



中学物理教材编写组

普通高中课程标准实验教科书

# 物理

---

# PHYSICS

(选修 3—5)



山东科学技术出版社

# 目录

# MULU

## 第1章 动量守恒研究

导 入 从天体到微粒的碰撞 .....	2
第1节 动量定理 .....	3
第2节 动量守恒定律 .....	9
第3节 科学探究—— 一维弹性碰撞 .....	17

## 第2章 原子结构

导 入 从一幅图片说起 .....	22
第1节 电子的发现与汤姆孙模型 .....	23
第2节 原子的核式结构模型 .....	28
第3节 玻尔的原子模型 .....	32
第4节 氢原子光谱与能级结构 .....	37

专题探究 动量与原子的实验与调研 41



## 第3章 原子核与放射性

导 入 打开原子核物理的大门 .....	44
第1节 原子核结构 .....	45
第2节 原子核衰变及半衰期 .....	49
第3节 放射性的应用与防护 .....	55

## 第4章 核能

导 入 熟悉而又陌生的核能 .....	61
第1节 核力与核能 .....	62
第2节 核裂变 .....	66
第3节 核聚变 .....	71
第4节 核能的利用与环境保护 .....	75

专题探究 原子核和核能利用的实验与调研 ..... 79

## 第5章 波与粒子

导 入 奇异的微观世界 .....	82
第1节 光电效应 .....	83
第2节 康普顿效应 .....	89
第3节 实物粒子的波粒二象性 .....	92
第4节 “基本粒子”与恒星演化 .....	98

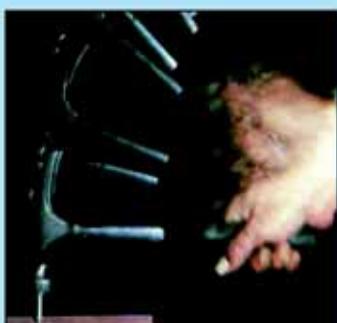
专题探究 波粒二象性的实验与调研 ..... 103



# 第1章

## 动量守恒研究

- 导入 从天体到微粒的碰撞
- 第1节 动量定理
- 第2节 动量守恒定律
- 第3节 科学探究——一维弹性碰撞



# 导入

## 从天体到微粒的碰撞

1994年7月，“舒梅克—列维”9号彗星的碎片与木星发生了猛烈碰撞。碰撞产生的爆炸相当于成千上万颗原子弹爆炸的威力，在木星上留下的“伤痕”几乎达到地球大小。这次宇宙天体间的碰撞震撼了地球人。

天体间的碰撞惊心动魄。相比之下，微观粒子间的碰撞多数情况下显得悄无声息。图1-2中的分叉是 $\alpha$ 粒子与氮原子核碰撞的径迹。人们正是通过对这种微观粒子碰撞的研究，发现了质子、中子和中微子等基本粒子，使我们对微观世界的认识不断深入。

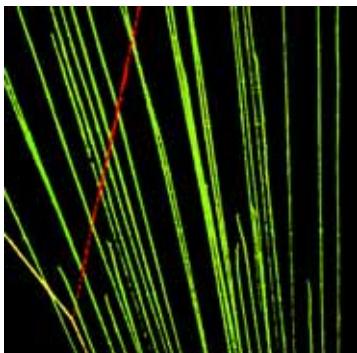


图1-2  $\alpha$ 粒子与氮原子核碰撞的径迹



图1-1 “舒梅克—列维”9号彗星碎片与木星发生猛烈碰撞

自然界的碰撞随处可见。大至宇宙天体，小至我们周围的物体，乃至微观粒子，都在频繁地发生着碰撞。碰撞有什么规律呢？天体的碰撞、我们身边物体的碰撞以及微观粒子的碰撞是否相同？本章我们将探讨这些问题。

### 本章 要求

- 通过实验，理解动量和动量守恒定律。能用动量守恒定律定量分析一维碰撞问题。知道动量守恒定律的普遍意义。
- 通过物理学中的守恒定律，体会自然界的和谐与统一。
- 探究物体弹性碰撞的一些特点。知道弹性碰撞和非弹性碰撞。

# 第1节 动量定理

## 1. 动量

实践经验告诉我们，当大卡车与轿车以相同的速度行驶时，大卡车比轿车停下来更困难。同样，质量相同的两辆汽车以不同的速度行驶时，速度大的汽车比速度小的汽车停下来更困难（图 1-3）。物理学中用动量描述这一运动特性。**动量** (momentum) 等于运动物体的质量和速度的乘积，通常用符号  $p$  表示

$$p = mv$$



图 1-3 汽车的质量和速度都会影响刹车效果

在国际单位制中，质量  $m$  的单位是 kg，速度  $v$  的单位是 m/s，动量的单位是 kg · m/s。动量是矢量，它的方向与物体运动速度的方向相同。

设运动物体的质量  $m$  不改变，物体的运动速度由  $v_1$  变化为  $v_2$ ，该物体动量的变化量为

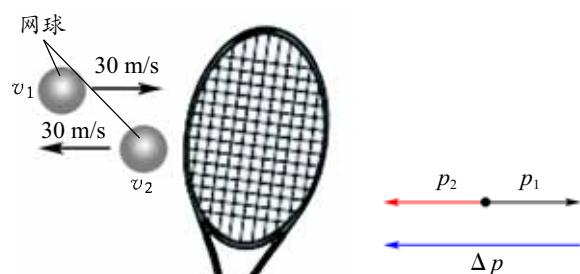
$$\Delta p = mv_2 - mv_1$$

下面我们通过例题进一步认识物体的动量和动量的变化量。



一个质量 50 g 的网球以 30 m/s 的速率水平向右飞行，又以 30 m/s 的速率被水平打回（图 1-4）。试求：

- (1) 打回前球的动量。
- (2) 打回后球的动量。
- (3) 该球打回前后动量的变化量。



**解** 网球被打回前后的运动都在水平方向，选取水平向右的方向为正方向。

图 1-4 击打网球

## (1) 打回前球的动量

$$p_1 = mv_1 = 0.05 \times 30 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 1.5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

动量的方向与正方向相同，水平向右。

## (2) 打回后球的动量

$$p_2 = mv_2 = -0.05 \times 30 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = -1.5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

负号表示动量的方向与正方向相反，水平向左。

## (3) 打回前后动量的变化量

$$\Delta p = p_2 - p_1 = (-1.5 - 1.5) \text{ kg} \cdot \text{m/s} = -3.0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$\Delta p$ 为负值，表示其方向与规定的正方向相反，即打回前后动量变化量的方向水平向左。

## 2. 动量定理

由以上例题可知，网球运动员击球时，球拍的作用力使网球的动量发生了变化。在生活中，使物体动量发生变化的现象随处可见。例如，当我们挥动锤子敲击钉子时（图1-5），锤子对钉子的作用力使钉子进入木板，钉子对锤子的反作用力使锤子的速度发生变化，也就是锤子的动量发生了变化。物体动量的变化与哪些因素有关呢？

从上面的实例分析可知，物体动量的变化显然与该物体受的力有关。物体动量的变化还与其他因素有关吗？对于一个质量不变的物体，动量的变化实际上就是速度的变化，而物体速度的变化除了与物体受的力有关外，还与力作用于物体的时间有关。例如，火车出站，若牵引力小，需要较长的时间才能达到正常的行驶速度；若牵引力大，则只要很短的时间便可达到正常的行驶速度。下面我们来推导物体动量的变化量与作用力和时间的定量关系。

设一个质量为 $m$ 的物体，初速度为 $v_1$ ，初动量为 $p_1 = mv_1$ ，在合力 $F$ 的作用下，经过一段时间 $t$ ，速度变为 $v_2$ ，末动量 $p_2 = mv_2$ （图1-6）。物体的加速度

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t}$$

代入牛顿第二定律得

$$F = ma = m \frac{v_2 - v_1}{t}$$

上式变形得

$$Ft = mv_2 - mv_1$$



图1-5 锤子的动量发生了变化

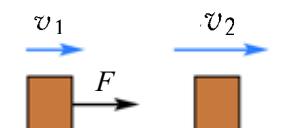


图1-6 速度变化，物体动量变化



物体动量的变化量既与受到的力有关，又与该力的作用时间有关。在物理学中，**力和力的作用时间的乘积叫做这个力的冲量**，简称**冲量** ( impulse )，通常用符号  $I$  表示

$$I = F t$$

冲量也是矢量，它的方向与力的方向相同。在国际单位制中，冲量的单位是  $\text{N} \cdot \text{s}$ 。

冲量的表达式可以写成

$$I = \Delta p$$

由上式可见，**物体所受合外力的冲量等于物体的动量变化**。这个结论叫做**动量定理** ( theorem of momentum )。由动量定理可得

$$F = \frac{m v_2 - m v_1}{t}$$

该式表明，作用在物体上的合外力等于物体动量的变化率，这实际上是牛顿第二定律的另一种表述。从该式可以看出，当物体动量的变化量一定时，力作用时间越短，作用力越大；力作用时间越长，作用力越小。

### 例题

一个质量为  $60 \text{ kg}$  的男孩从高处跳下，以  $5 \text{ m/s}$  的速度竖直落地。

(1) 男孩落地时曲膝，用了  $1 \text{ s}$  停下来，求落地时受到的平均作用力。

(2) 假如他落地时没有曲膝，只用了  $0.1 \text{ s}$  就停下来，求落地时受到的平均作用力。

(取  $g = 10 \text{ m/s}^2$ )

**解** (1) 分析男孩落地时的受力情况：重力  $G$  方向向下，地面对他的作用力  $N$  方向竖直向上 (图 1-7)。选向上的方向为正，落地时速度  $v_1 = -5 \text{ m/s}$ ，落地后的速度  $v_2 = 0$ ，这一过程经历的时间  $t = 1 \text{ s}$ 。由动量定理得

$$(N - mg)t = mv_2 - mv_1 = -mv_1$$

地面对他的平均作用力

$$N = -\frac{mv_1}{t} + mg = \left( \frac{60 \times 5}{1} + 60 \times 10 \right) \text{ N} = 900 \text{ N}$$

