公众号：电子课本大全

第二章 原子核

- 原子核的组成与核力
- 放射性　衰变
- 放射性的应用、危害与防护
- 原子核的结合能
- 核裂变
- 核聚变
- 粒子物理学简介（选学）

科学拓展了人类的视野. 人类的视线已看到了遥远（10^{21} m以外）的其他星系，及至可观察的宇宙的边界（10^{26} m）. 而在人类视野的另一端，我们看到了尺度小至原子（10^{-10} m）、原子核（10^{-15} m）以及比之更小（10^{-18} m）的粒子.

这一章就让我们一起走进人类视野的另一端，看看在这块小小的天地里，蕴藏的巨大能量，闪烁的奇光异彩，展现的千变万化.



微信公众号：电子课本大全

1 原子核的组成与核力

原子核的组成

玻尔的原子模型建立后，科学家接着就思索这样的问题：原子核还能不能再分？若能再分，那么原子核又是由什么构成的呢？

1919 年，卢瑟福用 α 粒子轰击氮原子核，发现了氢原子核，即**质子**（proton）从氮原子核中被打了出来．其后的几年里，卢瑟福又从许多轻元素的原子核中打出了质子，从而证实质子普遍存在于原子核之中，是原子核的组成成分．

发现了电子和质子之后，人们最初猜测原子核就是由电子和质子组成的．然而，人们从实验中发现，从核的某些物理性质上看，核不可能只是质子与电子的组合．卢瑟福在 1920 年提出猜测：核内可能还存在一种电中性的粒子．

卢瑟福的学生——英国物理学家查德威克一直在想方设法寻找这种电中性粒子，1932 年，当他用 α 粒子轰击铍时，得到了一种不带电的粒子，它的质量几乎与质子相等，查德威克意识到这种粒子可能就是卢瑟福所预言的中性粒子，他将这种粒子命名为**中子**（neutron）（见本册第一章第 3 节）．

如果将原子核看成是由质子和中子组成的，则原子的质量正好与测量值相符合，因此这一看法很快得到了公认．人们将质子和中子统称为**核子**（nucleon）．

中子不带电，因此，原子核所带的电荷数就等于它的质子数，原子序数为 Z 的原子核中有 Z 个质子．原子核的质量等于核内质子和中子质量的总和．通常用质子数与中子数之和的这个整数代表原子核的质量，用 A 表示，叫做原子核的质量数（核子数）．原子核内的中子数用 N 表示，即有

$$N = A - Z \quad \text{或者} \quad A = N + Z$$

原子核通常用 ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$ 表示，如图 3-1-1 所示．其中 X 表示该核所属的化学元素符号，在元素符号的左下角和左上角分别标出它的电荷数和质量数．例如，${}^{4}_{2}\mathrm{He}$ 代表电荷数为 2、质量数为 4 的氦核；又如 ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ 代表电荷数为 92、质量数为 235

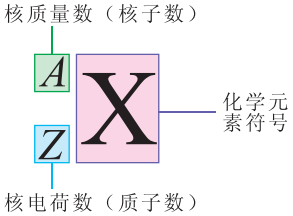
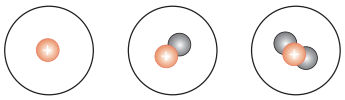


图 3-1-1　原子核的表示方法

微信公众号：电子课本大全

的铀核．质子就是氢核，通常用符号 ${}_1^1\mathrm{H}$ 或 ${}_1^1\mathrm{p}$ 表示．中子用符号 ${}_0^1\mathrm{n}$ 表示．

实验发现，原子序数相同的原子核并不总是具有相同的质量，它们的中子数可以不同，这些原子序数相同而中子数不同的原子核互称为**同位素**（isotope）．例如，氢有三种同位素，叫做氕（也就是通常所说的氢）、氘（也叫重氢）、氚（也叫超重氢），分别用 ${}_1^1\mathrm{H}$、${}_1^2\mathrm{H}$、${}_1^3\mathrm{H}$ 来表示．同位素具有相同的化学性质，但由于中子数不同，它们的某些物理性质会有所不同，例如 ${}_{92}^{235}\mathrm{U}$ 和 ${}_{92}^{238}\mathrm{U}$，都是铀元素，前者是核电站的关键原料，而后者往往是核工厂的废料．



氕［piē］　氘［dāo］　氚［chuān］

图 3-1-2　氢的三种同位素

核力

核内有大量质子，它们之间距离很小，因此库仑斥力很大，为什么它们能稳定地结合在一起，成为一个原子核？

活动

试估算两个质子之间的万有引力和库仑力的大小．假设质子间的距离为 $0.8\times10^{-15}\,\mathrm{m}$，质子的质量大约是电子的1 836倍，已知电子质量约为 $9.1\times10^{-28}\,\mathrm{g}$，引力常量为 $G=6.7\times10^{-11}\,\mathrm{m^3\cdot kg^{-1}\cdot s^{-2}}$，静电力常量 $k=9.0\times10^{9}\,\mathrm{N\cdot m^2\cdot C^{-2}}$，基本电荷 $e=1.6\times10^{-19}\,\mathrm{C}$．万有引力能将核子聚集在一起吗？

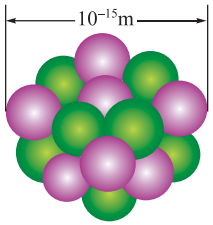


图 3-1-3　原子核的直径只有大约 $10^{-15}\,\mathrm{m}$

我们已经知道，质子带正电荷，中子不带电．因此，原子核中的粒子（即核子）之间必须有一个强大的引力才能将它们结合在一起，否则，质子之间的库仑斥力会使原子核裂开．显然，这个强大的引力不可能是万有引力，因为从估算的结果可以看出，库仑力比万有引力大许多个数量级．可见，能将原子核中的核子结合在一起一定另有一种力．

这个力是核子之间的相互作用力，称为**核力**（nuclear force），也称强力（因核子是强子，见本章第 7 节）．实验与理论都表明，核力有如下几个特征：（1）在核的线度内，核力比库仑力大得多，例如中心相距 $2\times10^{-15}\,\mathrm{m}$ 的两个质子，其库仑力约为60 N，而相互吸引的核力可达 $2\times10^{3}\,\mathrm{N}$；（2）核力是短程力，当两核子中心相距大于核子本身线度

微信公众号：电子课本大全

时，核力几乎完全消失；（3）核力与电荷无关，质子与质子，质子与中子，以及中子与中子之间的核力是相等的.

在原子核中，质子之间除了有核力外，还有正电荷之间的库仑斥力，而中子与质子之间只有核力，没有库仑斥力，从而缓解了质子之间排斥力的影响. 因此质子越多的原子核，就需要有更多的中子来维持核的稳定，在大而稳定的原子核中，中子的数量多于质子. 例如$^{197}_{79}\mathrm{Au}$（金197）有79个质子和118个中子，$^{238}_{92}\mathrm{U}$（铀238）有92个质子和146个中子.

关于核力的性质及本质，目前仍在进一步研究之中.

核反应

在1919年，当卢瑟福用α粒子轰击氮原子核发现了质子的同时，还发现氮原子变成了氧原子，即产生了氧的一种同位素——$^{17}_{8}\mathrm{O}$，这是人类历史上第一次实现了原子核结构的人工转变. 此实验是用一定能量的粒子轰击原子核，改变了核的结构，我们把这样的过程叫做**核反应**（nuclear reaction）. 大量实验表明，在核反应中，质量数和电荷数守恒. 由此，上面的核反应可以写成如下方程式：

$$^{4}_{2}\mathrm{He}+{}^{14}_{7}\mathrm{N}\longrightarrow{}^{17}_{8}\mathrm{O}+{}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

因为α粒子是氦核，质子是氢核，因此方程式中分别用$^{4}_{2}\mathrm{He}$和$^{1}_{1}\mathrm{H}$来表示它们.

练习与评价

1. 原子核由哪些核子组成？

2. 什么是核力？它的大小、作用范围如何？

3. 人类历史上第一次实现原子核的人工转变在哪一年？这个人工转变的核反应方程是什么？

4. 中世纪，有一些人试图将一种元素变成另外一种元素，例如把铅变成金，为什么他们的想法没有实现？如果今天的科学家能做到这一点，你认为这种“炼金”的方法能获得利润吗？

5. 实验发现，用α粒子轰击铍核时，会产生一个中子和一个新核，这就是发现中子的核反应.

（1）这个新核是什么？写出核反应方程.

（2）举例说明核反应与化学反应最本质的区别是什么.

6. 为什么在质量较大的原子核中，中子数往往大于质子数？

微信公众号：电子课本大全

发展空间

课外阅览

大统一理论

自然界普遍存在着四种自然力——强相互作用、弱相互作用、电磁相互作用和引力相互作用（见《物理　必修1》第二章）. 物理学家们希望有一天能够将这四种自然力统一起来，以建立起一个可以解释所有物质世界现象的物理学大统一理论.

最早探求大统一理论的是爱因斯坦. 由于当时人们对基本粒子相互作用的认识还不完整，他没有取得什么成果. 爱因斯坦夙愿未酬，但他的基本思想，却一直鼓舞着后来的理论物理学家.

1954年杨振宁和密尔斯把电磁场作为规范场的概念加以推广，提出了一般规范场的概念，为研究弱相互作用开拓了道路. 目前，弱相互作用、电磁相互作用已经较好地统一，但还未能将强相互作用与引力作用包括在内. 1971年物理学家提出了超弦理论，被不少物理学家认为是解决这类问题的一种新方案. 目前，这一理论还只是人们探索自然界基本相互作用统一性的一种有益尝试，尚未能取得大统一理论研究的真正成功.

2 放射性　衰变

人类对原子核的探索，是从发现原子核放射性开始的.

天然放射性

1896年，法国物理学家亨利·贝克勒尔（Henri Becquerel，1852—1908）发现铀化合物能放出某种射线使密封完好的照相底片感光. 这一发现虽然没有像伦琴发现X射线那样轰动一时，但意义却更为深远. 这种辐射后来被人们称为“贝克勒尔辐射”.

居里夫人认为贝克勒尔发现的现象具有普遍性，她首先使用了“放射性”一词来描述物质的这种性质. 她与丈夫皮埃尔·居里（Pierre Curie，1859—1906）一起，经历了艰苦的提纯工作，于1898年从沥青铀矿盐中分离出一种放射性比铀强得多的新金属元素——钋（Polonium）. 1902年居里夫妇又证实了另一种放射性更强的金属——镭（Radium）的存在. 因为发现放射性，贝克勒尔和居里夫



居里夫人
（Marie Curie，1867—1934）

微信公众号：电子课本大全

妇分享了 1903 年诺贝尔物理学奖.

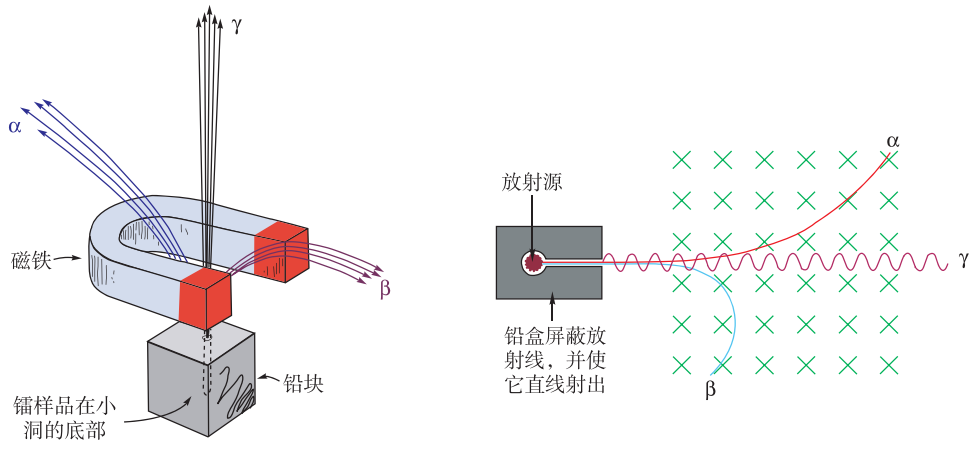
发现钋和镭后，科学家们又继而在自然界中发现了多种放射性元素，这些元素所具有的放射性称为天然放射性. 人们发现比铋（原子序数为 83）重的元素都是具有放射性的，较轻的元素也有许多放射性同位素. 例如，在碳的 3 种同位素中，$^{14}_{6}C$就具有放射性.

衰 变

讨论交流

尽管新的放射性元素不断被发现，但放射本身的性质在当时却并不清楚. 你能否想出一种方法来确定射线的带电性质呢?

1900 年前后，汤姆孙建议卢瑟福研究这个课题. 卢瑟福设计了一个实验：他在铅块上钻了一个小孔，孔内放一点镭，使射线只能从这个小孔里发出. 随后他将射线引入强磁场中，奇怪的现象出现了，一束射线立即分成三股，其中两股左右分开，分别向两个方向偏转，另外一股不偏不倚一直向前（图 3-2-1）. 卢瑟福将它们分别命名为 α 射线、β 射线和 γ 射线.



（a）α 射线、β 射线和 γ 射线在磁场中发生分离　　（b）磁场对 α 射线、β 射线和 γ 射线的作用

图 3-2-1

微信公众号：电子课本大全

讨论交流

为什么α射线、β射线和γ射线在磁场中偏转的方向不同？

如果磁场的方向是垂直纸面指向纸内，如图 3-2-1（b）所示，你能根据图中偏转情况判断出它们各自的带电性质吗？

放射性元素是不稳定的，它们会自发地蜕变为另一种元素，同时放出射线，我们称这种现象为**放射性衰变**（radioactive decay）．在衰变过程中，有些放射性元素放出α射线，有些放出β射线，有些在放出α或β射线的同时，还放出γ射线．

α射线是带正电的α粒子流，α粒子是氦原子核．α射线的速度只有光速的10%，穿透能力弱，容易被物质吸收．一张薄薄的铝箔，或一层裹底片的黑纸，甚至人体皮肤的角质层，都能将它挡住．

原子核在放射出一个α粒子之后，就变成另外一种原子核．例如，$^{238}_{92}\mathrm{U}$核放出一个α粒子后就变为$^{234}_{90}\mathrm{Th}$（钍234）核．我们把这种衰变叫做α衰变．这个过程可以用下面的衰变方程表示：

$$^{238}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

在这个衰变过程中，和前面的核反应方程一样，衰变前核的质量数之和等于衰变后各原子核的质量数之和；衰变前核的电荷数之和等于衰变后各原子核的电荷数之和．大量实验表明，原子核衰变前、后电荷数和质量数均守恒．

β射线是带负电的电子流，它的速度很快，穿透力强，在空气中可以走几十米远，而碰到几毫米厚的铝片就不能

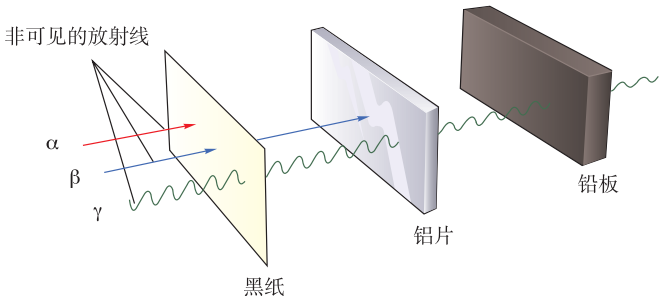


图 3-2-2　α射线、β射线和γ射线的穿透能力比较

微信公众号：电子课本大全

穿过了．原子核放出一个电子后，其电荷数增加 1，变成原子序数增加1的另一种原子核．例如，$^{234}_{90}\mathrm{Th}$ 能放出一个β粒子（电子）而变为 $^{234}_{91}\mathrm{Pa}$（镤 234）．由于电子的质量比核子的质量小得多，我们可以认为电子的质量数为零，表示为 $^{0}_{-1}\mathrm{e}$．这样，上述过程可以表示为

$$^{234}_{90}\mathrm{Th} \longrightarrow {}^{234}_{91}\mathrm{Pa} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

这种放出 β 粒子的衰变叫做 β 衰变．

γ射线本质上是一种波长极短的电磁波，波长约是X射线波长的 1%，穿透力极强，能穿过厚的混凝土和铅板．

γ射线不带电，因此不受磁场的影响，它从原子核射出后，原子核的电荷数不变．我们把物质放出γ射线的过程叫做γ衰变．

物质在 α 衰变之后经常伴随着β衰变，β衰变之后通常立即跟着 γ 衰变．

半衰期

放射性元素原子核的衰变是有规律可循的．单个放射性元素的衰变完全是一种随机事件，在许多放射性元素的原子中，究竟哪一个原子、又在什么时刻发生衰变是无法精确预言的，但对于足够多的放射性元素的集合，它的衰变现象符合一定的统计规律：

在核的衰变中，放射性元素衰变减少至原有数目一半所需的时间是一定的．我们把放射性元素有半数发生衰变所需的时间称为该元素的**半衰期**（half life）．不同的放射性核的半衰期不同，而且差别可能很大，从 10^{-6} s（甚至更小）到 10^{10} 年（甚至更长）都有．下表中列出了一些半衰期实例．

随机事件是指在某一条件下，可能发生也可能不发生的事件．

表 3-2-1　半衰期实例

核	半衰期	核	半衰期	核	半衰期
自由中子	887 s	$^{60}_{27}\mathrm{Co}$	5.271 4 a	$^{237}_{93}\mathrm{Np}$	2.144×10^{6} a
$^{199}_{79}\mathrm{Au}$	3.139 d	$^{228}_{88}\mathrm{Ra}$	5.75 a	$^{235}_{92}\mathrm{U}$	7.038×10^{8} a
$^{224}_{88}\mathrm{Ra}$	3.66 d	$^{226}_{88}\mathrm{Ra}$	1 600 a	$^{238}_{92}\mathrm{U}$	4.468×10^{9} a
$^{131}_{53}\mathrm{I}$	8.02 d	$^{14}_{6}\mathrm{C}$	5 730 a	$^{232}_{90}\mathrm{Th}$	1.405×10^{10} a

注：表中 s 表示秒，d 表示日，a 表示年．

半衰期是放射性物质固有的一种物理属性，由原子核自身的因素决定，与原子所处的化学状态和外部条件无关．

微信公众号：电子课本大全

活动

用16个1元硬币，一次把它们抛出去，将反面朝上的取走，再抛剩下的硬币，再取走反面朝上的．继续这个过程，在只剩下1个硬币之前，你大约抛了多少次（可取几个同学的平均值）？如果开始有100个硬币，在只剩下一个硬币之前你估计要抛多少次？若每抛两次的时间间隔为1min，这个游戏中硬币的“半衰期”是多少？

我们抛硬币，有哪些硬币落下来时会正面朝上是不能预知的．同样，在足够多的原子核中，哪些原子核在什么时刻发生衰变也是不能预知的，每个原子核有同等的机会在下一个半衰期 $T_{1/2}$ 中衰变．

小资料

概率是指在一定条件下，某种事件出现的可能性大小的定量量度．

练习与评价

1．由 $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ 衰变为 $^{206}_{82}\mathrm{Pb}$，要经过几次 α 衰变和几次 β 衰变？

2．如果 $^{14}_{6}\mathrm{C}$ 的半衰期是 6 000 年．起初有 100 g 纯 $^{14}_{6}\mathrm{C}$，18 000 年后还剩多少？现在只剩余 3 g，大约过去了多长时间？

发展空间

课外阅览

居里夫人

居里夫人，法籍波兰人，从小酷爱学习，以获得金质奖章完成中学学业．中学毕业后，由于家境贫困只得辍学当家庭教师．后于1891年进巴黎大学理学院深造，先后以第一名的成绩获得物理学、数学硕士学位．1897年，她选定了不久前贝克勒尔发现的放射性作为研究课题．1898年7月，她和丈夫皮埃尔·居里一起从成吨的沥青铀矿盐中艰难地寻找到一种放射性比纯铀强几百倍的新元素．居里夫妇把它命名为“钋”，以纪念居里夫人的祖国波兰．接着他们又在难以想像的极端困难的工作条件下，历经4年时间，经几万次的提炼，终于在1902年从数吨沥青铀矿渣中提炼出了0.12 g氯化镭，证实了镭元素的存在．由于长期从事放射性工作，她身患恶性障碍性贫血白血病，于1934年7月4日逝世，享年67岁．正是由于居里夫人的忘我献身精神和严谨的科学态度，以及她所取得的巨大成就，使她受到了国际科技界的广泛崇敬．她先后被授予了7个国家的24次奖金和奖章，获得了25个国家的科学团体的荣誉称号．在巨大的荣誉面前，她仍每天工作15小时，直到去世．她虽获得了7万法郎的诺贝尔奖金，但依然过着十分俭朴的生活，她把奖金分送给了科学团体、实验室和穷苦学生．她更没有申请过专利，她说：“这些成果不属于我而属于人类．”她的事迹鼓舞和教育着千千万万的后来人．

微信公众号：电子课本大全

3 放射性的应用、危害与防护

放射性现象一方面为我们提供了原子核内部运动的许多重要信息；另一方面它又在科学研究以及工业、农业、医疗、地质、考古等多个领域有着广泛的实际应用．当然，放射性可能造成的危害以及如何进行有效的防护也是不容忽视的问题．

放射性的应用

1．利用射线的特性

放射性元素放射的α射线、β射线及γ射线，由于特性不同，各有其不同的应用．

α射线带电，能量大，其电离作用很强，可电离放射源周围的空气，使其成为导电气体．因此，可以将由α射线源制成的静电消除器安装在机器运转时容易产生静电的部位，用以消除（中和）因摩擦而积累的静电，从而消除可能引起的不良作用．

β射线一般作为测量手段使用，其原理是利用β射线穿过薄物或经过薄物反射时，由透射或反射后的衰减程度来测定薄物的厚度与密度．

γ射线穿透能力极强，比X射线要强很多倍．在冶金和机械工业中可用它来透视各种产品，以达到无损探伤的目的．X射线只能检查2～3 cm厚的钢板，而γ射线能穿透30 cm厚的铁板，通过透视可发现各种金属制品中的裂纹或砂眼等．

γ射线对生物组织会产生物理、化学的效应，能引起生物体内DNA的变异．在农业上常用放射线育种，辐照后的部分种子会发生变异，有可能成为新的优良品种．辐射还能抑制一些害虫和细菌的繁殖，用来杀灭害虫和保鲜食品（图3-3-3）．医学上，采用放射性进行治疗已成为特别重要的手段，尤其是对癌症的综合治疗．癌细胞由于生长迅速，对辐射的杀伤特别敏感，因此，可以将射线对准肿瘤，杀死癌细胞．



图3-3-1 利用γ射线检查金属内部

微信公众号：电子课本大全



图 3-3-2　放射性治疗



（a）放射线照射过的草莓



（b）没有照射过的草莓

图 3-3-3

2. 作为示踪原子

把放射性同位素的原子及其化合物通过物理或化学反应的方式掺到其他物质中，然后用探测仪器进行追踪，以了解放射性同位素在其他物质中的位置、数量、运动和迁移情况，这种使物质带有“放射性标记”的放射性原子称为示踪原子．示踪原子在各个学科及实际生产活动中的用途是十分广泛的．

在工业上，可以将放射性同位素引入待研究的机械材料中去，在制成的机件运转时，收集磨损下来的碎屑，测量它们的放射性就可以确定机件的磨损情况．

在农业上，放射性元素“示踪剂”可用于合理施肥．将混入了放射性同位素的肥料施给农作物，根据观测放射性元素在其根、叶等部位的转移与分布情况，可帮助我们了解农作物如何吸收营养，从而掌握施肥的种类、时机与数量．

在医学上，放射性元素对外科医生的手术也有帮助．利用示踪原子，就能通过计数器准确地确定开刀位置，并能知道切除的干净程度；对人体注入含有微量放射性钠原子的食盐水，并用能记录所放射的γ射线的计数器进行测量，可对人体的血液循环进行研究（血液循环的速度能够说明身体的健康状况）．

作为示踪原子的放射性同位素与自然界存在的相应的普通元素之间应有相同的化学、生物学性质，仅是核的物理性质不同（中子数不同、具不具有放射性）．把它制成标记性化合物（食物、药物等）代替相应的非标记普通元素，就可检测它在生物体中的功能和作用．

3. 利用衰变特性

在考古学中，我们可以利用测定发掘物中$^{14}_{6}C$（碳 14）放射性元素的含量，来确定它的年代．这是由于地球生物的生存环境中每1 g碳所含的放射性碳原子核的数目是不变的，因此不论植物属于什么品种、生长在何处，新细胞组织中每 1 g 碳内所含的放射性碳原子核的数目都相同，约为 750 亿个．这个比例一直维持着，直到生物体死亡，停止与空气中的碳元素交换．生物体死亡之后，$^{14}_{6}C$ 的含量就因衰变而不断减少．所以，如果能测得生物体内 $^{14}_{6}C$ 的含量，就能知道该

微信公众号：电子课本大全

生物体死亡时所处的年代．$^{14}_{6}C$ 衰变时放出 β 粒子，其半衰期约为 5 730 年，即 2 min 内有 17 个核发生衰变，$^{14}_{6}C$ 核的总数约经 5 730 年减少到一半，经 11 460 年减少到 $\frac{1}{4}$，依此类推．因此就能通过把动植物残骸中 $^{14}_{6}C$ 的含量与活生物体中 $^{14}_{6}C$ 的含量相比较来确定其死亡时间．例如，有一根古老的木头中的 $^{14}_{6}C$ 只有正常值的 $\frac{1}{8}$，那么这根木头的原树一定已经死了约17 200年了．考古学家们就是用上述方法来确定各种出土文物、古代遗址和具有考古价值遗物的年代的．

4. 其他应用

在地质学上，常利用射线勘探矿藏．在地质钻孔探矿中，对不同钻孔深度的岩芯样品的分析原本是复杂而繁重的工作，而射线探矿就可以帮助地质学家们解决许多困难．那些含有放射性元素（如铀、钍等）的矿层，可直接从放射性活度记录仪器上反映出来．研究还表明：黏土、页岩、磷石灰岩等都有很强的放射性；而煤、砂岩、石灰岩（可能含有石油）以及气体等的放射性则是很微弱的．可见，从放射性的强弱上可大致了解石油矿层的分布范围．

放射性的危害与防护

房间的墙壁，你呼吸的空气，甚至你的身体都有放射性．放射性对我们有哪些危害？怎样减少这种危害？

在自然界中，存在于人体身边的放射线来源众多，包括天然的和人工产生的．天然放射线自从地球存在以来就有，它主要由两部分组成：一是来自地壳表面的天然放射性元素（如铀、钍、镭）以及空气中氡等产生的放射线；二是来自空间的宇宙射线．人工放射线的来源主要是医疗、核动力以及核武器试验中的放射线．

放射线对人体危害的大小与许多因素有关：接触射线时间越长危害越大；距离射线源越近危害越大；全身照射比局部照射危害大；大剂量照射比小剂量照射危害大；个体的敏感性也有很大的差异．

放射线对人体组织造成的伤害，主要是由于射线对原子和分子产生作用，比如电离、激发和分解等，这种作用将

雷姆（rem）是测量辐射对人体伤害的剂量单位，1 rem = 0.01 J/kg．通常的一次 X 光检查，其照射计量约 10^{-2} rem．

一次突然的对全身的 25 ~ 100 rem 剂量的照射会在血液中造成短期的变化，而这样的变化人可能不会注意到．当剂量为 100 ~ 300 rem 时，对血液和胃肠的效应会引起典型的辐射病病征，如发烧、呕吐、红细胞受到损害、白细胞和血小板减少、脱发、从变脆弱的血管自发地内出血和外出血以及少量的皮下出血等．500 rem 的剂量会引起 50% 的死亡率；1 000 rem 的剂量能使人在 30 天内死亡；而10 000 rem的剂量则可以使人在几个小时内死亡．

微信公众号：电子课本大全

导致细胞损伤，甚至破坏人体DNA的分子结构．大剂量的放射性射线能导致畸形、肿瘤、生育功能损伤等．

射线对人体作用的效果是长期积累的，人们在日常生活中要高度重视对辐射的防护，其基本方法有：

（1）距离防护——就是要尽可能远离射线源；

（2）时间防护——就是要尽量减少可能受到照射的时间；

（3）屏蔽防护——就是在射线源的周围设置能够吸收或阻挡射线的屏蔽物体，以尽可能减弱射线的强度与能量．

（4）仪器监测——要配置适当的剂量测量设备，加强对环境的监测，特别是加强对核电站等有放射源的区域周边环境的监控，保证安全运行，避免人为事故的发生．

小资料

放射性污染防治标准

国际上规定，对于从事放射性职业的人员，全身照射的终身累计剂量当量不能超过250 rem．以工作50年计，相当于每人每年受辐射的最大允许剂量当量为5 rem．对于不直接从事放射性工作，但可能受到放射线照射的普通人员，每人每年不得超过0.5 rem．

练习与评价

1．在你的周围有哪些放射性源，它们是人工的还是天然的？

2．放射性在工业中有哪些应用？

3．说明如何利用 $^{14}_{6}\mathrm{C}$（碳14）的衰变确定一个古生物体的死亡年代．

4．如果你只有放射性原子核100个，在经历4个半衰期后，大致还有多少核未衰变？为什么你的回答只能是“大致”？

5．放射性有哪些危害？如何进行防护？

6．一段古老的木头中，$^{14}_{6}\mathrm{C}$（碳14）只有正常值的$\frac{1}{4}$，那么这段木头的树大约已经死了多少年了？

7．如果开始时有1 g纯 $^{14}_{6}\mathrm{C}$（碳14），36 000年后还剩下多少？100 000年大约还剩下多少？（半衰期可按6 000年计算）

发展空间

走向社会

通过查阅资料等方法，了解常用的射线检测方法．

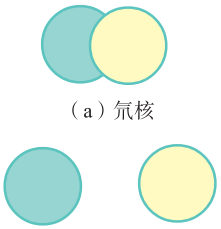
微信公众号：电子课本大全

4 原子核的结合能

原子核的结合能



图 3-4-1 要把${}_1^2\mathrm{H}$原子核中的两个粒子拉开，你必须做功，从而消耗能量



（a）氘核

（b）分开后的质子和中子

图 3-4-2

观察思考

由于质子和中子是由核力结合在一起的，因此，试图把一个氘核分离为分散的质子和中子必须要施力并做功，如图 3-4-1 所示．观察图 3-4-2，你能说出哪种情况下具有较多的能量？是分离之前的${}_1^2\mathrm{H}$核，还是分离以后的质子和中子？

组成原子核的核子间存在强大的核力．核力使原子核成为一个坚固的集合体，如果你试图将原子核中的核子拆散为分散的质子和中子，就得克服核力而做巨大的功．反之，要把分散的核子充分接近，进入彼此的强相互作用力范围，结合成一个原子核，就会放出巨大的能量．这种由分散的核子结合成原子核的过程中所释放出的能量称为原子核的**结合能**（binding energy），它也等于把原子核中的各个核子拆开时克服核力所需做的功．例如，对于核反应

$$ {}_0^1\mathrm{n} + {}_1^1\mathrm{H} \longrightarrow {}_1^2\mathrm{H} + \gamma $$

在这个核反应过程中要放出 2.22 MeV 的能量，这个能量以光子（γ 射线）的形式辐射出去．我们知道，每个碳原子在燃烧时释放出的化学能不过 4 eV，对比可知，原子核的结合能是非常大的．

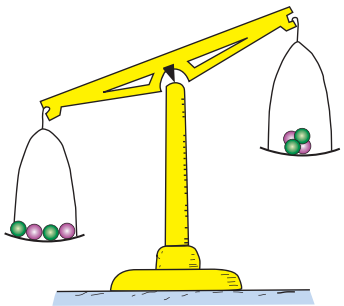


图3-4-3 核子结合在一起，质量就会亏损 Δm，放出的能量为 $\Delta E=\Delta m c^2$

原子核结合能的计算

实验表明，原子核的静质量都小于构成它的所有核子单独存在时的总静质量．根据爱因斯坦提出的质能关系式（我们在《物理 选修 3-4》中已有接触），物体的能量和质

微信公众号：电子课本大全

量之间存在着密切的确定联系，即

$$E = mc^2$$

其中，c 是真空中的光速，m 是物体的质量，E 是物体的能量．当物体的质量发生变化时，它的能量也按照这一关系式发生相应的变化，即

$$\Delta E = \Delta m\, c^2$$

由公式可以算出，即便物体的静质量只有一小部分转化为可用于对外做功的能量，释放出的能量也是相当可观的．通常把核反应中的质量减少亦称为**质量亏损**（mass defect）.

活动

氘核是由1个中子和1个质子构成的，它们的静质量可分别取为

m_p（质子质量）$= 1.672\,6 \times 10^{-27}$ kg，

m_n（中子质量）$= 1.674\,9 \times 10^{-27}$ kg，

m_H（氘核质量）$= 3.343\,6 \times 10^{-27}$ kg，

$m_p + m_n = 3.347\,5 \times 10^{-27}$ kg．则

Δm（质量亏损）$= (m_p + m_n) - m_H$

$=$ _____ kg，

$\Delta E = \Delta m c^2 =$ _____ MeV.