(2) 从男孩触地到其速度为零，经历的时间  $t' = 0.1 \text{ s}$ ，则

$$(N' - mg)t' = mv_2 - mv_1 = -mv_1$$

地面对他的平均作用力

$$N' = -\frac{mv_1}{t'} + mg = \left( \frac{60 \times 5}{0.1} + 60 \times 10 \right) \text{ N} = 3600 \text{ N}$$

可见，人从高处跳下时，要尽量延长触地后的缓冲时间，以减小地面对人的作用力。

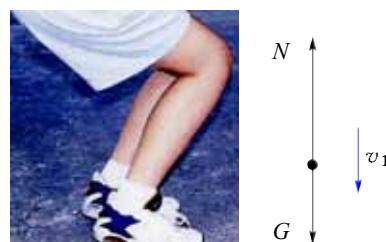


图 1-7 曲膝落地受力分析

### 3. 碰撞与缓冲的实例分析

自然界的碰撞随处可见。利用碰撞时产生的强大冲力可以对外做功。例如，冲床冲压工件时，冲头所受的重力、连杆对冲头的压力以及工件对冲头的作用力使冲头的动量改变，冲头与工件的碰撞时间很短，在冲头与工件间产生很大的作用力，冲压工件就是利用了这种作用力（图1-8）。

在研究微观粒子的碰撞时，粒子的质量很小，为了使粒子具有足够大的动量以轰击其他粒子，人们利用加速器将粒子加速，使粒子获得很大的动量（图1-9）。



图1-8 冲床



图1-9 斯坦福的直线加速器的外景

在很多情况下，需要避免碰撞。例如，驾驶汽车一定要控制行驶速度，如果行驶速度太大，汽车的动量会很大，驾驶员很难在短时间内刹住汽车，就有可能出现撞车、撞人等恶性交通事故（图1-10）。为保证驾乘人员的安全，车内人员都必须系上安全带，有的汽车在相关部位还装了安全气囊。这些设施可以起缓冲作用（延长作用力的作用时间），减轻交通事故对车内人员的伤害（图1-11）。



图1-10 汽车相撞造成的恶性交通事故



图1-11 安全带与安全气囊能减轻交通事故对车内人员的伤害



## 信息窗

### 《道路交通安全法实施条例》部分内容

为保证行车安全，我国制定了《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》。该条例对不同车型有不同的最高车速限制：在高速公路上行驶的小型载客汽车最高车速不得超过120 km/h，其他机动车不得超过100 km/h，摩托车不得超过80 km/h。

机动车在高速公路上行驶，车速超过100 km/h时，应当与同车道前车保持100 m以上的距离，车速低于100 km/h时，与同车道前车距离可以适当缩短，但最小距离不得小于50 m。

该条例还规定，当实际道路限速标志标明的车速与条例中关于车道行驶车速的规定不一致时，应按照实际道路限速标志标明的车速行驶（图1-12）。



图1-12 道路上的限速标志



## 迷你实验室

### 鸡蛋怎样才不会破

鸡蛋从高处落到地面上坚硬的盘子里会被打破。若在地面垫一块较厚的软垫（如枕头），再将鸡蛋举到同一高度让它落到软垫上，鸡蛋会不会被打破（图1-13）？与同学讨论实验结果及改进建议。（此实验可用其他物品代替）

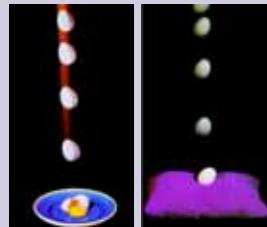


图1-13 “破”与“不破”的诀窍

## 作业

- 以相等大小的速度分别向竖直和水平方向抛出两个质量相等的物体，抛出时两个物体的动量是否相同？动能是否相同？
- 机动车在高速公路上行驶，车速越大时，与同车道前车保持的距离也应越大。请用动量定理解释这样做的理由。
- 有些运动鞋底有空气软垫（如图所示），请用动量定理解释空气软垫的功能。



（第3题）

4. 如图所示，运动员接篮球时为什么手臂都有弯曲动作？
5. 如图所示，质量为 50 kg 的人在一条质量为 200 kg 的小船上由船头走向船尾。若人相对于河岸的速度大小为 2 m/s，小船后退的速度大小为 0.5 m/s。求人和船的总动量。
6. 在围绕地球的轨道上大约有 8 000 块线度大于 10 cm 的太空垃圾在运行，给航天器带来了严重威胁。题图是一片线度为 0.2 mm 的漆块在航天飞机舷窗上砸出的一个直径 4 mm 的小坑。为什么质量很小的漆块能在坚硬的航天飞机舷窗上砸出一个坑呢？



(第4题)



(第5题)



(第6题)

7. 容器内气体分子运动的平均速率为  $v$ ，分子的质量为  $m$ ，若某分子以平均速率垂直撞击容器壁后以原来的速率被反弹回来，撞击器壁过程经历的时间为  $t$ ，求分子对器壁的平均作用力。
8. 以 10 m/s 的速度竖直向上抛出的小球，落地时的速度大小为 20 m/s，试用动量定理求小球在空中运动的时间。（不计空气阻力）



## 第2节 动量守恒定律

### 1. 动量守恒吗

两头发怒的公羊以一定的速度奔向对方并撞在一起(图1-14),它们碰撞前后的动量守恒吗?

两个穿滑冰鞋的小孩静止在滑冰场上,不论谁推谁,两人都会向相反方向滑去(图1-15)。在互相推动前,两人的动量都为零;由于推力作用,每个人的动量都发生了变化。那么,他们的总动量在推动前后是否也发生了变化呢?



图1-14 两公羊相抵,动量守恒吗



图1-15 滑冰的小孩互相推动时动量守恒吗

下面,我们通过实验探究动量是否守恒。

#### 实验与探究

两个质量相等的滑块装上相同的挡光板,放在气垫导轨的中部。将两滑块靠在一起,压缩弹片,用细线把它们拴住,处于静止状态。烧断细线,两滑块被弹开并朝相反方向做匀速运动。测量挡光板通过光电门的时间,就可计算出滑块的速度(图1-16)。

两滑块在弹开前后,它们的总动量变化了吗?

增加其中一个滑块的质量,使其质量是另一个的2倍,重复以上实验(图1-17)。两滑块在弹开前后的总动量变化了吗?



图1-16 两滑块质量相等



图1-17 两滑块质量不等

在气垫导轨上，无论两滑块的质量是否相等，它们在被弹力分开前的总动量为零，分开后的总动量也为零，说明气垫上的两滑块在相互作用前后的总动量不变（图1-18）。还可以通过实验证明，如果两滑块构成的系统受到外力作用（如摩擦力），那么，两滑块在相互作用前后的总动量就不相等了。

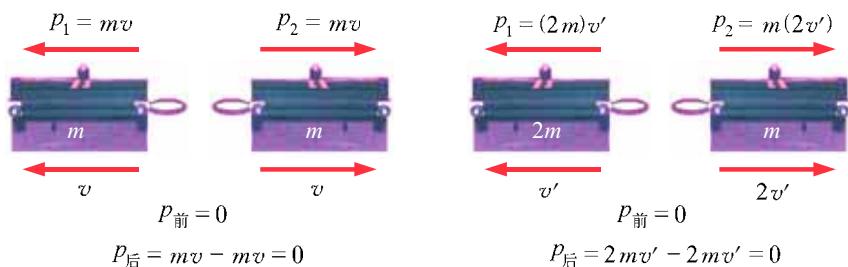


图 1-18 两滑块弹开前后的总动量不变

大量实验表明，一个系统不受外力或者所受合外力为零，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）。

在图1-15中，如果两小孩的滑冰鞋与地面的摩擦可以忽略不计，即近似认为两小孩构成的系统在水平方向不受外力作用，他们相互推动前后的动量是守恒的。在图1-14中，若将两公羊看成一个系统，这个系统不仅有内力作用（相互间的推力），而且还有外力作用（公羊与地面的摩擦力），所以两公羊碰撞前后的动量是不守恒的。如果将地球和公羊看成一个系统，公羊与地面的摩擦力就变成了内力，这时整个系统的动量就守恒了。

动量守恒定律是自然界普遍适用的基本规律之一。不仅低速、宏观物体的运动遵循这一规律，而且高速、微观物体的运动也遵循这一规律。

### 例题

有些原子核是不稳定的，能自发释放出某些粒子，然后变成另外一种原子核。例如，镭（Ra）原子核是不稳定的，它有88个质子和138个中子，会自发地以一定速度放出一个 $\alpha$ 粒子（ $\alpha$ 粒子含有2个质子和2个中子），然后变成氡（Rn）原子核（图1-19）。若质子和中子的质量相等， $\alpha$ 粒子在离开镭原子核时具有 $1.5 \times 10^7$  m/s的速度，试求氡原子核具有的速度。

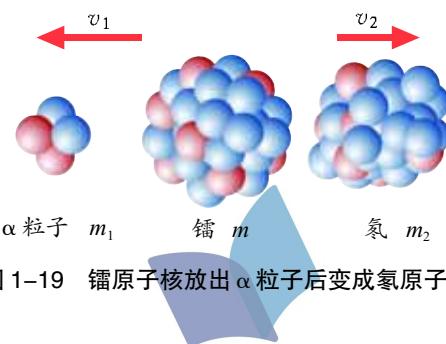


图 1-19 镭原子核放出 $\alpha$ 粒子后变成氡原子核



**解** 镭原子核共有226个中子和质子，衰变后放出一个 $\alpha$ 粒子(含2个中子和2个质子)，剩下的氡原子核含有222个中子和质子。

把组成镭原子核的所有质子和中子看成一个系统，该系统所受合外力为零，因此可以用动量守恒定律来求解。设质子的质量为 $m_0$ ， $\alpha$ 粒子的质量 $m_1 = 4m_0$ ；氡原子核的质量 $m_2 = 222m_0$ 。衰变前镭原子核静止，系统的总动量为0；设衰变后 $\alpha$ 粒子的速度为 $v_1$ ，氡原子核的速度为 $v_2$ ，系统的总动量为 $m_1 v_1 + m_2 v_2$ 。取衰变后 $\alpha$ 粒子的速度方向为正方向，由动量守恒定律

$$\begin{aligned} m_1 v_1 + m_2 v_2 &= 0 \\ v_2 &= -\frac{m_1 v_1}{m_2} = -\frac{4m_0 \times 1.5 \times 10^7}{222m_0} \text{ m/s} \\ &\approx -2.7 \times 10^5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