通过计算，请你回答：质量的减少说明了什么？ΔE 说明了什么？什么是结合能？

当一个电子与质子组成氢原子时，放出 13.6 eV 的能量，这些能量只有中子和质子组成氘时放出能量的百万分之六．可见，核子结合时放出的能量是巨大的．

【例题】 ${}^{9}_{4}\mathrm{Be}$核由4个质子和5个中子构成，已知${}^{1}_{1}\mathrm{H}$的质量为$1.672\,6 \times 10^{-27}$ kg，${}^{1}_{0}\mathrm{n}$的质量为$1.674\,9 \times 10^{-27}$ kg，${}^{9}_{4}\mathrm{Be}$的质量为 $14.960\,7 \times 10^{-27}$ kg．计算${}^{9}_{4}\mathrm{Be}$的结合能．

【解】在这一过程的质量亏损为

$\Delta m = 1.672\,6 \times 10^{-27} \times 4\ \mathrm{kg} + 1.674\,9 \times 10^{-27} \times 5\ \mathrm{kg} - 14.960\,7 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg} = 0.104\,2 \times 10^{-27}$ kg

由质能关系式可知 $\Delta E = \Delta m\, c^2 = 0.104\,2 \times 10^{-27} \times (3.0 \times 10^{8})^2\ \mathrm{J} = 9.378 \times 10^{-12}\ \mathrm{J} \approx 58.6$ MeV

所以，${}^{9}_{4}\mathrm{Be}$核的结合能约为 58.6 MeV.

微信公众号：电子课本大全

比结合能曲线

从上面的讨论可以看出，不仅质子和中子结合成氘核要释放能量，质子和中子结合成其他原子核时也要释放能量．不同核的结合能不相同，人们更关注的是这种核平均的结合能，即对一个核来讲，核中平均到每个核子的结合能是多少．

把原子核的结合能 ΔE 除以核子数 A，即 $\dfrac{\Delta E}{A}$ 称为原子核的**比结合能**（specific binding energy）．从上面的例子可以看出，${}^{9}_{4}\mathrm{Be}$ 核的比结合能为 $\dfrac{58.6\ \mathrm{MeV}}{9} \approx 6.5\ \mathrm{MeV}$．不同种类的原子核其比结合能不同，图 3-4-4 给出的曲线表示了原子核比结合能随核子数变化的情况，这一曲线也称比结合能曲线．

比结合能也叫平均结合能．

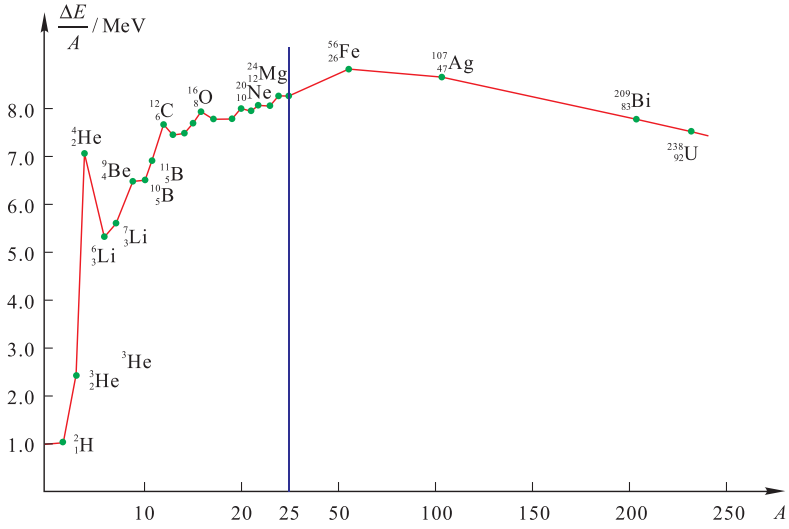


图 3-4-4　比结合能曲线

图 3-4-4 告诉我们：第一，比结合能越大，取出一个核子就越困难，核就越稳定，比结合能是原子核稳定程度的量度；第二，曲线中间高两头低，说明中等质量的原子核（$A = 40 \sim 120$）的比结合能最大，近似于一个常数（8.6 MeV），表明中等质量的核最稳定；第三，质量较大的重核（$A > 120$）和质量较小的轻核（$A < 40$）比结合能都较小，且轻核的比结合能还有些起伏．

微信公众号：电子课本大全

活动

观察比结合能曲线并思考下面的问题.

1. 两个氘核发生如下的核反应：

$$^{2}_{1}\mathrm{H}+{}^{2}_{1}\mathrm{H}\longrightarrow{}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

在反应的过程中放出能量还是吸收能量？为什么？

2. 如果一个重核（如 $^{238}_{92}\mathrm{U}$）可以分裂为两个中等质量的核，你认为反应的过程是放出能量还是吸收能量，为什么？

两个轻核结合成较重的单个原子核时会释放能量，我们把这样的过程称之为核聚变．比结合能曲线在 $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ 附近发生了转折，重核中核子比结合能较小，我们将一个重核分裂为两个（或多个）中等质量的核时也可以释放出核能，我们把这样的过程称为核裂变．

比结合能曲线告诉我们，可以通过聚变和裂变两种方式释放核能．$^{235}_{92}\mathrm{U}$ 核子比结合能是7.5 MeV，氘的比结合能是1.1 MeV，而中等原子核的比结合能约为 8.6 MeV．这个事实是核能利用的基础.

练习与评价

1. 什么是原子核的结合能？什么是核子的比结合能？

2. 原子物理中常用一个特殊的质量单位，即“原子质量单位”，符号为 u，1 u =1.660 5 × 10^{-27} kg．试证明，1 u 相当于 931.5 MeV 的能量．已知光速 $c = 2.997\,9 \times 10^{8}$ m/s，元电荷 $e = 1.602\,2 \times 10^{-19}$ C.

3. 两个氘核聚变时产生一个中子和一个氦核（氦的同位素），已知氘核的质量 $m_{\mathrm{H}} = 2.014\,1$ u，氦核的质量为 $m_{\mathrm{He}} = 3.016\,0$ u，中子的质量为 $m_{\mathrm{n}} = 1.008\,7$ u.（以上质量均指静质量）

（1）写出核反应方程.

（2）计算反应释放出的核能.

（3）如果反应前两个氘核的动能均为 0.35 MeV，它们正面对碰发生聚变，且反应释放的核能全部转化为动能，计算反应生成的氦核和中子的动能.

4. 用核子的比结合能解释为什么裂变和聚变都有可能释放核能.

微信公众号：电子课本大全

5 核裂变

核裂变

1938年，德国化学家、物理学家哈恩（Otto Hahn，1879—1968）等发现用中子轰击铀核的产物中含有中等质量的原子核钡和氪.

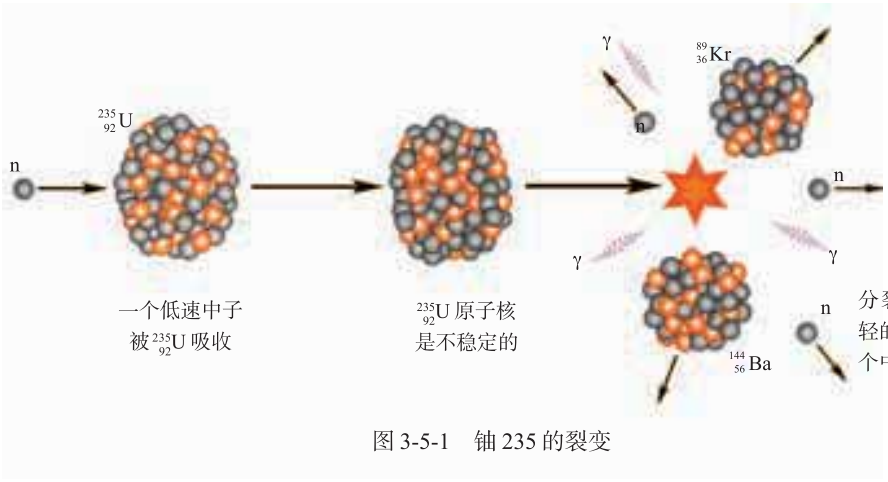


图 3-5-1　铀 235 的裂变

这个过程可以用下面的方程式来表示

$$^{235}_{92}\mathrm{U}+{}^{1}_{0}\mathrm{n}\longrightarrow{}^{144}_{56}\mathrm{Ba}+{}^{89}_{36}\mathrm{Kr}+3{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

后来人们就把重核分裂成几个中等质量原子核的现象称为**核裂变**（nuclear fission）. 1947 年我国著名物理学家钱三强、何泽慧夫妇首先观察到中子轰击铀核的三分裂现象.

活动

在上面铀核的裂变反应中，质量亏损 $\Delta m = 0.215\,3$ u，那么：

1. 一个铀核裂变释放的能量为多少？反应中平均每个核子释放的能量为多少？

2. 1 g 这样的铀（原子核质量 $m = 235.043\,9$ u）发生裂变约能放出多少能量？这些能量相当于燃烧多少煤所释放的化学能（无烟煤的燃烧值为 3.35×10^7 J/kg）？

u 为“原子质量单位”，参见上一节的“练习与评价”.

微信公众号：电子课本大全

链式反应

一个燃烧的烟头，从点燃一片枯叶开始，会逐渐点燃周围的树木，直到最后烧毁整个森林．与此相类似，如果一个反应过程的产物能够再次引发这种反应，从而使反应一旦开始后就能自动延续下去，这种反应过程就称为**链式反应**（chain reaction）．

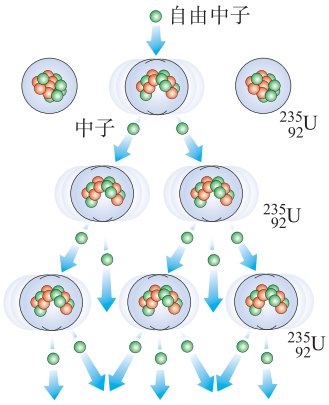


图 3-5-2　链式反应

实验发现，只要用慢中子（能量约为0.025 eV的中子）轰击铀核，铀核就会发生裂变，而且每次裂变可以放出2个以上的中子和巨大的能量，而这些放出的中子又会引起其他的铀核裂变．这样裂变就会持续进行下去，释放出越来越多的核能，这就是重核裂变的链式反应．1 g铀完全裂变释放的能量约相当于燃烧3 t煤放出的化学能，而且这么多能量是在短短不到1 s的时间之内释放出来的．原子弹具有巨大的破坏力就是因为在发生链式反应的瞬间释放出了巨大的能量．

链式反应的维持并非不需要什么条件，铀块的体积对于维持链式反应是很重要的．因为原子核非常小，如果铀块的体积太小，裂变过程产生的大部分中子就会直接从铀块表面穿出而不能碰到铀核，因而不可能将链式反应维持下去．为了保证裂变时产生的中子不会轻易逃逸出去，必须使铀块有足够大的体积．我们把能够发生链式反应的裂变物质的最小体积叫做**临界体积**（critical volume）．对于铀235，其临界体积如柚子般大小，与临界体积相对应的临界质量为15 kg左右．

核电站

巨大的核能如果能为人类所用，这将意味着一场能源革命的到来．可是，怎样才能控制链式反应的速度，使核能平稳地释放出来而不至于引起核爆炸呢？完成这一任务的是核电站，它能把核能平稳地转化为电能．

核电站发电，简言之，就是以核反应堆来代替火电站的锅炉，以核燃料在核反应堆中发生特殊形式的“燃烧”产生热量，来加热水使之变成蒸汽．蒸汽通过管路进入汽轮机，推动汽轮发电机发电．一般来说，核电站的汽轮发电机及电器设备与普通火电站大同小异，不同之处就在于核反应堆．

发电能力同为10^6 kW的火电站与核电站一日燃料运输量的对比：

火电站，5 802.2 t；

核电站，0.082 t.

微信公众号：电子课本大全

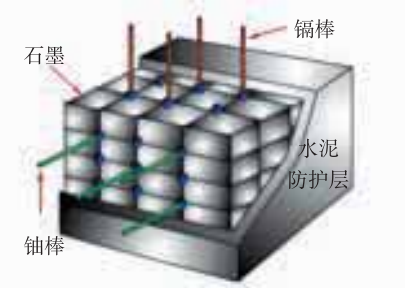


图 3-5-3　慢中子反应堆的示意图

核反应堆（nuclear reactor）是控制链式反应的核心设施，是使核裂变链式反应在人为控制下安全进行的装置．核反应堆按引起裂变的中子能量可分为慢中子（能量约在 0.1 eV 以下）反应堆和快中子（能量约为 1.1 MeV 以上）反应堆．目前运行的大多是慢中子反应堆．

图 3-5-3 是慢中子反应堆的示意图．

这种反应堆中的核反应主要是铀235吸收慢中子后发生的裂变，因为天然铀中只有 0.7% 是铀 235，所以反应堆里必须用浓缩铀（其中铀 235 占 3%~4%）制成铀棒作为核燃料．

铀235具有俘获慢中子，而不易俘获快中子的特点．裂变时产生的中子速度都很大，不容易被铀235俘获，必须设法使它们的速度降下来．为此在铀棒周围放上减速剂，快中子跟减速剂的原子核碰撞后能量减少，变成慢中子．常用作减速剂的物质有普通水（有时叫轻水）、重水（氧化氘，比普通水密度大）或石墨，根据减速剂的不同，又把慢中子反应堆分为轻水堆、重水堆和石墨堆等．目前已运行的核电站以轻水堆居多．

为了调节中子数目以控制反应速度，还需要在铀棒之间插入一些控制棒．制造控制棒的材料是镉或硼等能强烈吸收中子的物质，当反应过于剧烈时，就把控制棒插入得深一些，让它多吸收一些中子，链式反应的速度就会慢一些．反之则把控制棒向外拔出一些．

核电站的内部通常由一回路系统和二回路系统组成．核反应堆是核电站的核心．核反应堆工作时放出的热量，由一回路系统的冷却剂（通常是水或液态的金属钠等）带出，用以产生蒸汽．因此，整个一回路系统被称为“核供汽系统”，它相当于火电厂的锅炉系统．为了确保安全，整个一回路系统装在一个被称为安全壳的密闭厂房内，这样，无论在正常运行或发生事故时都不会影响外界安全．由蒸汽驱动汽轮发电机组进行发电的二回路系统，与火电厂的汽轮发电机系统基本相同，如图 3-5-4 所示．

现在全世界共有400多座核电站在运转发电，而且还有许多正在建设中．总装机容量已经达到 3.66×10^8 kW，其中美国的装机容量最大．法国核发电量占全国总发电量的比例很大，已达到80%左右．我国自行设计制造的第一座核电站——秦山核电站于 1991 年发电成功．此后，秦山的后续工程和大亚湾等地的核电站已经陆续建成并投入正常运行．

核能的利用，给人类带来好处的同时，也带来不少技

微信公众号：电子课本大全

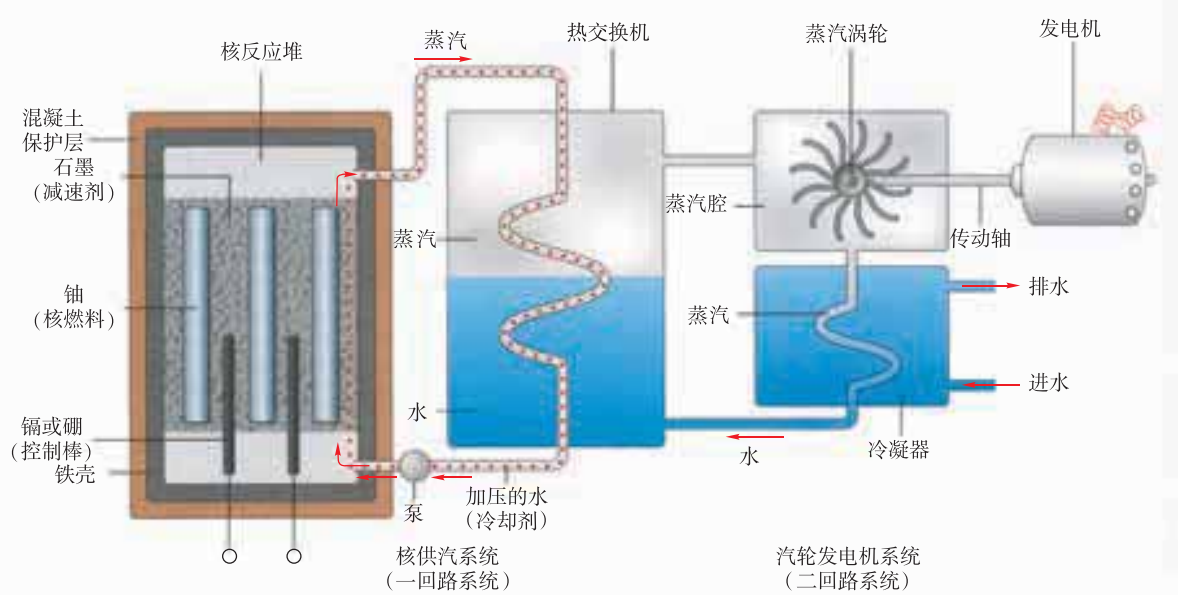


图 3-5-4　核电站示意图

术和社会问题．用过的铀棒仍然有强烈的放射性，辐射水平在头10年降低到1/300，而在头1 000年降低到1/100 000．尽管如此，这些废料放射物在几万年到几百万年内仍有潜在的危害．因此，规划核废料的处理是一个非常麻烦的问题．在英国，规划核废料的存在时间长达1万年，比人类有记载的历史还长．还有人建议要把这个时间延长到100万年，而且对存放的地点也都有不同意见．

1986年，发生在苏联的切尔诺贝利核电站的一次爆炸把大量的放射性同位素抛散到空气中．事故发生几天后，从周围3 km的地带撤出了10万人．事故地点的放射性尘埃散布到欧洲的许多地区，至今仍留存着严重的核污染．

为了保证核电站的安全，新建的核电站设有核燃料芯块的密封包壳、回路系统的密封设施以及核电站的安全外壳，这三道屏障能使核电站的工作十分安全可靠．

讨论交流

核电站可以帮助我们解决能源问题，可也会给我们带来风险．

如果政府决定在你的家乡建设一座核电站，以解决当地的能源短缺问题，你会支持还是反对？说出你的理由．

微信公众号：电子课本大全

小资料

钱三强（1913—1992），1937年赴法国留学，在约里奥·居里夫妇指导下，在巴黎大学镭学研究所居里实验室和法兰西学院原子核化学实验室进行原子核物理的研究工作. 1940年获法国国家博士学位. 曾先后担任法国国家研究中心研究员和研究导师. 在此期间，他在原子核物理学领域不断取得成果. 1938—1939年他与约里奥·居里合作，用中子打击铀和钍得到放射性的镧同位素；1944年他首先从理论和实验上确定了 5×10^4 eV 以下的中低能电子的射程与能量的关系；1946年与人合作，首先测出了镁的 α 射线的精细结构；1946—1948年与何泽慧等人合作，发现铀的三分裂、四分裂现象，并对三分裂现象从实验和理论两方面作了全面的论述. 他对核裂变现象的研究成果，为各国物理界所重视. 1948年回国后，历任原子能研究所所长、科学院副院长，为我国核能事业的发展起到了重要作用.

何泽慧（1914— ），1936年清华大学毕业后到柏林高等工业学校攻读研究生，1940年以精确测定子弹速度的新方法的论文获该校工程博士学位. 1945年在德国皇家学院从云室中首先发现了正负电子几乎全部交换能量的弹性碰撞现象. 1946年年底，在法国与钱三强及另外两名法国研究生发现核裂变的三分裂现象，她还首先观察到四分裂现象. 1948年回国后多次研制出分别对质子或电子灵敏的核乳胶，她还在中子物理与裂变物理实验研究、固体径迹探测技术、空间科学、宇宙射线等领域做出不少贡献.

练习与评价

1. 核裂变为什么能释放出巨大的能量？举例说明.
2. 什么是链式反应？
3. 简述核电站的工作原理.
4. 秦山一期工程建成的核电站的发电功率为 3.0×10^5 kW. 如果 1 g 铀235完全裂变时释放的能量为 8.5×10^{10} J. 并且假定所释放的能量完全变成了电能，那么，秦山核电站每年需要消耗多少核燃料铀235？（一年可按365天计算）

6 核聚变

把轻原子核聚合成较重原子核的反应称为聚变反应，简称**核聚变**（nuclear fusion）.

热核反应

在聚变反应中，要使两个带正电的轻核聚合成一个较大的核，必须使它们具有足够的动能去克服静电斥力，进

微信公众号：电子课本大全

入到核力的作用范围（10^{-15} m）内，然后通过核力的作用结合起来发生聚变．核聚变反应一旦发生，就不再需要外界继续提供能量，靠自身产生的能量就可以使反应继续进行下去．例如，一个氘核和一个氚核聚变成一个氦核（同时放出一个中子），这时的核反应方程是

$$_{1}^{2}\mathrm{H}+{}_{1}^{3}\mathrm{H}\longrightarrow{}_{2}^{4}\mathrm{He}+{}_{0}^{1}\mathrm{n}$$

在这个过程中要释放 17.60 MeV 的能量，平均每个核子放出的能量在 3 MeV 以上，比核裂变反应中平均每个核子放出的能量要大 3 倍多．核聚变反应和核裂变反应相比，具有很多优越性：首先，在消耗相同质量的核燃料时，核聚变反应比核裂变反应能释放更多的能量；其次，核裂变反应时产生放射性废料，处理起来比较困难，而核聚变反应没有放射性废料产生；最后，核聚变反应所用的燃料氘，在地球上的储量非常丰富，每升海水含 0.03 g 氘，如果用来进行核聚变反应，放出的能量约和燃烧 300 L 汽油相当．地球上蕴藏的核聚变能约为蕴藏的可利用的全部核裂变能的10^{7}倍，可以说几乎是用之不竭的能源．

氚虽然自然界中不存在，但靠中子同锂作用可以产生，而海水中含有大量锂．

既然核聚变反应与核裂变反应相比，有上述诸多的优点，为什么至今我们还没有用核聚变反应来发电呢？这是因为要使轻核结合发生聚变，并且反应进程可控，这在技术上是较难实现的．

计算表明，要启动 $_{1}^{2}\mathrm{H}+{}_{1}^{3}\mathrm{H}\longrightarrow{}_{2}^{4}\mathrm{He}+{}_{0}^{1}\mathrm{n}$ 这样一个核聚变反应，必须使$_{1}^{2}\mathrm{H}$核加速，使它具有足够大的动能，以克服库仑斥力而进入到$_{1}^{3}\mathrm{H}$核的核力作用范围之内．而要使它的动能如此之大，温度必须达到 10^{8} K，所以核聚变反应也称**热核反应**（thermonuclear reaction）．

运用加速器给氘核加速是很容易想到的方法，可是并不可行．这是因为加速了的氘核打在含氘核的固体靶上，大部分能量会消耗在与电子的碰撞上，发生聚变的概率非常小．

目前，热核反应主要用在核武器上，那就是氢弹．它以原子弹爆炸产生的高温来激发核聚变反应，在极短时间内释放出巨大的能量而发生剧烈的爆炸．但是要和平利用聚变能必须使核能缓慢地释放，释放的速度应当能够进行人为控制，即发生可控核聚变．怎样能使热核反应以可控制的方式发生一直是困扰科学家的难题．

微信公众号：电子课本大全

可控核聚变反应研究的进展

我们把受控聚变情况下释放能量的装置，称为聚变反应堆．英国、美国和苏联在20世纪40年代后期就开始研究聚变反应堆．20世纪下半叶，聚变能的研究取得了重大的进展，一种称作托卡马克受控热核反应的研究领先于其他途径．

“托卡马克”是tokamak一词的音译．

托卡马克是苏联科学家于20世纪60年代建立的一种环形磁约束受控热核反应装置，也叫环流器．在这种装置中，等离子体（原子经过充分电离形成的自由电子和离子的混合态）被不同方向的磁场约束在一个环管状的金属反应室中，用电磁感应产生的大电流对等离子体进行加热，从而实现等离子体热核燃料的“点火”．

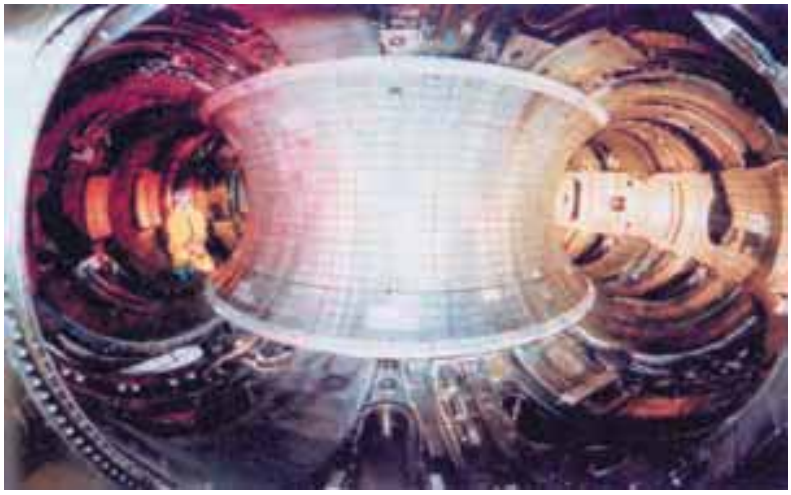


图 3-6-1　美国普林斯顿大学的托卡马克装置的环形反应室内景

美、日、欧等发达国家和地区的大型常规托卡马克研究获得了许多重要成果．这些成果证实了在托卡马克上产生受控聚变能的可行性．近年来受控热核聚变研究的重大突破是将超导技术成功地应用于产生托卡马克强磁场的线圈上，建成了超导托卡马克．这可能是解决未来聚变反应堆问题的有效途径．目前，全世界仅有俄、日、法、中四国拥有超导托卡马克．人类实现受控热核聚变的日子已向我们走近．



图 3-6-2　我国于2006年自行设计建成的全超导托卡马克核聚变装置 EAST

核聚变是一种安全、不产生放射性物质、原料成本低廉的能源，是人类未来能源的希望．

微信公众号：电子课本大全

恒星演化中的核反应

恒星主要是由遍布宇宙中的极其弥散的气态尘埃（氢为主要成分）聚集形成的．在某些区域尘埃会相对密集一些，由于相互之间的引力，物质密集处就成为引力中心，使得物质越聚越多，这便成为了恒星发源地．这种由于物质间相互吸引而聚集到一起的现象，叫做引力坍缩．聚集了足够多的物质落入这个中心后逐步凝聚压缩造成局部升温，直到满足“点火”条件，核聚变反应就开始了，这部分物质就逐步演变成一个新的恒星．

太阳就是这样形成的．由引力形成的巨大中心因压缩而变热，直至中心达到百万摄氏度以上的高温．高温使原子相互之间剧烈地碰撞而失去电子，留下的裸核仍会发生猛烈撞击而粘在一起发生核聚变．核聚变又产生大量的热，由于热辐射产生向外的推力使得星体不再进一步坍缩而达到一种平衡．太阳约在50亿年前开始了它的核聚变，点燃了自己并成为一颗能自我维持、长期稳定的恒星．在这个漫长的稳定时期，太阳系中的一个行星——地球上面形成了高度复杂的分子，最终出现生命，而且更晚些的时候演化出我们人类．有人类特征的动物在地球上存在了约300万年，这不过是太阳历史的0.06%．

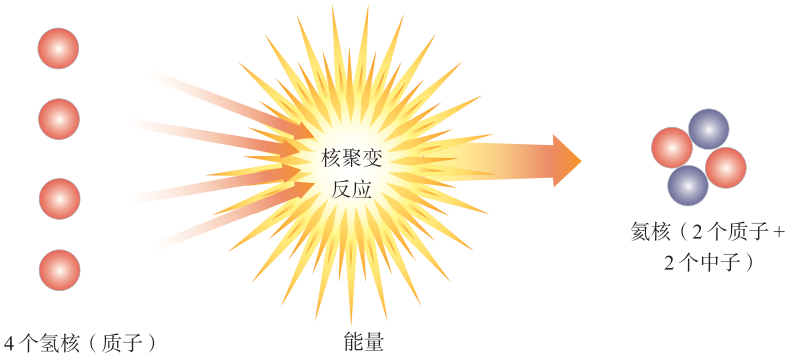


图 3-6-3　太阳包含 70% 的氢，30% 的氦．太阳能来自于太阳内部的核聚变反应

供太阳发生核聚变过程的燃料是氢．再经过几十亿年，氢的储藏将逐渐枯竭，直到大约50亿年后将不能再维持目前的核聚变，这时太阳将进入老年期．核聚变停止，太阳又将开始引力坍缩使温度升高，直到它的核心热到点燃以下新的核聚变过程：

$$^{4}_{2}\mathrm{He}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}\longrightarrow{}^{8}_{4}\mathrm{Be}$$

$$^{4}_{2}\mathrm{He}+{}^{8}_{4}\mathrm{Be}\longrightarrow{}^{12}_{6}\mathrm{C}$$

小资料

1952 年，美国爆炸了世界上第一颗氢弹．这像在太阳上所发生的事情一样，由两个氢原子核聚合生成氦，这个反应方程式是

$$^{2}_{1}\mathrm{H}+{}^{3}_{1}\mathrm{H}\longrightarrow{}^{4}_{2}\mathrm{He}+{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

这次聚变爆炸的规模相当于1 000万吨TNT炸药，所释放的能量是在广岛投放的原子弹释放能量的1 000倍，是整个第二次世界大战中全部作战人员所发射的总爆炸能量的两倍．

1967 年 6 月 17 日，中国自行设计、自行制造的第一颗氢弹在中国西北部上空试爆获得成功．

微信公众号：电子课本大全

这些更热的核反应使得恒星膨胀，变成一颗红巨星，红巨星比原来要大得多，它的热量将会把地球上存留的任何生命都“蒸发”掉．那些靠近太阳的行星，包括水星、金星、地球，还有火星，都将慢慢地气化，太阳的核反应最终也将走完自己的历程．燃烧完后留下的是一个与地球差不多大小的太阳残骸．

练习与评价

1．核聚变和核裂变的区别是什么？

2．产生核聚变需满足的条件是什么？为什么达到核聚变所需要的条件是困难的？

3．用 α 粒子轰击氩 40 核（$^{40}_{18}\mathrm{Ar}$），产生一个中子和一个新核．这个新核是什么？写出核反应方程．

4．$^{2}_{1}\mathrm{H}$ 和 $^{3}_{1}\mathrm{H}$ 在超高温下聚合成氦核时，放出一个中子和能量，已知各粒子的静质量分别为：$^{2}_{1}\mathrm{H}$ 是 2.014 0 u，$^{3}_{1}\mathrm{H}$ 是 3.016 0 u，氦是 4.002 6 u，中子是 1.008 7 u．写出这个核反应的方程式，计算反应放出的能量是多少焦耳．

5．2 个质子和 2 个中子结合为一个氦原子核，会有多少质量亏损？如质量亏损为 1 kg 会释放多少能量？如果一个大发电厂 25 年的发电量与此相当，这个发电厂每年发电量是多少？

7 粒子物理学简介（选学）

很长时期以来，人们一直认为物质是由一些基本元素构成的．这种思想可以追溯到古代，古希腊学者德谟克利特认为物质由原子组成，中国古代也有人认为自然界是由金、木、水、火、土 5 种元素组成的．到了 19 世纪，人们认识到，原子是化学反应中所涉及物质的最小基本单元．

1897 年汤姆孙发现原子中存在电子后，人们又陆续发现了质子、中子，所以就认为电子、中子、质子是组成物质的基本粒子．

1932 年安德森在宇宙射线中发现了正电子，它和通常电子的质量、电荷量等都相同，只是电荷的符号相反．

微信公众号：电子课本大全

它被称为电子的反粒子，正电子也成为了基本粒子．后来在宇宙射线中又发现了一些奇异的粒子．“打碎粒子的工具”——加速器的出现，使人们又发现了不少新粒子，人们对微观物质世界的认识在逐步地深入．

● 基本粒子的分类

大家知道，自然界存在着四种基本相互作用（见表 3-7-1）（参看《物理 必修 1》第二章的“课外阅览”），即强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和引力相互作用．粒子物理学通过研究粒子间的各种相互作用来了解粒子的性质，并且按粒子参与相互作用的性质把粒子分为三类．

表 3-7-1　4 种基本相互作用

相互作用种类	相对强度	作用范围 /m	举例
强	1	~ 10^{-15}	核子之间
电磁	10^{-2}	∞	电荷之间
弱	10^{-12}	~ 10^{-18}	β 衰变中
引力	10^{-37}	∞	天体之间

第一类是作为上述四种相互作用传递媒介的各种不同粒子，称为媒介子．传递万有引力的称为“引力子”，现在还没有被实际观测到，仍是一种假定．光子传递电磁相互作用．传递弱相互作用的粒子称为中间玻色子，共有 3 种．传递强相互作用的是胶子，共有 8 种．把“引力子”算上，媒介子共有 13 种．

第二类是轻子，是指不参与强相互作用的粒子，我们熟知的电子、中微子，都属于轻子一类．轻子共有 6 种，这 6 种都有自己的反粒子，所以实际上有 12 种．

第三类是强子，是指一切参与强相互作用的粒子．实验上已发现的几百种粒子大部分都是强子．人们最早发现的强子是质子和中子．强子是由夸克构成的，至今已经发现的夸克有 6 种．

从当前的实验和理论来看，还未发现媒介子、轻子、夸克的内部结构，是否就可以称之为“基本粒子”？科学在发展，人类的眼光不断地深入到物质世界的更深层次．“基本粒子”是否基本，还有待于物理学家的进一步研究与探索．

“夸克”一词来自乔伊曼的一部描写 Finn 先生的生活小说 *Finnegan's wake*，是指一种海鸟的叫声．

微信公众号：电子课本大全

加速器

粒子物理学的发展依赖于加速器的发展，粒子加速器是用人工方法产生高速粒子的设备．关于加速器，我们在《物理　选修 3-1》中已有所认识．

早在20世纪20年代前，人们就利用天然放射性物质发出的α粒子去轰击原子核，研究原子核的结构．但天然放射性物质放出的粒子能量不高，不能满足科研的需要，人们开始研究人工加速带电粒子的方法．通过几十年的努力，目前已能将电子、质子等带电粒子加速到接近光速，这些高能量的粒子束成为人们认识物质深层结构的主要工具．