负号表示衰变后氡原子核的速度方向与 $\alpha$ 粒子的速度方向相反。



### 讨论与交流

小船停靠湖边，如果船还未停稳人便匆匆上岸，有时可能会掉入水中(图1-20)。为什么会出现这种情况？试运用动量守恒定律解释，并与同学讨论交流。



图1-20 他能跳上岸吗

## 2. 动量守恒定律的推导

前面已用实验证明，当一个系统所受合外力为零或不受外力作用时，该系统的总动量是不变的。我们还可以由牛顿定律推导出动量守恒定律。

在光滑的水平地面上，有质量为 $m_1$ 、 $m_2$ 的两小球 $A$ 、 $B$ ，它们分别以速度 $v_1$ 、 $v_2$ 同向运动，且 $v_1 > v_2$ 。当 $A$ 追上 $B$ 时，它们发生碰撞，碰撞后两球的速度都发生了变化， $A$ 、 $B$ 分别以速度 $v'_1$ 、 $v'_2$ 沿着原方向运动(图1-21)。

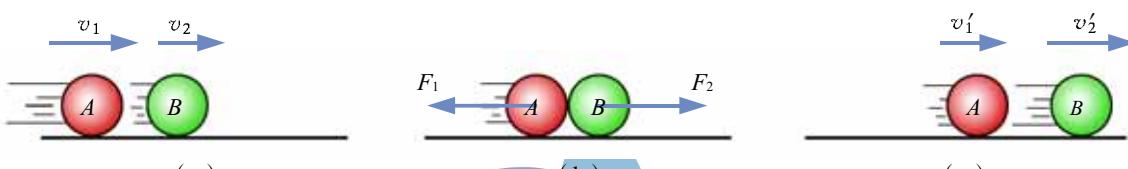


图1-21 光滑水平面上两小球的碰撞

用 $F_1$ 表示 $B$ 对 $A$ 的作用力, 用 $F_2$ 表示 $A$ 对 $B$ 的作用力, 设它们相互作用的时间为 $t$ 。 $A$ 和 $B$ 受到的重力和支持力都互相平衡, 在水平方向, 我们分别对 $A$ 、 $B$ 运用动量定理

$$F_1 t = m_1 v'_1 - m_1 v_1$$

$$F_2 t = m_2 v'_2 - m_2 v_2$$

由牛顿第三定律可知

$$F_2 t = - F_1 t$$

所以

$$m_2 v'_2 - m_2 v_2 = - (m_1 v'_1 - m_1 v_1)$$

整理后得

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

式中, 等号左边是两球碰撞前的总动量, 等号右边是两球碰撞后的总动量。上式表明, 当所受的合外力为零时,  $A$ 、 $B$ 两球在碰撞前后的总动量保持不变。

有时, 虽然系统所受合外力不为零, 但系统内部的相互作用力远大于其所受合外力, 外力对系统内部的动量传递影响不大, 该系统的总动量可近似认为不变。

## 信息窗

### 动量守恒定律的发现

伽利略、笛卡儿、惠更斯(图1-22)、牛顿等人曾经先后研究碰撞和打击问题, 建立并完善了动量概念, 发现了动量守恒规律。

伽利略认为, 物体速度的大小与重量的乘积是度量物体运动的一个物理量, 称之为“动量”。笛卡儿提出了动量是度量物体运动的唯一正确的物理量, 并提出了动量守恒的思想, 但笛卡儿忽视了动量的方向性。1668年, 惠更斯在其研究碰撞问题的论文中, 明确指出动量的方向性和守恒性。牛顿采用质量与速度的乘积定义动量, 更加清晰地表述了动量的方向性及其守恒规律。



图1-22 惠更斯

## 例题

质量为1 000 kg的轿车与质量为4 000 kg的货车迎面相撞。碰撞后两车绞在一起, 并沿货车行驶方向运动一段路程后停止(图1-23)。从事故现场测出, 两车相撞前, 货车的行驶速度为54 km/h, 撞后两车的共同速度为18 km/h。该段公路对轿车的限速为100 km/h, 试判断轿车是否超速行驶。

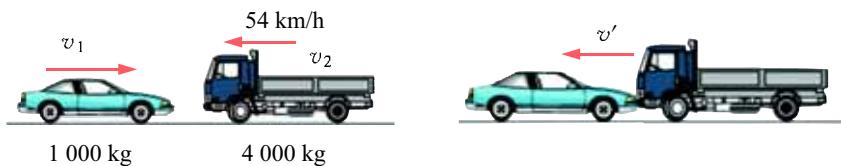


图 1-23 两车相撞示意图

**解** 碰撞中两车间的相互作用力很大,可忽略两车受到的其他作用力,近似认为两车在碰撞过程中动量守恒。

设轿车质量为 $m_1$ , 货车质量为 $m_2$ ; 碰撞前轿车速度为 $v_1$ , 货车速度为 $v_2$ ; 碰撞后两车速度为 $v'$ 。选轿车碰撞前的速度方向为正方向。碰撞前系统的总动量为 $m_1v_1 + m_2v_2$ , 碰撞后的总动量为 $(m_1 + m_2)v'$ , 由动量守恒定律  $m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1 + m_2)v'$  得

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{(m_1 + m_2)v' - m_2v_2}{m_1} \\ &= \frac{(1000 + 4000) \times (-18) - [4000 \times (-54)]}{1000} \text{ km/h} \\ &= 126 \text{ km/h} \end{aligned}$$

轿车在碰撞前超速行驶。



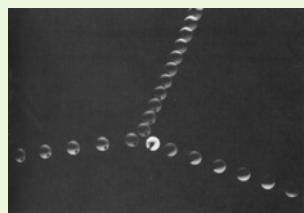
## 拓展一步

### 斜碰中的动量守恒

以上讨论的碰撞都是一维碰撞, 即碰撞前后的速度方向均在同一直线上, 也称为正碰或对心碰撞。如果碰撞前后的速度方向不在同一直线上, 这种碰撞叫做斜碰。图 1-24 展示了宏观物体的斜碰和微观粒子的斜碰。

在这两个实例中, 可以把两球或两微观粒子看成一个系统, 在碰撞过程中, 两球或两微观粒子的相互作用力远远大于它们受到的外力, 系统的动量守恒。

动量守恒, 表示动量的大小和方向都不变, 因此它在各方向的分量也保持不变。例如, 在二维直角坐标系中, 动量在 $x$ 轴和 $y$ 轴方向的分量是守恒的。有的斜碰, 即使整个系统的总动量不守恒, 也有可能在某方向上的分量是守恒的。人们常常利用这些特点解决问题。



(a) 台球的斜碰



(b) 微观粒子的斜碰

图 1-24 斜碰

### 3. 反冲运动与火箭

将气球充气后敞口释放，气球会沿喷出空气相反的方向飞去（图1-25）。当空气喷出时，空气具有动量，由动量守恒定律可知，气球要向相反方向运动。这种运动叫做**反冲运动**（recoil motion）。

火箭的发射是一种典型的反冲运动。火箭点燃后，产生的高速气流从火箭尾部喷出，使火箭向前飞行。喷气速度越大，火箭能达到的速度也就越大；燃料质量越大、负荷越小，火箭能达到的速度也越大（图1-26）。

宇航员无绳太空行走，就是通过太空服背部的喷气推进装置实现的（图1-27）。该装置有几十个喷管，宇航员利用安装在太空服前面的开关控制喷气，实现朝各个方向的移动和转动。

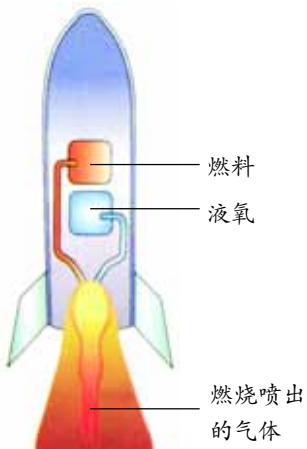


图1-26 火箭通过喷出气体向前运行



图1-27 宇航员利用喷气装置实现太空行走



图1-28 高压水枪产生反冲作用

公园用的自动喷水装置向两个相反方向喷水时，水流的反冲作用就使喷水管旋转起来，达到均匀喷洒的目的。大型水力发电站用的反击式水轮机也是利用水流的反冲作用旋转的。

反冲有时也会带来不利影响。例如，射击时子弹向前飞去，枪身会向后反冲，枪身的反冲会影响射击的准确性。步枪射击时要把枪身抵在肩部，就是为了减少反冲的影响。消防队员用高压水枪灭火时，水高速喷出，高压水枪向后反冲，必须牢牢抓住水管才能保持平衡（图1-28）。



## 信息窗

### “懂”反冲运动的乌贼

动物的运动方式各有特点，乌贼是利用反冲作用使自身运动的。

乌贼具有由外套膜围成的外套腔，进入外套腔的水由漏斗管喷出，乌贼就是依靠漏斗管喷水的反冲作用而使身体运动的。在海水中，乌贼的运动速度通常可达  $15\text{ m/s}$ ，有的乌贼可以跃出水面  $7\sim10\text{ m}$ ，在空中飞行  $50\text{ m}$  左右。

乌贼具逃避敌害的特殊本领。在乌贼体内有墨囊，内存墨汁。当遇到敌害时，乌贼把墨汁排到外套腔里，墨汁跟水一起由漏斗管迅速喷出，使海水变黑，迷惑对方，而自己却利用反冲作用迅速逃离危险地带。