目前通用的加速器有20多种，按加速粒子的路径大致可以分为两类：一类是直线加速器，其中带电粒子沿直线运动；一类是回旋加速器，带电粒子沿圆弧运动，并反复加速．下面介绍3种典型的加速器．

1．直线加速器

这是一种用高频电场加速带电粒子的谐振加速器．如图3-7-1所示，粒子在加速器中的运动轨迹是一条直线．高频电场的强度和方向是随时间而变化的，而在加速器中必须使带电粒子只在一个方向上加速．这就要保持粒子与高频电场之间的谐振关系．一般是选择适当长度的漂移管，使粒子在两管之间被加速，当电场改变方向时，粒子行正好处在管内被屏蔽，这样粒子就一步步地被加速，直至具有很高的能量．

在直线加速器中，漂移管的长度与高频电场变化频率之间的关系，就类似于共振现象中固有频率与驱动力频率之间的关系．只有“合拍”，粒子才能不断加速．

最早的加速器是直线静电加速器．它是靠高电压来加速粒子的．随着电压的增高，漏电、放电等问题越来越严重，这种加速器很难将粒子加速到30 MeV以上．它的主要优点是粒子束的强度高（可达几毫安）．

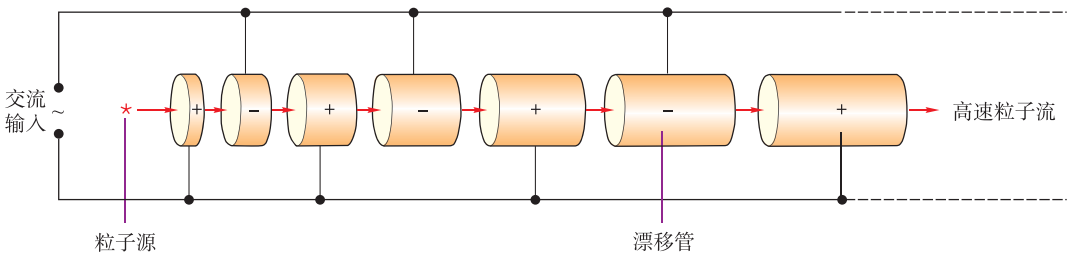


图 3-7-1　漂移管式直线加速器装置示意图

2．回旋加速器

回旋加速器是一种用固定频率的高频电场对在圆弧轨道中运动的带电粒子进行加速，以获得高能粒子的设备．带电粒子在

微信公众号：电子课本大全

垂直于磁感应强度的平面内做圆周运动，使高频电源的频率等于粒子回旋的频率就能使粒子不断被加速.

1932年美国物理学家劳伦斯(Ernest Orlando Lawrence，1901 — 1958 ）建成第一台回旋加速器（直径 27 cm，可拿在手中，出射粒子能量达1 MeV ），到20世纪40年代初，此类加速器出射粒子的能量达到40 MeV，远远超过天然放射性物质放出的粒子的能量，对核裂变及核力的研究起了特别重要的作用.

3．对撞机

能够实现两束相对运动的粒子对撞的设备叫做对撞机. 近几十年来发展起来的高能加速器，多数是对撞机. 对撞机的工作原理是粒子先在同步加速器中加速，然后射入对撞机. 在对撞机里两束粒子流反方向回旋，并进一步加速，在轨道交叉的地方相互碰撞.

对撞机的出现，大大提高了有效作用能，因此它在高能物理实验中起着日益显著的作用. 近年来，在粒子物理中的一系列重大发现和研究成果，几乎都是在对撞机上获得的.

我国的北京正负电子对撞机（BEPC ）于 1988 年建成，最高能量为 2 × 2.8 GeV.



图 3-7-2　北京正负电子对撞机鸟瞰图



图 3-7-3　1988 年北京正负电子对撞机首次对撞成功时的情景

目前已建成的最高能量的对撞机，是欧洲核子研究组织CERN的对撞型粒子加速器——大型强子对撞器(LHC), 它于2008年 9 月 10 日开始运转. 2010年3月20日首度成功进行了粒子撞击实验，创造了高达 7 TeV 的能量.



图 3-7-4　这是 LHC 的鸟瞰示意图，它的周长高达 27 km，主环跨越法国和瑞士国界. ATLAS、CMS、ALICE 和 LHCb 分别是不同的粒子探测器，安装在四个地下巨洞中，分布在 LHC 周围

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 什么是强子？强子有结构吗？
2. 我们熟悉的电子、质子、光子分别属于哪种粒子？
3. 自然界中的 4 种基本相互作用的大小的相对强度比是怎样的？

发展空间

课外阅览

夸克模型

强子的种类这么多，是不是都是“基本的”，它有没有内部结构呢？1970 年左右，用极高能量（>1 GeV）的电子轰击质子（图 3-7-5），电子发生了大角度散射，这表明质子内部含有一些半径很小的散射中心，或者说质子是由一些“硬心”组成的．以上迹象告诉人们，强子的内部不是均匀的，是有结构的．

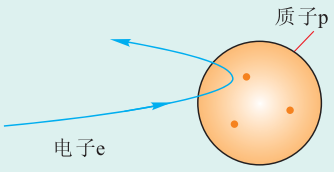


图 3-7-5　质子对高能电子的散射

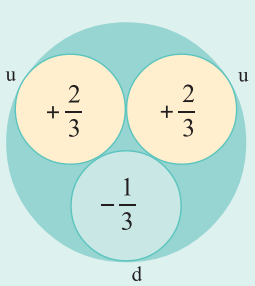
1964 年美国物理学家盖尔曼（Murray Gell-Mann，1929—　）提出了强子结构的夸克模型（1965 年前后，我国物理工作者独立提出了层子模型，对强子结构进行了研究）．他认为强子是由 3 种更基本的粒子组成的，并称这些粒子为夸克（quark）．他认为夸克有 3 种：上夸克（u）、下夸克（d）和奇异夸克（s）．各种夸克都有相应的反夸克．强子由这 3 种夸克和相应的反夸克组成．每个夸克的电荷量不是 e（元电荷）的整数倍，而是 e 的 $\frac{1}{3}$ 或 $\frac{2}{3}$（见表 3-7-2）．

表 3-7-2　6 种夸克

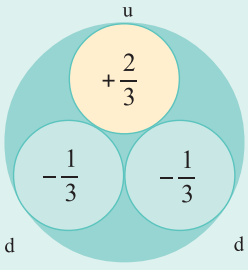
名称	u	d	s	c	b	t
电荷	$\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{2}{3}e$

至今已经发现了 6 种夸克，除 u、d、s 外，还有粲夸克（c）、底夸克（b）和顶夸克（t）．

按夸克模型，质子由 3 个夸克（uud）组成，所带电荷量恰好是 e．中子也由 3 个夸克（ddu）组成，总电荷量为零（图 3-7-6）．



（a）质子由 2 个 u 夸克和 1 个 d 夸克组成，整体电荷量为 +1



（b）中子由 1 个 u 夸克和 2 个 d 夸克组成，整体电荷量为零

图 3-7-6

微信公众号：电子课本大全

本章小结

1. **原子核的组成**　原子核由质子和中子组成，质子与中子统称核子．原子序数相同而中子数不同的原子核称为同位素．

2. **核力**　在核子之间相距约为 10^{-15} m 范围内强烈吸引的力，称为核力．

3. **衰变**　天然放射性元素自发地蜕变为另一种元素，同时放出射线的现象称为放射性衰变．这些放射性元素放射 α 射线，有些放射 β 射线，有些在放射 α 或 β 射线的同时，还放出 γ 射线．

4. **半衰期**　放射性衰变遵从一定的统计规律．放射性元素经衰变数目减少至原有的一半所用的时间称为半衰期，半衰期是放射性物质的固有性质．

5. **结合能**　由分散的核子结合成原子核的过程中所释放出来的能量称为原子核的结合能．结合能除以核子数，得到原子核的比结合能．比结合能曲线表明：比结合能越大的核越稳定；中等质量原子核的比结合能最大，因此中等质量核最稳定；质量较大的重核和质量较小的轻核比结合能都较小．

6. **核裂变**　一个重核分裂为几个中等质量原子核的现象称为核裂变．裂变一旦开始，就能不断进行下去，并释放出越来越多的核能的过程，称为链式反应．链式反应需要一定的条件．

7. **核聚变**　两个轻核结合成较重的核时会释放能量，这个过程称为核聚变．核聚变能是核污染很小的能源．太阳能来自于太阳内氢核的聚变反应．

8. **基本粒子**　基本粒子可分为 3 类：第一类是传递 4 种相互作用的粒子，共 13 种；第二类是不参与强相互作用的轻子，共 12 种；第三类是参与强相互作用的强子，有几百种．强子是由夸克组成的．

9. **加速器**　用人工的方法产生高速粒子的设备称为加速器，加速器大致可分为直线加速器和回旋加速器两类．近几十年来发展起来的高能粒子加速设备，大多用于实现两束相对运动的粒子的对撞，称为对撞机．

微信公众号：电子课本大全

习　题

1. 一个中子打中一个 $^{235}_{92}\mathrm{U}$ 原子核而生成 $^{139}_{57}\mathrm{La}$，生成的另一个元素是什么？一个中子打中一个 $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ 原子核而生成 $^{88}_{38}\mathrm{Sr}$，生成的另一个元素是什么？

2. $^{16}_{7}\mathrm{N}$、$^{16}_{8}\mathrm{O}$ 和 $^{16}_{9}\mathrm{F}$ 原子的质量分别是 16.006 099 u、15.994 915 u 和 16.011 465 u．试计算这些原子核的结合能和核子的比结合能．（1 u = 1.66 × 10^{-27} kg = 931.5 MeV/c^2）

3. 在下列四个方程中，X_1、X_2、X_3 和 X_4 各代表何种粒子？

（1）$^{235}_{92}\mathrm{U}+{}^{1}_{0}\mathrm{n}\longrightarrow{}^{95}_{38}\mathrm{Sr}+{}^{138}_{54}\mathrm{Xe}+3\mathrm{X}_1$　　（2）$^{2}_{1}\mathrm{H}+\mathrm{X}_2\longrightarrow{}^{3}_{2}\mathrm{He}+{}^{1}_{0}\mathrm{n}$

（3）$^{238}_{92}\mathrm{U}\longrightarrow{}^{234}_{90}\mathrm{Th}+\mathrm{X}_3$　　（4）$^{24}_{12}\mathrm{Mg}+{}^{4}_{2}\mathrm{He}\longrightarrow{}^{27}_{13}\mathrm{Al}+\mathrm{X}_4$

4. $^{238}_{92}\mathrm{U}$ 变为 $^{206}_{82}\mathrm{Pb}$ 要经过几次 α 衰变和几次 β 衰变？它的中子数减少了多少这种放射性核？

5. 完成下列核衰变方程．

$^{238}_{92}\mathrm{U}\longrightarrow{}^{234}_{90}\mathrm{Th}+$ _____

$^{90}_{38}\mathrm{Sr}\longrightarrow{}^{90}_{39}\mathrm{Y}+$ _____

6. 人体中，碳元素占体重的 18%，生物体中每克碳含有 750 亿个 $^{14}_{6}\mathrm{C}$ 原子，每 2 min 内有 17 个核发生衰变．试估计你身体中每分钟 $^{14}_{6}\mathrm{C}$ 的衰变数目．

7. 考古学家发掘一具古尸，测出其体内每克碳平均每分钟大约有 1 个 $^{14}_{6}\mathrm{C}$ 核衰变，试估算这个人所处的年代．

8. 如果一种放射性核的半衰期是 1 年，5 年后它还剩下多少？

9. 地球年龄约为 45 亿年，在刚生成的地球上，$^{238}_{92}\mathrm{U}$ 的数量大约是它现在数量的几倍（参见表 3-2-1 半衰期实例）？

10. 在原子核里还有电磁力在起作用．请你说出这个力是倾向于帮助还是阻止核裂变的发生．

11. 如果一座大型核电站的发电功率大约是 10^6 kW，核燃料为 $^{235}_{92}\mathrm{U}$．请你估计，1 天里大约有多少静质量会消失？

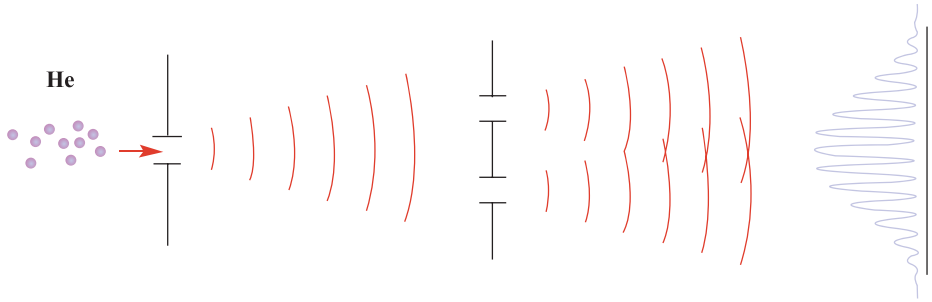
12. 世界上第一次核聚变爆炸的规模是 10 个百万吨当量，即相当于 1 000 万吨 TNT 炸药．假设一颗百万吨当量（释放的能量是 4.2 × 10^{15} J）的核聚变弹，把释放的全部能量用来把人提升到 2 000 m 高处，大约可以提起多少人？占地球总人口的百分之几？（设人均体重为 600 N，世界人口约为 65 亿）

微信公众号：电子课本大全

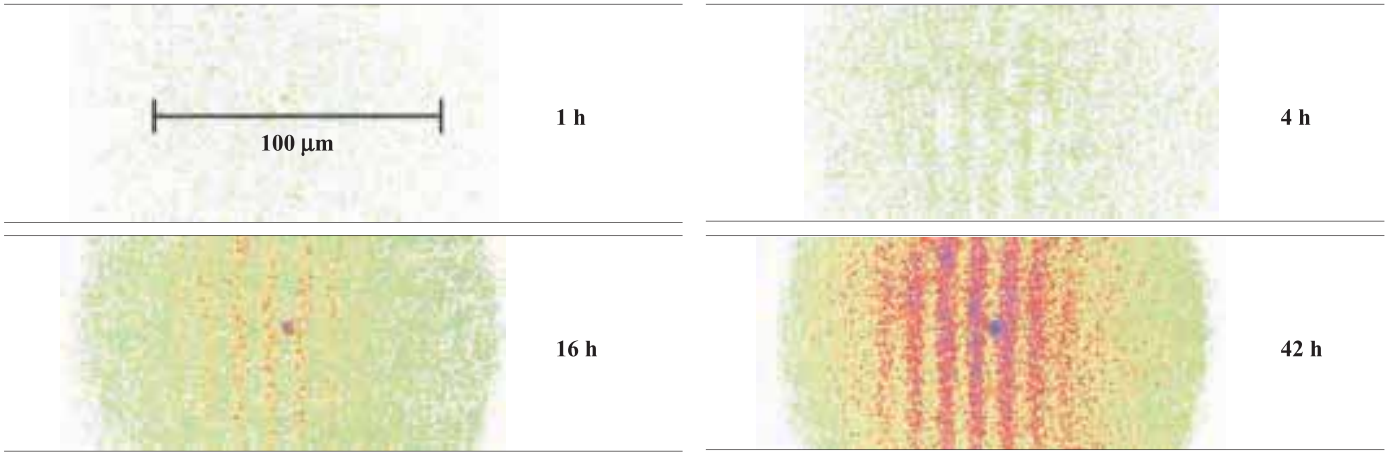
第四章 波粒二象性

- 量子概念的诞生
- 光电效应与光的量子说
- 光的波粒二象性
- 实物粒子的波粒二象性
- 不确定关系

波粒二象性是微观世界的基本特征. 正是在二象性的基础上,形成了微观世界不同于宏观世界的一幅幅奇妙的图景.