图 1-29 乌贼具有利用反冲作用的本能



## 迷你实验室

### 制作“水火箭”

“水火箭”不用燃料也能上天。

先在一个塑料可乐瓶中装进大半瓶水，然后在可乐瓶瓶盖中心打一小孔，再找一个大小适当的橡皮塞，在其中央打一小孔，并装上自行车的气门芯。将橡皮塞用力塞入塑料可乐瓶的瓶口，把中心打孔的瓶盖旋紧，让气门芯露在外面。剪下另一个可乐瓶的瓶口部分，用胶布粘在前一个可乐瓶的瓶底，做成火箭头，在靠近尾部的地方装上定向尾翼，“水火箭”就做好了（图 1-30）。

把“水火箭”倒立，放在铁架台的铁圈上（图 1-31）。用打气筒通过气门芯向可乐瓶内打气，使瓶内空气达到一定压强，缓慢旋开瓶盖，水将橡皮塞冲开并向下高速喷出，由于反冲作用，“水火箭”便会冲向天空。

想一想，怎样才能让“水火箭”升得更高？

（注意：“水火箭”发射必须在户外进行）



图 1-30 “水火箭”的结构

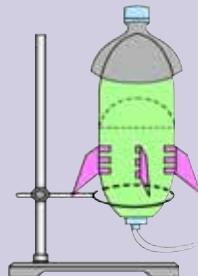


图 1-31 “水火箭”的发射

## 作业

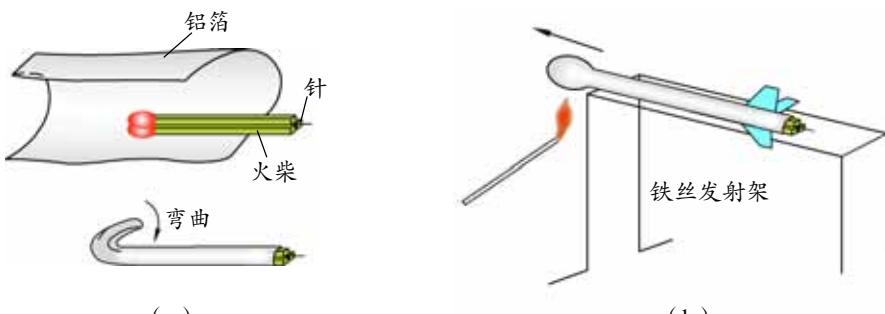
- 把两个磁性很强的磁铁分别放在两辆小车上，磁铁的同名磁极相对。小车放在光滑的水平桌面上，推动小车，使它们相互接近，两辆小车没有碰上就分开了。两辆小车相互作用前后，它们的总动量守恒吗？为什么？

2. 一只木箱在地面上滑行，由于摩擦，箱子的速度逐渐减小，箱子的动量也在减小。这一过程与动量守恒定律矛盾吗？箱子减小的动量哪里去了？
3. 射击的时候，子弹从枪筒飞出，枪身有反冲现象，已知枪身质量是3 kg，子弹质量是50 g，子弹射出时速度是600 m/s。如果枪身不抵肩，它的反冲速度是多少？
4. 一个质子（质量为 $1.67 \times 10^{-27}$  kg）以 $1 \times 10^7$  m/s的速度轰击一个静止的氦核，质子以 $6 \times 10^6$  m/s的速度被弹回，这个氦核在受轰击后以 $4 \times 10^6$  m/s的速度向前运动。求氦核的质量。
5. 一个远离太阳和行星的太空舱，质量为1 000 kg。质量为0.1 kg的飞行物，相对太空舱以1 000 m/s的速率撞在太空舱上。
- (1) 若飞行物嵌入太空舱，太空舱的速度是多大？
- (2) 若飞行物打中太空舱的另一个部位后以几乎不变的速率反向弹回，太空舱的速度又是多大？
6. 将3根火柴并在一起，头部位于同一端，在火柴中间放置一根针（或细铁丝），然后用铝箔纸将它们紧裹起来。将火柴头一端的铝箔在紧靠火柴头处弯折过来，并捻紧密封。然后在靠近尾部的地方装上定向尾翼。把针（或细铁丝）拔出，小火箭就做好了。用铁丝做一个支架，把小火箭放在支架上，用点燃的火柴对准铝箔纸包有火柴头的部位加热，当铝箔纸里的火柴被点燃时，小火箭便会迅速地向前冲出去。请分析其原因。



飞行物 太空舱

(第5题)



(a)

(b)

(第6题)



# 第3节

## 科学探究——一维弹性碰撞

### 1. 不同类型的碰撞

碰撞时,由于相互作用时间很短,碰撞物体间的作用力远大于外力,系统的动量可认为是守恒的。但从能量转化角度看,动能不一定守恒。人们根据碰撞中能量的转化情况把碰撞分为3种类型。

碰撞过程中物体往往会发生形变,还会发热、发声。因此在一般情况下,碰撞过程中会有动能损失,即动能不守恒,这类碰撞称为**非弹性碰撞**(inelastic collision)。碰撞后物体结合在一起时,动能损失最大,这种碰撞叫做**完全非弹性碰撞**。

在理想情况下,物体碰撞后,形变能够完全恢复,不发热、发声,没有动能损失,这种碰撞称为**弹性碰撞**(elastic collision),又称**完全弹性碰撞**。真正的弹性碰撞只有在分子、原子以及更小的粒子之间才会出现(图1-32)。生活中,硬质木球或钢球间发生碰撞时,动能的损失很小,可以忽略不计,通常也将它们的碰撞看成**弹性碰撞**(图1-33)。



图1-32 分子的碰撞  
是弹性碰撞



图1-33 打保龄球时,球与瓶的  
碰撞近似为弹性碰撞

弹性碰撞在微观领域有着重要的应用。我们主要探究弹性碰撞的特点。

### 2. 弹性碰撞的实验研究

在弹性碰撞中,系统的动量与动能在碰撞前后都不变。下面通过实验来探究。



## 实验与探究

## 实验1：质量相等的两个钢球的碰撞

把两个质量相等的钢球并排挂在一起（图1-34），B球静止，把A球拉到某一高度释放，A球摆到最低点时与B球碰撞。碰撞后A球和B球会怎样运动？

实验中，可记下A球释放的位置和碰撞后A、B球弹至最大高度时的位置。改变A球拉起的高度，重复实验。

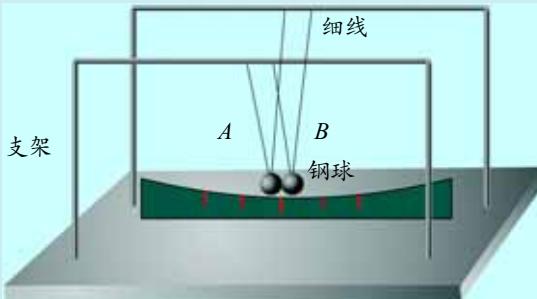


图1-34 实验装置

## 【结论】

两球质量相等时，碰撞的特点是\_\_\_\_\_。  
\_\_\_\_\_。

## 实验2：质量不相等的两个钢球的碰撞

- (1) 把A球换成质量更大的钢球，让B球静止，把A球拉至某一高度释放并与B球碰撞，观察碰撞情况。改变A球拉起的高度，重复实验。
- (2) 让A球静止，把B球拉至某一高度释放并与A球碰撞，观察碰撞情况。改变B球拉起的高度，重复实验。

## 【结论】

- (1) 被碰球质量较小时，碰撞特点是\_\_\_\_\_。
- (2) 被碰球质量较大时，碰撞特点是\_\_\_\_\_。

## 3. 弹性碰撞的规律

在实验1中，质量相等的两个钢球相碰撞，碰撞后A球立即停下，而B球几乎摆到A球原来的高度。改变A球拉起的高度，碰撞后仍有这一结果。为什么会出现这种情况呢？

设A、B球的质量分别为 $m_1$ 、 $m_2$ ，碰撞前A球的速度为 $v_1$ ，碰撞后A、B球的速度分别为 $v'_1$ 和 $v'_2$ （图1-35）。由于两个钢球的碰撞是弹性碰撞，所以碰撞过程中动量守恒，动能也守恒。由动量守恒和动能守恒有

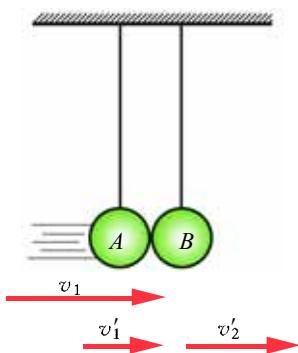


图1-35 两球弹性碰撞



$$m_1 v_1 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \quad (1)$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 v'_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v'_2^2 \quad (2)$$

由①式得

$$m_1(v_1 - v'_1) = m_2 v'_2$$

由②式得

$$m_1(v_1^2 - v'^2_1) = m_2 v'^2_2$$

联立以上两式得

$$v'_1 + v_1 = v'_2 \quad (3)$$

联立①③两式得

$$v'_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2}, \quad v'_2 = \frac{2m_1 v_1}{m_1 + m_2}$$

由以上二式可解释探究实验中的结论。

(1) 当两球质量相等, 即  $m_1 = m_2$  时,  $v'_1 = 0$ ,  $v'_2 = v_1$ ,  $A$  球碰后速度为零, 而  $B$  球获得了碰撞前  $A$  球的速度。也就是说两球碰撞后交换了速度。

(2) 当质量大的球碰质量小的球, 即  $m_1 > m_2$  时,  $v'_1 > 0$ ,  $v'_2 > 0$ , 表示碰撞后两球都向前运动。

(3) 当质量小的球碰质量大的球, 即  $m_1 < m_2$  时,  $v'_1 < 0$ ,  $v'_2 > 0$ , 表示碰撞后质量小的球被反弹回来。

弹性碰撞规律在微观粒子的碰撞中有着重要应用。查德威克 (J. Chadwick) 在发现中子的过程中, 就是应用了弹性碰撞模型, 根据实验数据计算出了中子的质量。

### 迷你实验室

图 1-36 是由质量相同的 5 颗小钢球组成的玩具, 叫做“牛顿摇篮”。让这些球碰撞, 会出现一些非常有趣的现象: 若拉起左端 1 个球让它与其他球碰撞, 会把最后 1 个球撞出, 而其他球静止不动; 若拉起左端 2 个球同时释放, 相撞后, 最后的 2 个球被撞出, 而其他球静止不动……

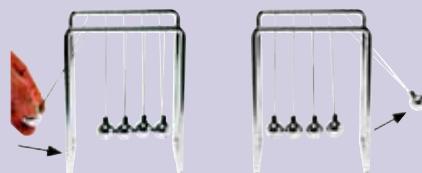


图 1-36 牛顿摇篮

为什么会出现这样的现象?

如果你暂时无法用“牛顿摇篮”做实验，可以用几颗质量、体积都相同的玻璃珠试试。如图1-37所示，当你将一粒玻璃珠弹向一排整齐紧挨的玻璃珠时，最外边的那颗玻璃珠被弹出，想想这是为什么？



图1-37 玻璃珠实验

### 作业

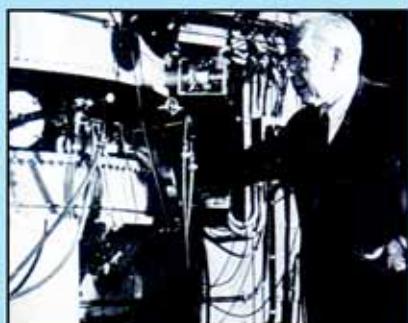
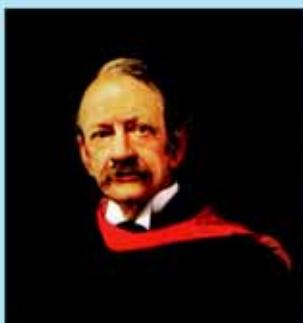
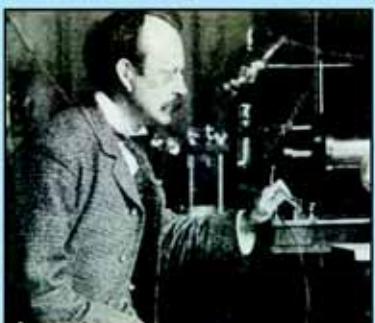
- 有一质量为  $6.64 \times 10^{-27}$  kg、速度为  $v$  的  $\alpha$  粒子与一个质量为  $3.32 \times 10^{-26}$  kg、静止的氛核发生正碰，若碰撞是弹性的，试证明碰撞后氛核具有的速率约为  $\frac{1}{3}v$ 。
- $A$ 、 $B$  两物体沿同一直线相向运动。 $A$  物体的速度大小是 6 m/s， $B$  物体的速度大小是 2 m/s，碰撞后两物体都沿各自原方向的反方向运动，速度大小都是 4 m/s。求  $A$ 、 $B$  两物体的质量之比。
- 半径相等的两个小球  $A$  和  $B$ ，在光滑水平面上沿同一直线相向运动。若  $A$  球的质量大于  $B$  球的质量，发生弹性碰撞前，两球的动能相等。碰撞后两球的运动状态可能是
  - $A$  球的速度为零， $B$  球的速度不为零
  - $B$  球的速度为零， $A$  球的速度不为零
  - 两球的速度均不为零
  - 两球的速度方向均与原方向相反，两球的动能仍相等
- 质量为 1 kg 的物体  $A$ ，在光滑水平面上以 6 m/s 的速度与质量为 2 kg、速度为 2 m/s 的物体  $B$  发生碰撞，则碰后  $A$ 、 $B$  两物体的速度可能值为
  - $v_A = 5$  m/s,  $v_B = 2.5$  m/s
  - $v_A = 2$  m/s,  $v_B = 4$  m/s
  - $v_A = -4$  m/s,  $v_B = 7$  m/s
  - $v_A = 7$  m/s,  $v_B = 1.5$  m/s
- 两个质量分别为 300 g 和 200 g 的物体在无摩擦的水平面上相向运动，速度分别为 50 cm/s 和 100 cm/s。
  - 如果两物体碰撞并结合在一起，求它们的末速度。
  - 求碰撞后损失的动能。
  - 如果碰撞是弹性碰撞，求每一物体碰撞后的速度。



第2章

# 原子结构

- 导入 从一幅图片说起
- 第1节 电子的发现与汤姆孙模型
- 第2节 原子的核式结构模型
- 第3节 玻尔的原子模型
- 第4节 氢原子光谱与能级结构



# 导入

## 从一幅图片说起

宇宙中有太阳、地球、月亮，还有无数星系。我们身边的物体形状各异、性质不同、多姿多彩：纤薄的蝴蝶翅膀，坚硬的飞机机翼，起伏的山峦，蓝色的大海，白色的冰河，黑色的煤炭，等等。借助仪器还可以观察到一些肉眼无法感知的东西。将一幅图画逐步放大，我们就会发现，一幅精美的图画已被分解成许许多多小的色块。



图 2-1 精美图画可分解成许多小色块

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

### 本章 要求

- 了解人类探索原子结构的历史及有关经典实验。
- 通过对氢原子光谱的分析，了解原子的能级结构。

# 第1节

## 电子的发现与汤姆孙模型

### 1. 物质结构的早期探究

现代人已能“看见”原子的模样，而在没有任何实验设施的过去，人们只能靠思辨来推测大千世界物质的构成（图 2-2）。

古人将自然界的某些具体物质视为构成世界万物的元素：我国西周的“五行说”认为万物是由金、木、水、火、土 5 种基本“元素”组成的；古希腊的亚里士多德认为万物的本质是土、水、火、空气 4 种“元素”，天体则由第五种“元素”——“以太”构成。有的古人认为万物的构成来源于抽象的概念：我国春秋时期的老子讲“道生一，一生二，二生三，三生万物”；而古希腊的毕达哥拉斯则认为自然界中的一切都服从于一定比例的数。

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

大约在 17 世纪中叶，人们开始通过实验来了解物质的结构。

1661 年，玻意耳（R. Boyle, 1627—1691）以化学实验为基础建立了科学的元素论。他认为，只有那些不能用化学方法再分解的简单物质才是元素，各种元素存在着不同的原子，元素的差异是由于原子的差异导致的。18 世纪一系列重要的实验结果，如化学反应遵从质量守恒定律，元素形成化合物时遵从定比定律、倍比定律等，启示人们推想物质是由一些不可

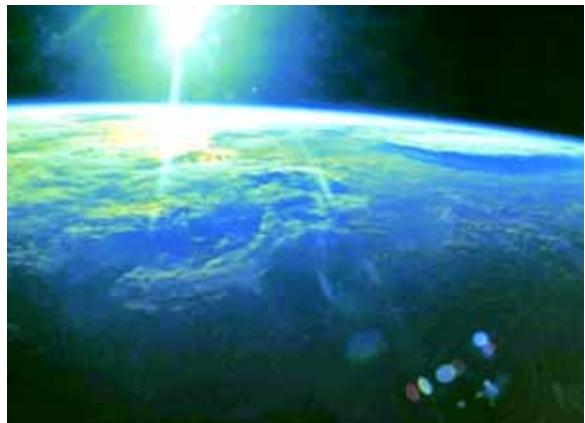


图 2-2 大千世界是由什么构成的

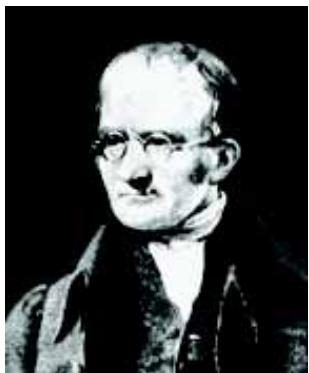


图 2-3 道尔顿

毁灭的微粒构成的，而且各种不同的元素微粒按照一定的比例形成化合物。在此基础上，19世纪初，道尔顿 (J. Dalton, 1766—1844, 图 2-3) 提出了原子论，认为原子是元素的最小单元。1811 年，意大利化学家阿伏伽德罗 (A. Avogadro, 1776—1856, 图 2-4) 提出了分子假说，指出分子可以由多个相同的原子组成。



图 2-4 阿伏伽德罗

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

原子真的不可再分了吗？

## 2. 电子的发现

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

### 信息窗

#### 气体放电管

在密封的玻璃管内装上电极并充入气体，就构成了一个放电管 (图 2-5)。当在放电管两极加上电压时，充入的气体就导电、发光、发热。日光灯启动器的氖泡和日光灯管都是气体放电管，法国化学家克劳德发明的霓虹灯也是一种气体放电管。气体放电管内充以不同气体，通电后就会发出不同颜色的光。每当夜色来临，装有不同气体的霓虹灯将城市打扮得靓丽多彩。

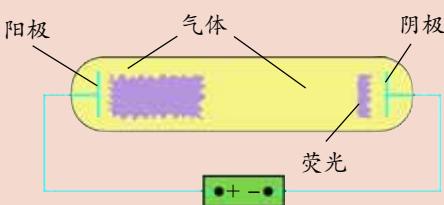


图 2-5 气体放电管



英国科学家汤姆孙 (J. J. Thomson, 1856—1940) 从 1890 年开始对阴极射线进行研究。1897 年, 他设计了一个巧妙的实验, 实验中通过静电偏转力和磁场偏转力相抵消等方法, 确定了阴极射线粒子的速度, 测量出了这些粒子的比荷。从阴极射线管的实验装置图 (图 2-6)

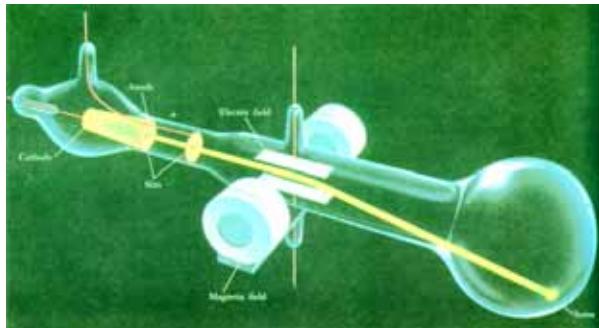


图 2-6 阴极射线管实验装置图

可知, 当运动电荷受到的电场力与磁场力平衡时, 有

$$qE = qvB$$

由此确定带电粒子的运动速率, 然后使电场为 0, 带电粒子在磁场区内做圆周运动, 半径  $R$  由下式确定

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

由以上两式可得带电粒子的比荷

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

测出比荷数值大约是  $10^{11}$  C/kg, 比氢离子的比荷大得多。汤姆孙还把各种不同的气体充入管内, 用多种不同的金属分别制成阴极, 实验结果证明, 求出的比荷值大体相同。