(He原子通过双缝干涉示意图)



(在不同时间下He原子的双缝干涉图)

微信公众号:电子课本大全

1 量子概念的诞生

至 20 世纪初，以牛顿力学为核心的经典物理学已取得了伟大的成就，但是也遇到了一些难以克服的困难，热辐射就是其中的一个．在解决热辐射问题的过程中，量子概念诞生了．

热辐射问题

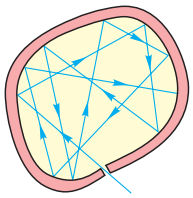
当我们靠近燃烧着的火炉时，马上会感到热，这是由于炉中燃烧的炭块在向外辐射能量．我们再来观察炉内炭块的颜色，当温度较低时，炭块呈暗红色，随着温度的不断升高，它将由赤红逐渐变得橙红，到最后由黄色变成白色，这表明炭块是以电磁波的形式向外辐射能量，而且在不同温度下辐射强度按电磁波波长有不同的分布．事实上，我们周围的一切物体都在以电磁波的形式向外辐射能量，而且辐射强度随波长如何分布都与物体的温度相关，所以物理上把这种辐射称为**热辐射**（heat radiation）．

随波长的变化，辐射体向外辐射强度的分布有什么样的规律？这是当时物理学家遇到的一个难题．

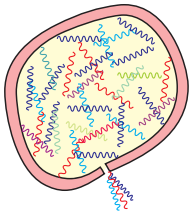
辐射强度是指物体在某温度下，其表面的单位面积在单位时间内向四周所辐射电磁能的多少．

黑体与黑体辐射

物体除了向外辐射电磁波，其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颜色就是反射光所致．高楼的窗口看上去是黑的，是因为它吸收了外界射来的电磁波，而从窗口反射出来的电磁波很少的缘故．如果某物体能够全部吸收外来电磁波而不发生反射，这种物体就称为绝对黑体，简称**黑体**（blackbody）．比如，做一个空腔，并在腔壁上开一个小洞，那么射入小洞的光就很难有机会再从洞口“跑”出，这个空腔就可以看做黑体，



（a）空腔上开的一个小洞做可以看做黑体，洞口是黑体的表面



（b）加热腔体，从小洞口向外辐射各种波长的电磁波．这就是黑体辐射

图 4-1-1　黑体辐射

微信公众号：电子课本大全

洞口看上去的确是黑的.

一般材料的热辐射与材料的种类及表面状况相关，而黑体的热辐射状况与制作腔体的材料无关，能反映具有普遍意义的热辐射规律，从而使得黑体成为研究热辐射问题的理想模型.

加热腔体，黑体表面就向外辐射电磁波，这就是**黑体辐射**（blackbody radiation）. 用分光技术和热电偶设备，就能测出黑体在不同温度下辐射强度按波长分布的情况. 当时就有人用精巧的实验测出了黑体辐射的电磁波强度随波长的分布曲线.

实验曲线出来之后，人们就试图用当时认为已经成熟的经典理论给予说明. 但理论得出的结果都与实验曲线不符. 在各种解释中有两种最为著名：一是维恩（W.Wien）在1896年提出的公式，它的短波部分与实验相符，而在长波部分与实验发生分歧；二是瑞利（Lord Rayleigh）在1900年提出的公式，它在长波部分与实验曲线大体相符，而在短波部分与实验发生严重分歧，尤其是在高频范围内辐射的电磁波强度随频率的增大可趋于无穷大，这显然与客观事实不符.

那么，正确的理论解释又是什么呢？

由于高频范围的辐射是在紫外波段，故而这一理论困境被当时的科学家们称为“紫外灾难”.

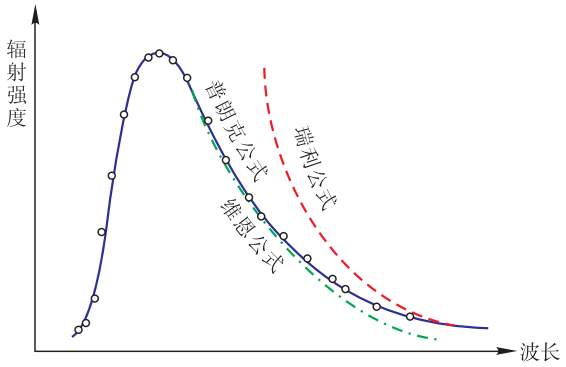
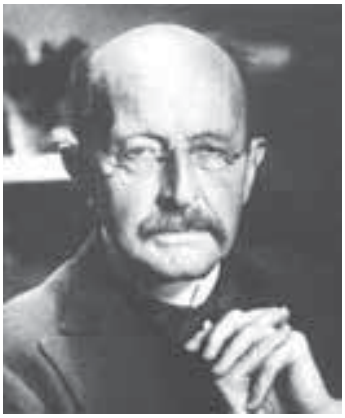


图 4-1-2　各种黑体辐射的能量分布公式与实验结果的比较

普朗克提出的能量子概念

1900年，德国物理学家普朗克根据黑体辐射的实验曲线得到一个经验公式. 这个公式在长波及短波部分都能很好地与实验相符. 这犹如一个学生看到了一道习题的答案，但还不知道习题的正确解法. 为了从理论上推导出这个与实验相符的经验公式，普朗克把腔壁看做是由各种频率振动的带电谐振子组成的，黑体的辐射就是这些谐振子向外



普朗克
（Max Planck，1858—1947）

微信公众号：电子课本大全

辐射的各种电磁波．他在经典热力学的基础上，又提出了一个全新的关键假设：

谐振子具有的能量是不连续的，而只能取一些分立的值，即 $E_n = nhv$（$n = 1$，2，3，…），也就是说能量 E 只能取 hv 的整数倍，最小的一份能量为 $\varepsilon = hv$，称为**能量子**（quantum of energy）．式中 v 是谐振动的频率，h 是一个常数，称为**普朗克常量**（Planck constant），它的值是

$$h = 6.626\ 068\ 76\ (52) \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$$

为了便于计算，通常取 $h = 6.63 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$．利用能量子的假设，普朗克从理论上成功推导出了与实验相符的公式（后称普朗克公式）．这是物理学史上第一次提出量子的概念，具有划时代意义，普朗克因此获得了 1918 年诺贝尔物理学奖．

小资料

我国物理学家叶企孙（1898—1977）和他的合作者在 1921 年测定的 h 值是（6.556 ± 0.009）× 10^{-34} J·s，这个数值在物理学界使用了 16 年之久．

● 量子论诞生的历史意义

在宏观世界里，我们描述的物体各种形式的能量都是连续变化的，可以取任何数值，也允许任何大小的能量增加或减少．能量子的提出打破了一切自然过程都是连续变化的经典看法，第一次向人们展示了自然过程的非连续特性．

能量子概念的引入，标志着量子论的诞生，敲开了人类认识微观世界的大门．1900 年 12 月 14 日，普朗克在德国物理年会上提出了能量子的概念，解决了黑体辐射问题．这一天被后来的科学史学家定为量子的诞生日．

能量子概念一开始只是一种新奇、大胆的假设，虽然它能解决黑体辐射这个具体问题，但很多人还是觉得它的根据不够充分，对它持怀疑态度．在此后相当长时间内，根据许多实验事实，经过许多物理学家，包括爱因斯坦、玻尔等人的共同努力，才使得“量子”的概念成为物理学的一个重要思想．又随着用这一概念能够说明的事实越来越多，从这一概念开始建立的量子理论就逐步完善起来．到 20 世纪 20 年代，建立了微观粒子的基本运动方程，最终形成了物理学理论的重要分支——量子力学．

量子力学和相对论是20世纪物理学发展的两个最大的成就，导致了高新技术在 20 世纪后半期和 21 世纪的蓬勃发展．

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 用镜子观察一下你自己眼睛的瞳孔，它是什么颜色？为什么？
2. 什么是黑体？什么是黑体辐射？为什么研究热辐射要用黑体？
3. 普朗克能量子假说的主要内容是什么？试说明这一假设的意义.

2 光电效应与光的量子说

光电效应

19 世纪末，人们发现当光照射在金属表面上时，金属中的电子会因吸收光的能量而逸出金属表面，这种现象称为**光电效应**（photoelectric effect），见图 4-2-1.

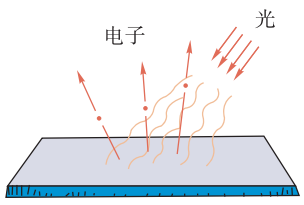


图 4-2-1　当光照射在金属表面上时，金属表面有电子逸出

研究光电效应的实验装置如图 4-2-2 所示. 图中 S 为一个抽成真空的玻璃容器，容器内有阴极 K 和阳极 A，阴极 K 为金属平板. 为了使紫外线能够更好地穿入容器照射到金属表面上去，在玻璃容器上装一石英小窗（石英对紫外线的吸收很小），两个电极分别和电流计 G、电压表 V 和电池组 E 连接. 当紫外线照射在金属板 K 上时，金属板释放电子，这种电子叫光电子. 光电子在电场力作用下向阳极 A 运动，就形成了光电流.

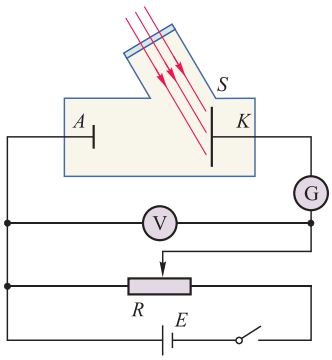


图 4-2-2　光电效应实验

通过实验，人们发现了光电效应的若干特征.

1. 对于给定的光电阴极材料，都存在一个发生光电效应所需的入射光的最小频率 ν_0，叫做光电效应的**截止频率**（cutoff frequency），亦称为极限频率. 只有超过截止频率的光，才能引起光电效应. 不同金属材料的截止频率不同.

2. 当入射光的频率高于截止频率、光电流出现时，光电流的大小由光强决定，光强越大，光电流越大.

微信公众号：电子课本大全

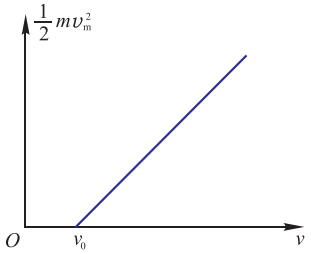


图 4-2-3　实验中得出的光电子最大初动能与入射光频率的关系

3. 从阴极发出的光电子的最大初动能与入射光的频率成线性关系，参看图 4-2-3.

4. 只要光的频率大于截止频率，即使用极弱的入射光，光电子总能立刻（约 10^{-9} s）发射出来.

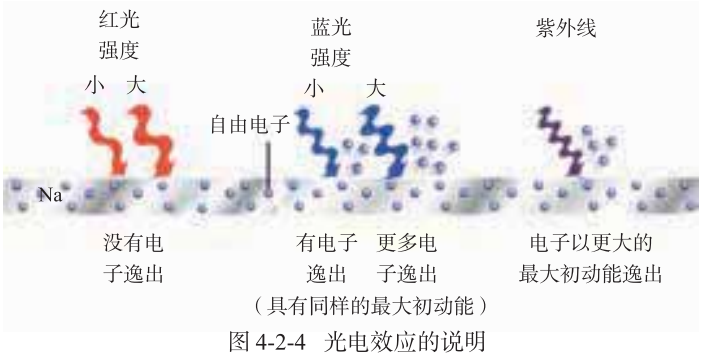


图 4-2-4　光电效应的说明

● 光的波动说的困难

关于光的本性，历史上存在着粒子说与波动说的长期的争论. 18—19 世纪，由于光的干涉、衍射现象的发现，光的波动说在物理学中占据了主导地位. 人们已经认识到光是一种电磁波. 按照光的波动说，当光照射到金属表面时，金属中的电子会从入射光中持续吸收能量，只有当能量积累到一定量值时（按波动理论计算竟需要几分钟或更长的时间），电子才能从金属表面逃逸出来. 显然，在光电效应问题上，光的波动说遇到了巨大的困难.

● 光量子概念的提出　光电效应方程



爱因斯坦
（Albert Einstein，1879—1955）

1905 年 3 月，年仅 26 岁的青年爱因斯坦从光电效应中领悟到光不仅具有波动性，还有粒子性. 爱因斯坦把普朗克的能量子概念推广到光电效应的研究中，提出了光量子概念，简称**光子**（photon）.

他假设，每一光子的能量为 $\varepsilon = h\nu$，其中 h 为普朗克常量，ν 为光的频率. 因此，不同频率的光子具有不同的能量.

按照上述光子假设，金属板内的电子从入射光中吸收了一个光子的能量 $h\nu$ 之后，一部分消耗于电子由金属内逸出表面时所需做的功 W，叫逸出功；另一部分转化为光电

微信公众号：电子课本大全

子的动能 $\frac{1}{2}mv^2$．按照能量守恒定律，得到

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

这个方程称为爱因斯坦光电效应方程．

爱因斯坦因成功地解释了光电效应的现象，获得了 1921 年度诺贝尔物理学奖．

方程表明光电子的最大初动能和入射光的频率成线性关系．方程还表明，当最大初动能等于零时，金属表面不再有光电子逸出，这时入射光的频率就是截止频率 ν_0，$\nu_0 = \frac{W}{h}$．

当光的强度增加时，光子数也增多，单位时间内吸收光子的电子数相应增加，单位时间内释放出的光电子数目亦将随之增加，这就很自然地说明了实验中光电流大小和光的强度之间的关系．

根据光的量子说，当光照射到金属上时，光子的全部能量将立刻被金属中的电子所吸收，不需要积累能量的时间，这也就自然地说明了为什么光电效应发生的时间极短．

1914 年，密立根用实验方法对光电效应方程进行了验证，并测出了 h 值约为 $6.57 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$，这与从普朗克辐射公式导出的 h 值非常接近，从而给光的量子说以有力的支持．

表 4-2-1　几种金属的截止频率和逸出功

金属	钨	钙	钠	钾	铷
截止频率 $\nu_0/10^{14}\ \mathrm{Hz}$	10.95	7.73	5.53	5.44	5.15
逸出功 W/eV	4.54	3.20	2.29	2.25	2.13

红限波长是指与截止频率相对应的波长．

【例题】一光电管的阴极用红限波长 $\lambda_0 = 500\ \mathrm{nm}$ 的钠制成，光电管阳极 A 和阴极 K 之间的电势差 $U = 2.1\ \mathrm{V}$，用波长 $\lambda = 300\ \mathrm{nm}$ 的紫外线射向阴极，则

（1）光电效应能否发生？

（2）若能发生光电效应，那么光电子的最大初动能是多少？

（3）光电子到达阳极时的最大动能是多少？

（4）如果电势差 U 不变，而照射光的强度增加到原来的 3 倍，此时光电子达到阳极的最大动能又是多少？

【分析】我们首先分析光电效应能否发生，如果能发生，我们可以根据金属钠的截止频率求出逸出功，然后利用光电效应方程求出光电子的最大初动能，再由动能定理求出电子到达阳极时的最大动能．

微信公众号：电子课本大全

【解】（1）根据 $c=\lambda v$ 知，阴极的截止频率为

$$v_0=\frac{c}{\lambda_0}=\frac{c}{500\ \text{nm}}$$

照射的紫外线频率为

$$v=\frac{c}{\lambda}=\frac{c}{300\ \text{nm}}$$

因为 $\lambda<\lambda_0$，故 $v>v_0$，所以光电效应可以发生.

（2）为了求出光电子的最大初动能，必须先求出逸出功 W，因为 $W=hv_0$，根据爱因斯坦光电效应方程，光电子的最大初动能为

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}mv_{\text{m}}^2&=hv-hv_0\\&=h\left(\frac{c}{\lambda}-\frac{c}{\lambda_0}\right)\\&=hc\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{1}{\lambda_0}\right)\\&=6.63\times10^{-34}\times3\times10^{8}\times\left(\frac{1}{3\times10^{-7}}-\frac{1}{5\times10^{-7}}\right)\text{J}\\&\approx2.65\times10^{-19}\text{J}\end{aligned}$$

（3）获得最大初动能的光电子经电场加速后到达阳极的动能最大. 根据动能定理，动能的增量等于电场力做的功，所以

$$eU=\frac{1}{2}mv_A^2-\frac{1}{2}mv_{\text{m}}^2$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}mv_A^2&=eU+\frac{1}{2}mv_{\text{m}}^2\\&=1.6\times10^{-19}\times2.1\,\text{J}+2.65\times10^{-19}\,\text{J}\\&\approx6.01\times10^{-19}\,\text{J}\end{aligned}$$

（4）因为照射光的频率不变，照射光强度的增加只会增加阴极 K 发射的光电子数，而不会增加光电子的初动能. 又由于电势差 U 不变，由（3）知光电子到达阳极时的最大动能也不会变. 故光强增加到原来的3倍后，电子到达阳极 A 时的最大动能仍为 6.01×10^{-19} J.

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 用一束红光照射在某种金属上不产生光电效应，如果用透镜把红光聚焦在该金属表面上，并经过相当时间，能否产生光电效应？为什么？

2. 用一定波长的光照射不同金属表面产生光电效应时，为什么逸出金属表面的光电子的速度大小不同？

3. 外界要做多少功才能使电子从钙的表面逸出？

4. 波长 $\lambda = 500$ nm 的蓝光照射到逸出功 $W = 1.9$ eV 的金属表面上，求：

（1）光子能量 ε；

（2）光电子最大初动能 $\frac{1}{2}mv_{\mathrm{m}}^2$；

（3）该金属的截止频率 ν_0.

3 光的波粒二象性

康普顿效应

1923 年，美国物理学家康普顿（Arthur Holly Compton，1892—1962）在研究 X 射线与物质散射实验时，证明了 X 射线的粒子性．在这个实验里起作用的不仅是光子的能量，而且还有它的动量．能量与动量是描述粒子行为的两个重要物理量，因此康普顿散射实验对光的量子说作了进一步肯定．

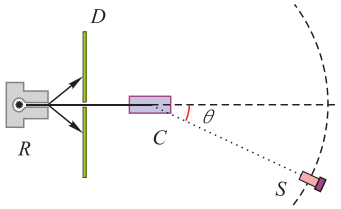


图 4-3-1　康普顿散射实验原理图

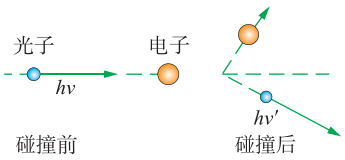


图 4-3-2　光子既有能量也有动量

实验原理如图 4-3-1 所示，X 射线源 R 发射出一束 X 射线，打在石墨晶体 C 上，我们用摄谱仪 S 探测不同方向上散射线的波长和强度．康普顿在实验中发现，X 射线被石墨散射后，沿不同方向的射线中，除原波长外，还发现了波长随散射角的增大而增大的谱线．X 射线经物质散射后波长变长的现象，称为**康普顿效应**（Compton effect）．

经典电磁波理论认为：当 X 射线通过石墨时，石墨中的带电粒子在射线的照射下做受迫振动，振荡着的带电粒子向外辐射的电磁波的频率应当与入射波频率相同，其波长与入

光子在介质中和物质微粒相互作用，使光的传播方向发生偏转，这种现象叫光的散射．

微信公众号：电子课本大全

射光的波长也应当一样，即X射线经物质散射后不会出现波长的改变．可见经典电磁波理论无法解释康普顿效应．

康普顿把光的散射看成是单个光子与单个电子发生的弹性碰撞过程，而在碰撞过程中能量与动量都是守恒的．由于反冲，电子会带走一部分能量与动量，因而散射出去的光子能量与动量都相应减小，即散射后的X射线波长增大．根据这种散射理论得到的结论与实验结果完全相符，这不仅进一步证实了爱因斯坦的光量子理论，也有力地证明了光具有波粒二象性，从而导致了量子理论的发展．康普顿效应还证明了光子和微观粒子的相互作用过程也严格遵循动量守恒定律和能量守恒定律．我国物理学家吴有训曾参加了康普顿散射的研究工作．

吴有训（1897—1977），于1921年在美国芝加哥大学留学，后任该大学物理研究室助手和讲师，对康普顿效应进行了系统研究．他的关于X射线在多原子气体中的散射研究，在理论上发展了康普顿的X射线散射效应．物理学界也把康普顿效应称为康普顿－吴效应．

光的波粒二象性

通过以上的讨论我们看到，光是一种既具有波动性又具有粒子性的微观客体．准确一点说，光具有波粒二象性，是波动性和粒子性的统一．在某些条件下，它的表现与经典物理学中的波动相似；在另一些条件下，它又表现得与经典物理学中的粒子相似．

光的波动性是指光的运动形态具有各种波动的共同特征，可以用波长、频率、相位、振幅等概念来描绘，其干涉、衍射和色散等现象都是波动性的表现．

光的粒子性是指光与其他物质相互作用时所交换的能量和动量具有不连续性，即光在与其他物质相互作用时，能量和动量是以一份一份的形式（光子的形式）进行交换的，而且每一份能量和动量都满足如下确定的关系：

$$\varepsilon = h\nu$$

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

以上两式把光体现粒子性的物理量（ε，p）与显示波动性的物理量（ν，λ）紧密地联系了起来．

光是一种概率波

为了对光的本性做进一步的考察与分析，物理学家在不

微信公众号：电子课本大全

断变化光强的情况下，进行了光的双缝干涉实验（图4-3-3）.

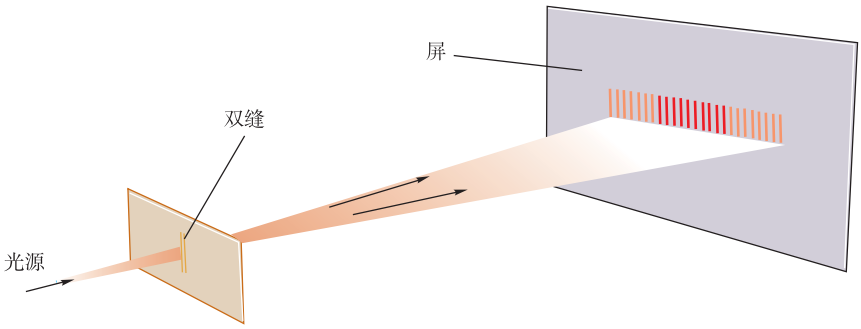


图 4-3-3　光的双缝干涉

把屏换成感光底片，改变光源的强度，使光源的强度由弱到强变化，并选取一个适当的感光时间. 结果，在感光底片上得到图4-3-4（a）（b）（c）所示三个不同的图像.（a）为光源很弱时得到的图像，与我们通常观察到的光的双缝干涉的图样相差很远.（b）为光源较弱时得到的图像，与我们通常观察到的光的双缝干涉的图样接近.（c）为光源较强时得到的图像，与我们通常观察到的光的双缝干涉的图样一样.

实验说明了以下几个结论.

（1）当光源很弱时，感光底片上的亮点显示出光与感光底片的作用是量子化的，光是作为一个个粒子落在感光底片上的. 当然每一个光子到底会落在哪一点是不确定的.

（2）当光源很强时，光与感光底片量子化的作用积累起来形成一种呈现波动特性的图像，这种波动性图像是一种统计性的结果.

（3）屏上亮纹的地方，表示到达的光子数多，也就意味着对每一个光子来说，落在亮纹处的概率较大；屏上暗纹的地方，到达的光子数少，意味着对每一个光子来说，落在此处的概率较小. 在这个意义上，可以称光波是一种概率波，即光波在某处的强度代表着光子在该处出现概率的大小.



（a）弱光　　（b）中光　　（c）强光

图 4-3-4　不同光强下光的双缝干涉实验结果

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 什么是康普顿效应？为什么说康普顿散射实验对光的量子说作了进一步的肯定？
2. 光子的能量、动量与光的频率、波长是用什么公式联系起来的？
3. 已知一光子的波长为 0.122 μm，求该光子的动量及能量.
4. 光子的频率为 4.27×10^{14} Hz，求该光子的动量及能量.
5. 已知一光子的能量为 1.77 eV，求该光子的频率及波长.
6. 光子的动量为 9.47×10^{-28} kg · m · s^{-1}，求该光子的频率及波长.

4 实物粒子的波粒二象性

德布罗意物质波假说



德布罗意
（De Broglie，1892—1987）

1924 年，法国年轻的物理学家德布罗意在光的波粒二象性的启发下，思考了这样一个问题：人们长期以来对光的研究，是否偏重于波动的图像而忽略了粒子图像，而在对实物的认识上发生了相反的错误，把粒子的图像想得太多，而过于忽视了波的图像？另外，德布罗意还注意到光的运动与实物粒子运动之间存在某些相似性. 在此基础上，他提出了一个大胆的假设：实物粒子像光子一样，也具有波粒二象性，可以引入波长、频率的概念，并且像光子一样，有如下关系式：

$$E = h\nu,\ p = \frac{h}{\lambda}$$

该式称为德布罗意关系式，与粒子相对应的波称为德布罗意波. 式中给出的波长称为德布罗意波长. 德布罗意的假说最初并未受到物理界的重视，爱因斯坦向来欣赏物理学中的对称性思考，当他读到德布罗意的论文时，对文中就物理学的两个客体（粒子与波）的对称思考很感兴趣，并给予了很高的评价，声称这是“揭开了大幕的一角”.

微信公众号：电子课本大全

德布罗意波的波长

一个实物粒子也具有波动性，根据德布罗意关系式可以计算出粒子的德布罗意波长．下面通过对电子和飞行的子弹的计算，使我们对德布罗意波长有一个“量”的认识及感受．

【例题】在某电子显像管中，电子以 5.0×10^6 m/s 的速度运动，求其德布罗意波长．

【解】已知 $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J·s，$v = 5.0 \times 10^6$ m/s，$m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg．

根据公式

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

得

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{6.63\times10^{-34}}{9.1\times10^{-31}\times5.0\times10^{6}}\ \text{m}\\ &\approx 1.5\times10^{-10}\ \text{m}\\ &= 0.15\ \text{nm}\end{aligned}$$

这与 X 射线的波长相当，可见一般实验中电子的德布罗意波长是很短的．

1929 年 11 月，德布罗意向巴黎大学理学院提交了一篇题为《量子理论的研究》的博士论文．在该文中，他提出了物质粒子具有波动性的假设．5 年后，他成为第一个因为学位论文而获得诺贝尔奖的人．

活动

计算质量为 0.02 kg，以速率 $v = 300$ m/s 飞行的子弹的德布罗意波长．

根据计算的结果，说一说宏观物体很难表现出波动性，而仅仅表现出粒子性的道理．

电子波动性的实验证实

从波的干涉、衍射原理中我们知道，在波的传播中只有波长和障碍物（或缝）的大小相差不多或波长大于障碍物（或缝）时，才能表现出明显的衍射现象．

通常条件下，电子的德布罗意波长的数量级是 0.1 nm，所以，要观测德布罗意波的干涉、衍射现象，必须要找到数量级为 0.1 nm 的狭缝．晶体的晶格刚好满足这个条件，以

微信公众号：电子课本大全

晶格作光栅应该能观察到电子的衍射现象.

最早从实验上证实电子衍射现象的是美国的戴维孙（Clinton Joseph Davisson）和他的合作者革末（Lester Halbert Germer）. 1926年他们做了电子束在晶体表面上散射的实验，观察到了和 X 射线衍射类似的电子衍射现象，首先证实了电子的波动性.

次年，G. P. 汤姆孙（George Paget Thomson，1892—1975）做了电子束穿过多晶薄膜的衍射实验，成功地得到了和 X 射线通过多晶薄膜后产生的衍射图样极为相似的衍射图像. 其实验装置如图 4-4-1 所示，当电子束自 K 发出，经加速电场 b 穿过一微薄晶片 M，再照射到屏 P 上时，在屏上显示出有规律的衍射花纹. 图 4-4-2 是一幅波长相同的 X 射线和电子束衍射图样对比图，从图可以看出，电子和 X 射线一样，也具有波动的性质. 根据衍射图样测出的一些数据计算，电子波的波长完全符合德布罗意关系式. 图 4-4-3 给出了电子束和光束被边缘齐整的障碍物部分遮挡后在摄影胶片上形成的衍射条纹，更可以看出电子的波动性.

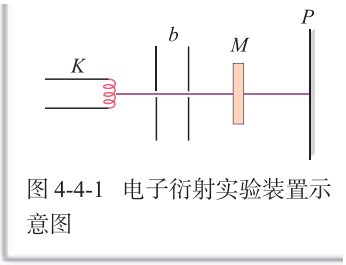


图 4-4-1　电子衍射实验装置示意图

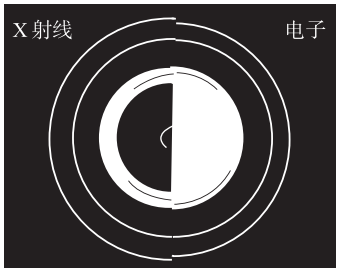


图4-4-2　电子衍射与X射线衍射图样比较

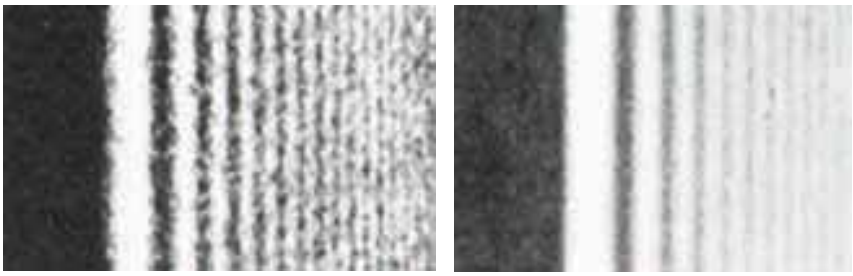

（a）电子的衍射条纹　　（b）光的衍射条纹

图 4-4-3

电子既然具有波动性质，人们自然会联想到原子、分子和中子等微观粒子是否也同样具有波动性质. 实验相继证实，这些微观粒子也同样会发生干涉、衍射现象，都具有波动性质，德布罗意关系式也仍然成立（本章首页上就是氦原子的双缝干涉图像）. 现在，德布罗意关系式已成为表示电子、中子、质子、原子和分子等微观粒子的波动性和粒子性之间关系的基本公式.

● 氢原子中的电子云

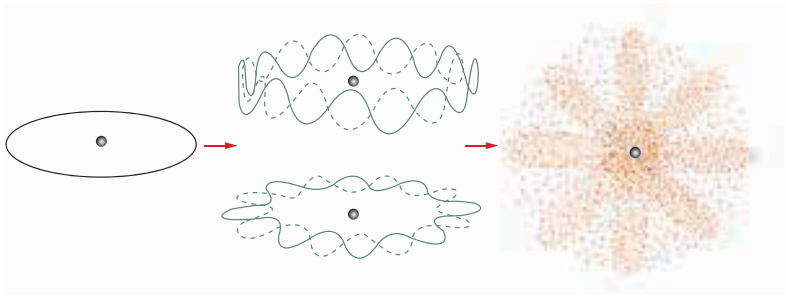
如同光波是概率波一样，与实物微粒对应的波也是一种概率波. 根据这种概率波的性质，说电子在原子中的

微信公众号：电子课本大全

“轨道”上运行是没有意义的．我们能知道的只是当原子处于不同的状态时，电子在原子核周围各处出现的概率大小．

在氢原子中，电子在原子核周围出现的概率密度（出现在某处单位体积中的概率大小）分布的情况就被形象化地叫做电子云．

我们可以设想氢原子中的电子是一个沾满油彩的小球，它在空间运动的过程中，概率密度大（小）的地方，电子运动到那里的机会就多（少），在那些地方涂上的油彩就“厚”（“薄”）一些；而在概率密度为零的地方，就不会沾上油彩．如此可以清楚地“看”到这样一种情景，宛如在氢原子核的周围，呈现了反映电子在空间概率分布的“云”（图 4-4-4）．不过，这种“电子云”是对电子运动的一种形象化的比喻，绝不是说电子本身像一朵云一样，在空间弥散开．

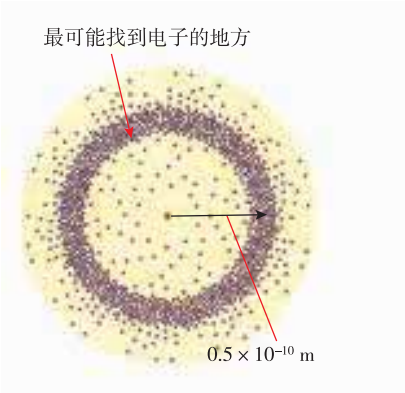


原子行星模型（核式结构模型）　　根据德布罗意电子绕核“波动”的思想画出的原子图像　　量子理论完成的反映电子在整个空间概率分布的电子云模型

图 4-4-5　原子模型的演变



（a）电子在三维空间中出现的概率分布示意图



（b）这是描述电子在空间出现的概率的“电子云”的示意图，基态氢原子中的电子出现在距核 0.5×10^{-10} m 处的概率最大

图 4-4-4　电子云示意图

练习与评价

1．一个质量 $m = 1$ g，速度 $v = 10$ m/s 的运动小球，它的德布罗意波长是多少？为什么观察不到这种小球的波动性？

2．求速度为 5×10^3 km/s 的 α 粒子的德布罗意波长．（取 α 粒子质量 $m_\alpha = 6.68 \times 10^{-27}$ kg）

3．计算初速度为零的电子，经过 $U = 1$ kV 的电压加速后的德布罗意波长．

微信公众号：电子课本大全

发展空间

物理在线

图 4-4-6 为 C_{60} 分子的双缝干涉示意图．一束 C_{60} 分子从左射向双缝装置，在 C_{60} 行进途中，显示出其波动性（如图中部所示），但在被观测时（如图右侧所示）记录下的是一个一个的 C_{60} 分子（像一个个“小足球”）．C_{60} 是一个复杂的“大”分子，在它经过双缝装置时，人们不能判定 C_{60} 分子是从哪一条缝穿过的．

C_{60} 分子的双缝干涉实验结果证明，在一定条件下，分子也会像光波一样表现出波动性．



图 4-4-6 C_{60} 分子的双缝干涉示意图
［此图取自 A.I.M.Rae，Nature，401（1999），651.］

5 不确定关系

在经典物理学中，质点在任意时刻都有确定的位置和动量，从而运动沿着一定的轨道，而波动是弥散的，无位置、动量和轨道可言．在量子力学中，微观粒子不仅具有粒子性，而且还具有波动性，那么，在任一时刻微观粒子还有位置、动量可言吗？这两种理论的描述会有多大区别？两者之间又怎样统一呢？



海森堡
（Werner Heisenberg，1901—1976）

海森堡是德国理论物理学家，量子力学的创始人之一．他提出了著名的不确定关系，成为量子力学的一个基本原理．

不确定关系的提出

最早对上述问题进行认真思考的是德国物理学家海森堡．让他感到困惑的是既然量子力学中粒子的运动是无轨道可言的，那么为什么电子在云室（显示带电粒子径迹的仪器）中的运动还会留下径迹呢？后来，他领悟到，云室中的径迹实质上是一串凝结的小水珠，这些水珠要比电子大得多，自然不能是电子的准确位置．这也就是说，“径迹”不可能精确地表示经典意义下电子的运动轨迹，它只能是对电子位置近似的、模糊的显示，表示电子在运动过程中的一个不确定范围．他由此设想粒子的位置坐标与动量的

微信公众号：电子课本大全

不确定范围是否满足一定的关系，而且这个关系与已有量子理论又不发生矛盾.