后来, 汤姆孙和他的学生直接测量了氢离子和阴极射线的电荷, 证明阴极射线的电荷与氢离子的电荷大小基本相同, 计算出阴极射线的质量是氢离子质量的  $1/1\ 800$ 。这些事实不仅证实了阴极射线确实是带电粒子流, 而且表明不同物质都能发射这种带电粒子, 它是各种物质中共有的成分, 比最轻的氢原子的质量还小得多。汤姆孙将这种带电粒子称为**电子** (electron)。电子的发现说明原子具有一定的结构, 也就是说原子是由电子和其他物质组成的。电子是第一种被发现的微观粒子, 电子的发现是 19 世纪末的三大著名发现之一。

### 方法点拨

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



## 信息窗

### 微观世界的三大发现

19世纪末，X射线、放射性和电子的发现揭开了研究微观世界的序幕，被称为微观世界的三大发现。

X射线的发现应该归功于伦琴。1895年，他在进行阴极射线实验时，发现在距离放电管较远的荧光屏上出现荧光，伦琴将这种具有很强穿透力的未知射线称为X射线。接着，他发表了题为《论新的射线》的论文，并公布了他妻子手骨的X射线照片，在世界上引起轰动。X射线首先应用于人体透视，为医学诊断提供了有力的手段。人类从此迈入了微观世界之门。伦琴由此获得了首届诺贝尔物理学奖。



图 2-7 伦琴——X射线

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

英国物理学家汤姆孙在研究阴极射线本质时，发现了电子的存在。他通过实验证明，阴极射线是带负电的粒子流，并测定了它的比荷和速率。1897年，汤姆孙在《阴极射线》的论文中指出，电子是一切原子所共有的组成成分。此后，汤姆孙直接测定了电子的电荷和质量。电子是人类认识的第一种微观粒子。

三大发现激励着人们不断探索原子的内部结构，预示着人类开始了“分裂原子”的探索。



图 2-8 贝可勒尔——放射性

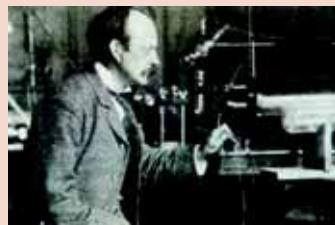


图 2-9 汤姆孙——电子

## 3. 汤姆孙原子模型

汤姆孙的阴极射线实验证明了电子的存在，从而摧毁了原子不可分的信念，激发人们对原子内部结构进行探索。

电子的发现只是揭开了原子内部神秘结构的一角。我们知道，物质在通常情况下是不带电的，原子呈电中性。如果电子是原子的组成部分，那么原子里一定还有带正电的部分。电子的质量很小，原子的质量应该主要集中在带正电的部分。那么原子中带正电的部分和带负电的电子是怎样合为一体的呢？

当时，无法直接通过实验探测原子内部的奥秘。汤姆孙运用经典力学的理论，根据电荷之间的作用力与距离的平方成反比进行了大量计算，以求证电子稳定分布应处的状态。他认



为，既然电子那么小，又那么轻，原子带正电的部分应充斥整个原子，很小很轻的电子镶嵌在球体的某些固定位置，正像葡萄干嵌在面包中那样，这就是原子的葡萄干面包模型(图2-10)。电子带的负电被原子内带的正电抵消，因此原子呈电中性。如果原子失去电子或得到电子，就会变成离子。电子一方面要受正电荷的吸引，另一方面又要互相排斥，因此必然有一个处于平衡的状态。电子在它们的平衡位置附近做简谐振动，可以发射或吸收特定频率的电磁波。

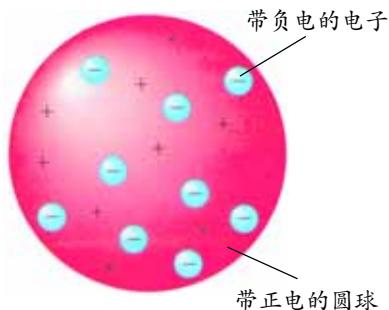


图 2-10 汤姆孙原子模型

## 作业

1. 汤姆孙如何由实验判定电子是原子的组成部分？
2. 通过图书馆、互联网等渠道，了解电子发现后科学家提出的各种原子模型。
3. 19世纪末的三大重要发现对人们了解微观世界有什么价值？请查找资料，写一篇小论文。



## 第2节 原子的核式结构模型

### 1. $\alpha$ 粒子散射实验

汤姆孙原子结构模型建立后，人们便希望用模型去解释实验现象。但事实证明，该模型在解释有些实验现象时遇到了困难。1902年，勒纳德（P. Lenard, 1862—1947）所做的电子穿过金属箔的实验，显示高速电子很容易穿过金属中的原子，这表明原子不像是正电荷均匀分布的实心球体。

19世纪末， $\beta$  射线、 $\alpha$  射线相继被发现，尤其是某些放射性物质释放出的 $\alpha$  粒子具有很大的动能，可以做轰击金属的“炮弹”。用这些已知的粒子与金属内的原子相互作用，根据粒子的偏转情况来获得原子内部的信息，成为研究物质结构的新方法，这种研究方法使得人们对原子结构的研究取得了突破。

1909~1911年，卢瑟福（E. Rutherford, 1871—1937）和他的合作者做了用 $\alpha$  粒子轰击金箔的实验，实验装置如



电场无法直接观察，我们曾用放进试探电荷的方法，通过观察它的“行为”来了解电场的性质。原子太小，内部结构无法直接观察，我们也可以用已知粒子与原子相互作用的方法，通过对实验结果的分析推断原子结构。卢瑟福的 $\alpha$  粒子散射实验采用了“碰撞”的实验方法。

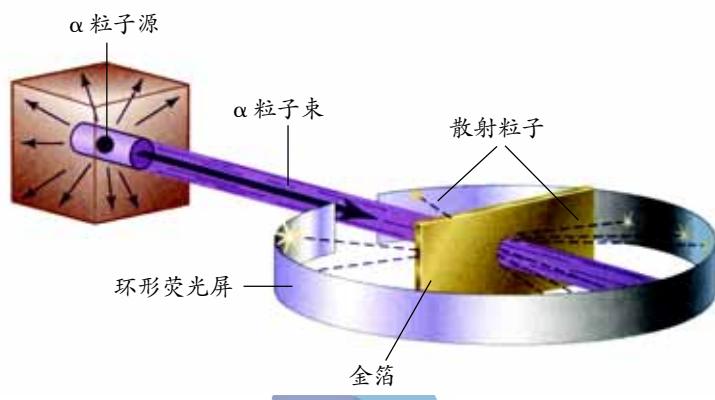


图 2-11  $\alpha$  粒子散射实验装置



图2-11所示。在一个小铅盒里放有少量的放射性元素钋(Po)，它发出的 $\alpha$ 粒子从铅盒的小孔射出，形成很细的一束射线，射到金箔上。 $\alpha$ 粒子穿过金箔后，打到环形荧光屏上，产生一个个闪烁的光点，这些光点可以用显微镜观察到。

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

根据汤姆孙原子结构模型， $\alpha$ 粒子穿过金箔后偏离原来方向的角度应该是很小的，因为电子的质量很小，不到 $\alpha$ 粒子的 $1/7\,000$ ， $\alpha$ 粒子碰到它，就像飞行着的子弹碰到一粒尘埃一样，运动方向不会发生明显的改变。当 $\alpha$ 粒子在汤姆孙原子结构模型的原子外面时，由于原子呈电中性，而且是球形对称分布，原子对 $\alpha$ 粒子没有作用力；当 $\alpha$ 粒子接近原子或进入原子内部时， $\alpha$ 粒子也不应发生大角度的散射。因此，汤姆孙原子结构模型无法解释 $\alpha$ 粒子的大角度散射现象。



### 讨论与交流

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

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

## 2. 卢瑟福原子模型

卢瑟福(图2-12)无法用汤姆孙原子结构模型解释 $\alpha$ 粒子大角度散射现象，他认为这就好像把一颗炮弹发射到一张砂纸上，竟被砂纸弹回来一样不可思议。卢瑟福尊重实验事实，利用与原子结构有关的信息，经过严谨的理论推导，于1911年提出了原子的核式结构模型。他认为，原子内部有一个很小的核，叫做原子核，原子的全部正电荷以及几乎全部的质量都集中在原子核内；带负电的电子绕核运动。卢瑟福的原子模型有些像太阳系，电子绕核运行就像太阳系的行星绕太阳运行似的。因此，原子的核式结构模型又被称为行星模型。



图2-12 卢瑟福

按照这个模型， $\alpha$  粒子穿过原子时，电子对  $\alpha$  粒子运动的影响很小，影响  $\alpha$  粒子运动的主要是原子核。若  $\alpha$  粒子穿过金箔时离核较远，受到的斥力很小，它们的运动几乎不受影响；只有当  $\alpha$  粒子从原子核附近飞过时，才会明显地受到原子核的库仑力而发生大角度偏转（图 2-13）。因为原子核很小， $\alpha$  粒子十分接近它的机会很少，所以绝大多数  $\alpha$  粒子基本上仍按直线方向前进，发生偏转的粒子中，大多数偏转角度也不大，只有极少数  $\alpha$  粒子发生大角度偏转。卢瑟福核式结构模型很好地解释了大角度散射现象。