1927年，海森堡提出，同时确定粒子的动量和位置时，两者的精确度有一个原则上的限制，其数学表达式称为不确定关系．作为一维运动的微观粒子，不确定关系是

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geqslant \frac{h}{4\pi}$$

它的意义在于：粒子在某一方向上位置的不确定量和在这方向上动量的不确定量的乘积将大于或等于$\frac{h}{4\pi}$．也就是说，在我们测定粒子的坐标越准确（Δx越小）的同时，测定粒子在这坐标方向上动量分量的准确度就越差（Δp_x越大）；反之在我们对粒子的动量知道得越准确（Δp_x越小）的同时，粒子的位置知道得就越不准确（Δx越大）．或者说，微观粒子同时具有确定的位置和动量是永远不会得到实验验证的.

这是由微观粒子的本性（即波粒二象性）决定的，是量子力学中极为重要的关系式，也是一个在量子世界里粒子运动不可逾越的界限.

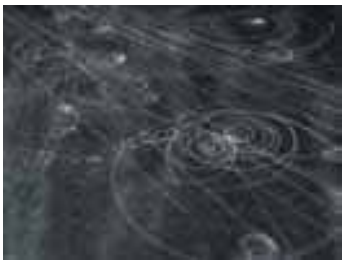


图 4-5-1　云室中粒子的运动径迹

● 不确定关系在微观世界与宏观世界中的不同作用

实际上，不确定量（偏差）是一个普通的概念，通常也可以与量子理论没有什么关系．比如，你沿百米跑道跑了100 m，多跑或少跑了 1 m，那你的位置不确定量便是Δx = 1 m．如果位置的不确定量是 100 m，那么你在百米运动中的位置就完全不确定了．又比如看一下汽车上的速度计，读出其值为100 km/h，由于指针晃动，可能会多了或少了 1 km/h，那么车的速率的不确定量就是Δv = 1 km/h．如果车的速度不确定量也是 100 km/h，再说这辆车的速度就没有什么意义了．这好像一名学生说自己的考试成绩在 0 ~ 100之间（百分制）一样没有任何意义．现在，我们用两个具体例子，来进一步理解不确定关系.

一个例子是原子中的电子.我们知道，原子线度的数量级约为 10^{-10} m，因此在原子中电子位置的不确定量最大是$\Delta x \approx 10^{-10}$ m，那么原子中电子的速度的不确定量按不确定关系式估计为

微信公众号：电子课本大全

$$\Delta v_x = \frac{\Delta p_x}{m} \geqslant \frac{\dfrac{h}{4\pi}}{m\Delta x} = \frac{6.63\times10^{-34}}{4\pi\times9\times10^{-31}\times10^{-10}}\ \text{m/s}$$
$$\approx \frac{7.37\times10^{6}}{4\pi}\ \text{m/s}$$
$$= 5.9\times10^{5}\ \text{m/s}$$

但是按经典力学的计算，氢原子中电子在轨道上的速度 v 约为 10^6 m/s，与 Δv_x 数量级相同．可见，对在原子范围内运动的电子，运动电子的速度是完全不确定的，说电子有多大速度将没有任何意义．这是因为此时电子的波动性非常显著，描述电子的运动必须抛弃在经典力学中适用的轨道概念，而应代之以说明电子在空间概率分布的电子云图像．

另一个例子是一颗质量为 10 g 的子弹，以 500 m/s 的速度射出，如果其动量的不确定量为 5×10^{-5} kg·m/s（这时子弹速度的偏差只有原速度的万分之一），而对应子弹位置的不确定量为

$$\Delta x \geqslant \frac{\dfrac{h}{4\pi}}{\Delta p} = \frac{6.63\times10^{-34}}{4\pi\times5\times10^{-5}}\ \text{m}$$
$$\approx \frac{1.33\times10^{-29}}{4\pi}\ \text{m} = 1.1\times10^{-30}\ \text{m}$$

以目前的技术水平来说，根本无法测定这样小的线度．同时这个偏差与子弹的线度（约 10^{-2} m）相比，也完全可以略去不计．从这个例子可以看出，一个宏观运动的物体（如子弹、人、车等）也有其对应的德布罗意波长，也存在不确定关系，不过这种波动性人们根本无法察觉到．因此，我们在以宏观世界为研究对象学习和研究经典物理学时，就可以完全不涉及实物粒子的波动性．不确定关系是对物体在多大程度上要考察其波动性作了最精确的概括．

● 人类对物质世界的认识不断深化

在 20 世纪以前，人类的认识主要局限在宏观世界．在宏观世界里，粒子与波是分离的，粒子就是粒子，是凝聚在空间某处的一个客体；波就是波，是弥散在空间的一种物质运动形态．在人们的直接经验中，这是两个完全对立的图

微信公众号：电子课本大全

像，很难建立起既具有粒子性又具有波动性的统一物理图像来.

然而，随着人类的认识逐渐深入到微观世界，通过实验及理论两个方面相互配合的探索发现，微观粒子（光子、电子、中子、质子等）都具有波粒二象性，但既不是经典的粒子（经典粒子沿轨道运动），也不是经典的波（经典波的能量是连续变化的）. 微观粒子的波粒二象性体现在它们在不同情况下所表现的行为，体现在它们可以用德布罗意关系式来描述. 人们认识到，只有用波粒二象性的观点，才能对有关物理现象（如光电效应、康普顿效应、电子衍射、原子光谱等）作出合理的解释.

在揭示了微观世界波粒二象性的基础上，物理学家建立起了研究微观领域内物质运动基本规律的量子力学及量子电动力学等理论，这些成就标志着人类对微观世界认识已到达一个崭新的阶段，并引发催生了20世纪高新技术，如信息技术、生物技术、新材料技术、激光技术、纳米技术等的蓬勃发展.

表4-5-1给出了人类对波粒二象性认识过程中有关的重大事件，从中可以看到人类对世界的探究与认识不断深化的重要片段.

表4-5-1　人类对波粒二象性认识过程中的重大事件

年代	代表人物	事　件	评价或意义
1895	伦琴	发现X射线	X射线、放射性、电子的发现，突破了原子不可再分的传统观点，揭开了人类认识微观世界的序幕
1896	贝克勒尔	发现铀的放射性	
1897	J.J.汤姆孙	发现电子	
1898	居里夫妇	发现放射性元素镭和钋	
1900	普朗克	提出能量子概念	量子论诞生的标志
1905	爱因斯坦	提出光量子概念，成功地解释了光电效应	首次提出光的二象性，刷新了对光的本性的认识
1911	卢瑟福	提出原子的核式模型	为把量子论引入原子结构问题奠定了基础
1913	玻尔	建立原子结构的量子理论	首次把量子论应用在原子结构问题上
1923	康普顿	发现并解释康普顿效应	进一步发展了对光的二象性认识
1924	德布罗意	提出电子具有二象性假设	首次提出实物微粒的二象性
1925	海森堡	矩阵力学诞生	提出了矩阵形式的量子方程
1926	薛定谔	建立量子力学的一种形态——波动力学	寻找到微粒二象性的运动规律
1926	波恩	波函数的统计解释	对二象性作统计解释
1927	戴维孙、革末 G.P.汤姆孙	观测到电子衍射现象	证实了德布罗意波的存在
1927	海森堡	提出不确定关系	揭示了微观粒子与宏观物体的联系和区别

微信公众号：电子课本大全

练习与评价

1. 已知电子位置的不确定量 $\Delta d = 0.1\ \text{nm}$，试求出速度的不确定量.（电子质量取 $m_e = 9.1 \times 10^{-31}\ \text{kg}$）

2. 一颗质量为 10 g 的子弹，速度为 200 m/s，如其动量的不确定量为 0.01%，求其位置的不确定量. 这个不确定量能通过实验观察出来吗?

3. 如何理解不确定关系是波粒二象性的必然结果?

发展空间

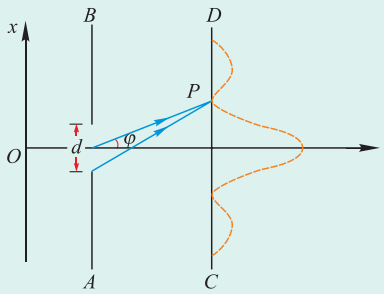
课外阅览

海森堡的一个理想实验

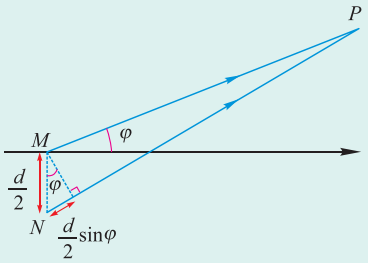
不确定关系是海森堡根据对一些理想实验的分析及德布罗意关系得出的，其中一个理想实验是常被人们引用的电子单缝衍射实验. 如图 4-5-2 所示，设有一束动量为 p 的电子，以速度 v 从 O 点射向 AB 屏上的狭缝，狭缝宽度为 d，由于电子的波动性，在屏幕 CD 上将观察到衍射图样. 如果只考虑第一级极小（“暗条纹”），根据波的衍射理论，射向 P 点两束电子的路程差（参见《物理 选修 3-4》第五章）$\frac{d}{2}\sin\varphi$ 应等于半个波长 $\frac{\lambda}{2}$，因此可得

$$\sin\varphi = \frac{\lambda}{d}$$

其中 λ 就是电子束的德布罗意波长.



（a）



（b）

图 4-5-2 从电子的单缝衍射说明不确定关系

让我们考虑一个电子通过狭缝瞬时的位置和动量. 对一个电子来说，我们不能确定地说它是从缝中的哪一点通过的，而只能说它是从宽为 d 的缝中通过的，因此它在 x 方向上位置的不确定量就是 d，即有

$$\Delta x = d$$

由于电子动量的大小在通过狭缝前后不会发生变化，因此出射电子动量的 x 方向分量 p_x 只决定于它的出射角 φ，如果认为电子都落在中央条纹内，根据动量的矢量合成，则一个电子在通过狭缝时 x 方向的动量分量 p_x 应满足不等式

$$0 \leqslant p_x \leqslant p\sin\varphi$$

这表明，一个电子通过狭缝时在 x 方向上的动量不确定量为

$$\Delta p_x = p\sin\varphi$$

微信公众号：电子课本大全

考虑到衍射条纹的次级极大（指其他“亮条纹”），电子还可以落到中央条纹以外的地方，所以

$$\Delta p_x \geqslant p\sin\varphi$$

应用德布罗意关系式，将 $p=\frac{h}{\lambda}$ 代入上式，得

$$\Delta p_x \geqslant \frac{h}{\lambda}\sin\varphi$$

代入式 $\sin\varphi=\frac{\lambda}{d}$ 和式 $\Delta x = d$，则有

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geqslant h$$

更为一般的理论给出

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geqslant \frac{h}{4\pi}$$

本章小结

1. **普朗克的能量子假说**　能量只能取不连续的值 $\varepsilon = nh\nu$，n 取 1，2，3，……

2. **爱因斯坦对光电效应的解释**　爱因斯坦发展了普朗克的假说，引入了光量子（$\varepsilon = h\nu$）的概念，建立光电效应方程 $h\nu=\frac{1}{2}mv^2+W$，以解释光电效应现象.

3. **康普顿效应**　X射线通过物质散射后波长变长的现象，称为康普顿效应. 利用光的波粒二象性（$\varepsilon=h\nu$，$p=\frac{h}{\lambda}$）及光在与其他物质相互作用过程中的能量守恒、动量守恒，可对康普顿效应作出解释.

4. **光的波粒二象性**　实验表明光在传播过程中，如干涉、衍射中显示出波动性；而在与物质的相互作用中，如康普顿散射、光电效应中表现出粒子性. 光的本质是波动性和粒子性的统一，称为光的波粒二象性. 光是一种概率波.

5. **德布罗意假说**　电子等实物微粒像光子一样也具有波粒二象性. 德布罗意波的波长由 $\lambda=\frac{h}{p}$ 确定. 氢原子中电子在各处出现的概率可形象地用“电子云”来表示.

6. **不确定关系**　如果以 Δx 表示粒子在 x 方向上的位置不确定量，以 Δp_x 表示相应的动量不确定量，那么

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geqslant \frac{h}{4\pi}$$

微信公众号：电子课本大全

习　题

1．人体也向外不断地发生热辐射，为什么在黑暗中还是看不见人呢？

2．白天看远处的房间的窗口都是黑的，为什么？如何来理解“黑暗”？

3．若一个电子和一个质子具有相同的动能，哪个粒子的德布罗意波长较长？

4．铝的逸出功是 4.2 eV，今用波长为 200 nm 的光照射铝表面，求：

（1）逸出光电子的最大动能；

（2）铝的截止频率．

5．求钨的光电效应截止频率及红限波长．

6．频率为 6.67×10^{14} Hz 的单色光入射到逸出功为 2.46 eV 的钠（Na）表面上．

（1）求光电子的最大初动能；

（2）若采用如图 4-2-2 所示的装置，钠金属作为其阴极，在 A、K 之间施加多大的电压才能使电流降为零？

7．一电子显微镜的加速电压为 40 kV，经过这一电压加速的电子的德布罗意波长是多少？

8．证明 $\frac{h}{p}$ 具有长度的单位．（式中 h 为普朗克常量，p 是动量）

9．一个电子、一个质子和一个铅（Pb）原子具有相同的速率 $v = 2.0 \times 10^6$ m/s，求每个粒子的德布罗意波长．

10．一个电子、一个质子和一个铅（Pb）原子具有相同的德布罗意波长 $\lambda = 280$ pm，求这三个粒子的能量．

11．计算质量 $m = 0.1$ mg 的尘埃，速度 $v = 1$ m/s 时，其德布罗意波长是多少？

12．一个 5 g 的玻璃球沿 x 轴运动，速率值为 $v_x = 1$ m/s，假设通过认真地测量，动量的精确度（不确定量在测量平均值中所占的比例）为 10^{-6}，则动量的偏差 Δp_x 等于多少？由不确定关系得出的位置偏差的下限为多少？这个偏差对玻璃球位置的确定还有没有实际意义？

13．用不确定关系估算氢原子中一个电子的动能．（估算中：$\Delta x = a_0 = 0.053$ nm，Δp_x 作为动量大小 p 的平均值，动能 $E_k = \frac{p^2}{2m}$）

14．一电子沿 x 方向运动，速度 $v_x = 500$ m/s．已知其精确度为 0.01%，求电子 x 坐标所能达到的最大精确度．

15．一个光子沿 x 轴运动，波长为 500 nm，其不准确度只有 $\Delta\lambda = 5 \times 10^{-8}$ nm．求该光子 x 方向坐标的不确定量．

16．如果某粒子位置的不确定量等于它的德布罗意波长，该粒子动量的不确定量为多少？

微信公众号：电子课本大全

附 录

中英文索引

（名词后面的数字是它第一次出现的页码）

B

比荷　specific charge　21

比结合能　specific binding energy　50

D

电子　electron　21

定态　stationary state　30

动量　momentum　6

动量守恒定律　law of conservation of momentum　7

F

发射光谱　emission spectrum　27

放射性衰变　radioactive decay　41

非弹性碰撞　inelastic collision　4

G

光电效应　photoelectric effect　71

光谱　spectrum　26

光谱分析　spectral analysis　27

光子　photon　72

H

核反应　nuclear reaction　38

核反应堆　nuclear reactor　54

核聚变　nuclear fusion　56

核力　nuclear force　37

核子　nucleon　36

黑体　blackbody　68

黑体辐射　blackbody radiation　69

J

激发态　excited state　31

基态　ground state　31

结合能　binding energy　48

截止频率　cutoff frequency　71

K

康普顿效应　Compton effect　75

L

里德伯常量　Rydberg constant　29

链式反应　chain reaction　53

连续光谱　continuous spectrum　26

量子数　quantum number　30

临界体积　critical volume　53

N

能级　energy level　31

能量子　quantum of energy　70

P

碰撞　collision　2

普朗克常量　Planck constant　70

R

热辐射　heat radiation　68

热核反应　thermonuclear reaction　57

T

弹性碰撞　elastic collision　4

同位素　isotope　37

W

完全非弹性碰撞　perfect inelastic collision　4

X

吸收光谱　absorption spectrum　27

线状谱　line spectrum　27

Y

阴极射线　cathode ray　20

原子光谱　atomic spectrum　27

Z

质量亏损　mass defect　48

质子　proton　36

中子　neutron　36

微信公众号：电子课本大全