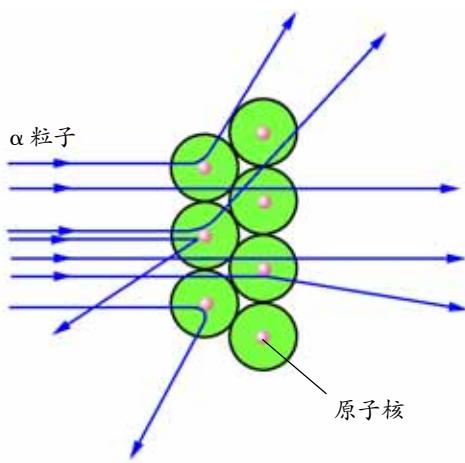


图 2-13  $\alpha$  粒子散射示意图

### 方法点拨

卢瑟福把原子的结构跟太阳系比较。他说，原子核是原子的中心，正像太阳是太阳系的中心一样。电子隔着很远的距离沿轨道绕着中心旋转，正像行星隔着很远的距离沿轨道绕太阳旋转一样。这是科学家利用类比方法的又一佐证。



### 拓展一步

由  $\alpha$  粒子散射实验的数据可以估计出原子核的大小。当  $\alpha$  粒子与核发生对心弹性碰撞时， $\alpha$  粒子以接近  $180^\circ$  角返回。假定原子核静止不动， $\alpha$  粒子以一定的初动能接近原子核，达到离原子核的最小距离时，初动能完全转变为在原子核电场中的电势能，然后在  $\alpha$  粒子与原子核正电荷的排斥作用下以接近  $180^\circ$  角返回。假设  $\alpha$  粒子初速度为  $v_0$ ， $\alpha$  粒子的质量为  $M_\alpha$ ，金属薄片的原子序数为  $Z$ ， $\alpha$  粒子接近核的最小距离为  $r_{\min}$ 。根据初动能等于核电场中的电势能，即

$$\frac{1}{2} M_\alpha v_0^2 = k \frac{2eZe}{r_{\min}}$$

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



根据卢瑟福的原子核式结构模型，可以计算出原子核直径应在 $10^{-14}$  m以下。近年来的研究表明，原子核直径的数量级为 $10^{-15}$  m，原子直径的数量级大约是 $10^{-10}$  m，原子核的直径只相当于原子直径的十万分之一。

## 信息窗

### 卢瑟福散射实验的应用

卢瑟福散射实验为材料分析提供了新的手段。1967年，美国向月球发送了一个飞行器，飞行器内装有 $\alpha$ 粒子源，利用 $\alpha$ 粒子进行了月球表面的卢瑟福散射实验，分析了月球表面的成分，并把结果发回地球。这一结果与1969年从月球取回样品所做的分析结果基本相符。从此，卢瑟福散射实验日益为各实验室所用，成为材料分析的有力手段。按此原理制成的“卢瑟福谱仪”现已成为商品。原子的核式结构思想，给当时的物理学家和化学家以巨大震动，对原子物理学的发展起了重大推动作用，人们称卢瑟福是“近代原子物理学的真正奠基者”。

## 作业

- 简述卢瑟福是如何发现原子的核式结构的。
- $\alpha$ 粒子的质量约为电子质量的7300倍，如果 $\alpha$ 粒子以速度 $v$ 与电子发生弹性正碰（假定电子原来是静止的），求碰撞后 $\alpha$ 粒子的速度变化了多少，并由此说明为什么原子中的电子不能使 $\alpha$ 粒子发生明显偏转。
- 已知氢原子的半径是 $5.3 \times 10^{-11}$  m，电子由于绕核旋转而不致被吸引到核上。按照卢瑟福的原子模型，电子绕核做匀速圆周运动的速率和频率各是多大？

## 提问

# 第3节 玻尔的原子模型

## 1. 玻尔原子模型

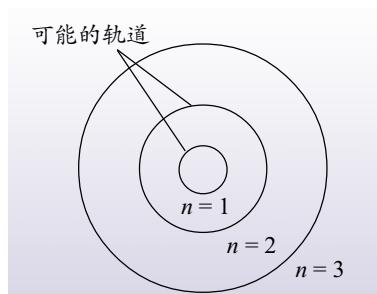
卢瑟福的原子核式结构模型能够解释 $\alpha$ 粒子与金箔中原子碰撞所得到的信息。原子光谱同样也是来自原子的信息。人们通过对恒星发光和气体放电发光的研究，发现每种元素都发射具有一定频率成分的特征光谱，这是核式结构模型无法解释的现象。

按照经典电磁理论，电子绕核运行时，辐射电磁波的频率应等于电子绕核运行的频率，随着运行轨道半径的不断变化，电子绕核运行的频率不断变化，原子辐射电磁波的频率也应不断变化。这样，大量原子发光的频率应当是连续光谱，而实际上原子光谱是不连续的。另外，按照经典电磁理论，做加速运动的电子应辐射出电磁波，它的能量要逐渐减少。随着能量的减少，电子绕核运行的轨道半径也要减小，电子应沿螺旋线轨道落入原子核。但实际却不是这样，卢瑟福原子模型不能解释原子的稳定性。

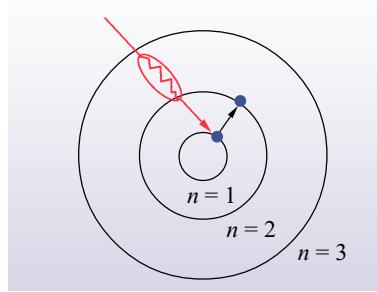
丹麦物理学家玻尔曾师从卢瑟福，深知核式结构模型的客观性及局限性。他接受了普朗克和爱因斯坦的量子化思想，并将原子结构与光谱联系起来，于1913年提出了量子化的原子模型。玻尔原子理论的主要内容是：

(1) 原子只能处于一系列能量不连续的状态中。在这些状态中，原子是稳定的，电子虽然做加速运动，但并不向外辐射能量，这些状态叫做定态。电子绕原子核做圆周运动，只能处在一些分立的轨道上，它只能在这些轨道上绕核转动而不产生电磁辐射[图2-14(a)]。

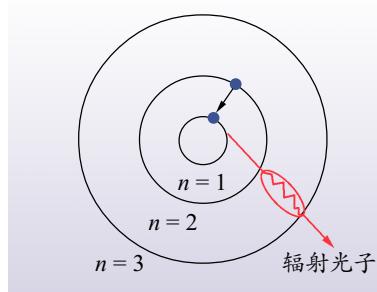
(2) 原子从一种定态跃迁到另一种定态时，吸收(或辐射)一定频率的光子能量 $h\nu$ [图2-14(b)、(c)]，这里，



(a) 可能的轨道



(b) 吸收光子



(c) 辐射光子

图2-14 玻尔原子模型示意图



$h$ 为普朗克常量， $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ， $\nu$ 为光的频率。例如，原子从定态 $E_2$ 跃迁到定态 $E_1$ ，辐射的光子能量为

$$h\nu = E_2 - E_1$$

(3) 原子的不同能量状态对应于电子的不同运行轨道。原子的能量状态是不连续的，电子不能在任意半径的轨道上运行。轨道半径 $r$ 跟电子动量 $mv$ 的乘积满足下式的这些轨道才是可能的。

$$m_e v r = n \frac{h}{2\pi} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

式中， $n$ 是正整数，称为量子数。

## 信息窗

### 玻尔

尼尔斯·玻尔 (N. Bohr, 1885—1962, 图2-15)，丹麦物理学家。他早年在哥本哈根大学攻读物理学，从事金属电子论方面的研究工作，获理学硕士和哲学博士学位。

1912年，他在曼彻斯特大学卢瑟福的实验室工作过4个月，其时正值卢瑟福原子核式结构模型的建立与检验阶段，他十分了解核式结构模型的局限性。1913年，他在氢光谱理论的启发下，提出了定态跃迁原子模型理论。1922年，他因对原子结构及原子辐射的研究而获得诺贝尔物理学奖。

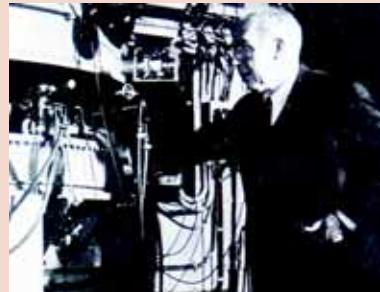


图2-15 尼尔斯·玻尔

在婉言谢绝了美国、英国的高薪聘请后，1920年，玻尔在丹麦创立了哥本哈根大学理论物理研究所，并担任所长40年。在创立量子力学过程中，玻尔领导的研究所成为世界原子物理研究中心。该研究所不仅成果丰硕，而且以勇于进取、乐观向上、亲切活泼、无拘无束的哥本哈根精神著名。

## 2. 氢原子的能级结构

按照玻尔的原子理论，原子只能处于一系列不连续的能量状态。在每个状态中，原子的能量值都是确定的，各个确定的能量值叫做能级 (energy level)。

根据玻尔理论，氢原子在不同能级上的能量和相应的电子轨道半径为

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

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

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

根据以上结果, 把氢原子所有可能的能量值画在一张图上, 就得到了氢原子的能级结构图(图2-16)。

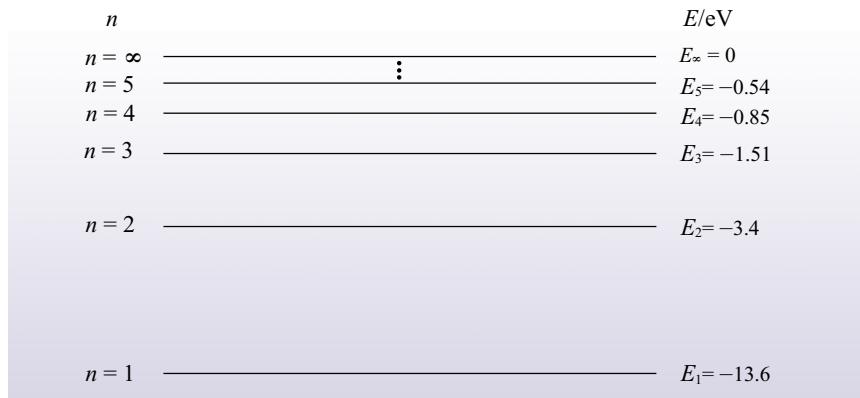


图2-16 氢原子能级结构图



### 拓展一步

设氢原子中电子运动的轨道半径为 $r$ , 速率为 $v$ , 电子与原子核之间的库仑力提供了电子绕核运动的向心力, 有

$$\frac{mv^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2}$$

将上式与电子轨道条件 $m_e vr = n \frac{h}{2\pi}$ 联立, 得

$$r = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 k m e^2}$$

假定原子核静止不动, 原子的总能量是电子动能与电子在核外电场中的电势能之和。把电子在离核无穷远处的电势能规定为电势能的零点, 电子在距核为 $r$ 的轨道上的电势能

$$E_p = -k \frac{e^2}{r}$$

电子的总能量

$$E = \frac{1}{2} mv^2 - k \frac{e^2}{r} = -\frac{1}{2} \frac{ke^2}{r}$$

将解出的 $r$ 代入上式, 即得到氢原子核外电子在轨道上运动的能量公式

$$E_n = -\frac{2\pi^2 k^2 m e^4}{n^2 h^2} \approx -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$



## 讨论与交流

当电子从离原子核较近的轨道跃迁到离原子核较远的轨道上时，电子受原子核的作用力怎样变化？电子的电势能怎样变化？在玻尔的氢原子能级公式中，势能是负值，总能量也是负值，能否反映原子能量的实际情况？

玻尔理论能够解释氢原子光谱的特征。在正常或稳定状态时，原子尽可能处于最低能级，电子受核的作用力最大而处于离核最近的轨道，这时原子的状态叫做**基态** (ground state)。电子吸收能量后，从基态跃迁到较高的能级，这时原子的状态叫做**激发态** (excited state)。当电子从高能级跃迁到低能级时，原子会辐射能量；当电子从低能级跃迁到高能级时，原子要吸收能量。因为电子的能级是不连续的，所以原子在跃迁时吸收或辐射的能量都不是任意的，这个能量等于电子跃迁时始末两个能级间的能量差。能量差值不同，发射的光频率也不同，我们就能观察到不同颜色的光（图 2-17）。

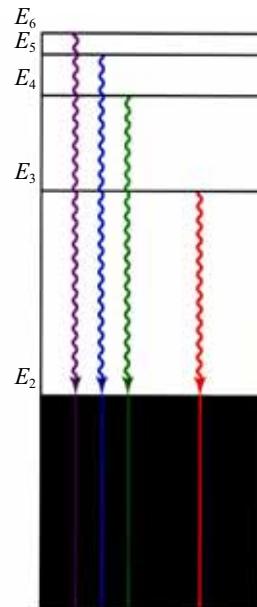


图 2-17 电子跃迁发出不同颜色的光

## 例题

当氢原子从  $n=2$  的能级跃迁到  $n=1$  的能级时，计算所辐射的光子的能量、频率和波长。

**解** 根据

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

$$E_2 = -13.6 \times \frac{1}{2^2} = -3.4 \text{ eV} \quad E_1 = -13.6 \times \frac{1}{1^2} = -13.6 \text{ eV}$$

辐射光子的能量为

$$\Delta E = E_2 - E_1 = [-3.4 - (-13.6)] \text{ eV} = 10.2 \text{ eV}$$

光子的频率为

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{10.2 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} \text{ Hz} \approx 2.46 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

光子的波长为

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3.0 \times 10^8}{2.46 \times 10^{15}} \text{ m} \approx 1.22 \times 10^{-7} \text{ m} = 122 \text{ nm}$$



- 玻尔理论中哪些方面引入了量子概念?
  - 计算氢原子的第2、3、4轨道的半径和电子在这些轨道上的能量。
  - 根据玻尔的氢原子能级公式,说明当量子数n增大时,能级怎样变化,能级间的间隔怎样变化。
  - 根据上题算出的结果,说明要把基态( $n=1$ )的氢原子激发到 $n=2$ 的能级上,需要供给电子多大的能量?如果用电磁波来供给这个能量,它的波长应符合什么条件?属于哪个波段?
  - 根据氢原子的玻尔模型,核外电子在第1、3轨道上运动时,下列说法正确的是
 

(A) 轨道半径之比为1:9	(B) 速率之比为3:1
(C) 周期之比为1:3	(D) 能量之比为9:1
  - 1951年,物理学家发现了“电子偶素”。所谓“电子偶素”,就是由一个负电子和一个正电子绕它们的质量中心旋转形成的相对稳定的系统。设正、负电子的质量均为m,“电子偶素”中,正、负电子绕它们的质量中心做匀速圆周运动的轨道半径、运动速度及电子的质量满足玻尔轨道量子化理论 $2mr\nu = \frac{n\hbar}{2\pi}$ ( $n=1, 2, 3, \dots$ ),“电子偶素”的能量为正、负电子运动的动能和系统的电势能之和。正、负电子相距为l时,系统的电势能 $E = -\frac{ke^2}{l}$ ,试求:
    - $n=1$ 时“电子偶素”的能量。
    - “电子偶素”由第1激发态跃迁到基态发出光子的波长。



## 第4节 氢原子光谱与能级结构

### 1. 氢原子光谱

把纯氢、汞蒸气、氖气等气体充进玻璃管，接入高电压，就会发出五颜六色的光，霓虹灯便是这样发光的。将这些可见光用三棱镜分光之后，可以看到不同颜色的光谱线（图2-18）。

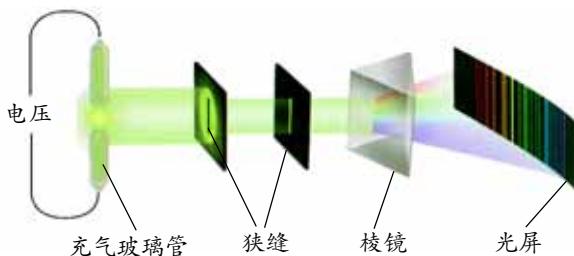


图2-18 氢原子光谱的观察

图2-19是拍出的H、Hg、Ne的光谱。

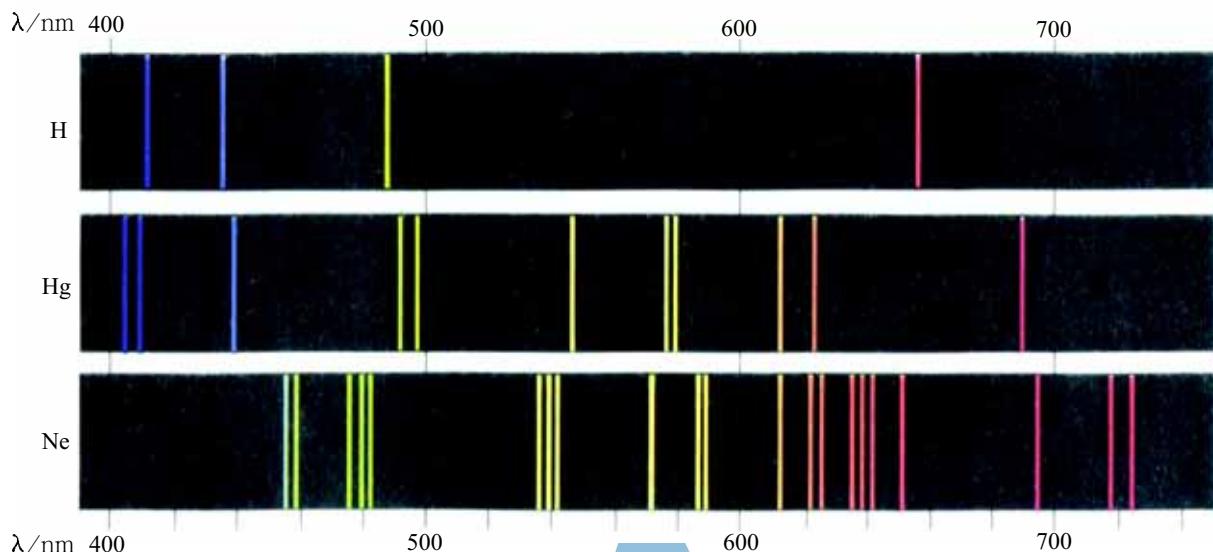
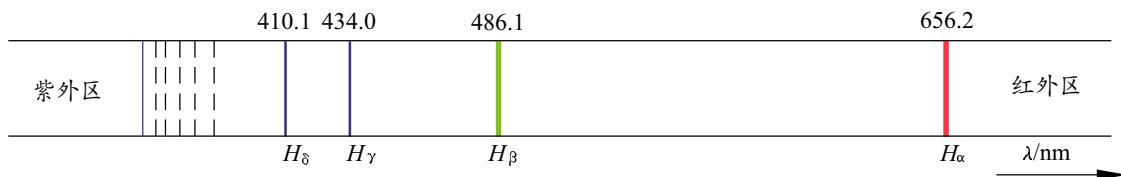


图2-19 H、Hg、Ne的光谱线

氢原子光谱的特点之一是：从红外区到紫外区呈现多条具有确定波长的谱线  $H_\alpha$ 、 $H_\beta$ 、 $H_\gamma$ 、 $H_\delta$  等（图 2-20）。利用专门的仪器和方法，可以测得它们的波长分别为：



红色的  $H_\alpha$  线，波长为 656.2 nm；

蓝绿色的  $H_\beta$  线，波长为 486.1 nm；

青色的  $H_\gamma$  线，波长为 434.0 nm；

紫绿色的  $H_\delta$  线，波长为 410.1 nm。

这几个波长数值成了氢原子的“印记”，不论是何种化合物的光谱，只要它里面含有这些波长的光谱线，我们就能断定这种化合物里一定含有氢。

氢原子光谱的特点之二是：从长波到短波， $H_\alpha \sim H_\delta$  等谱线间的距离越来越小，表现出明显的规律性。瑞士数学家巴尔末 (J.J.Balmer, 1825—1909) 找出了规律

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

式中， $R$  叫做 **里德伯常量**

$$R = 1.096\ 775\ 81 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

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

### 拓展一步

巴尔末找出的规律对应的是氢原子可见光谱系列，因此氢原子可见光谱被称为巴尔末线系。后来，人们又先后发现了氢原子光谱的其他线系的规律，如在紫外区的赖曼线系，波长公式为

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

在红外区的帕邢线系，其波长公式为

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

这些经验公式都能很好地解释实验结果。



## 2. 玻尔理论对氢光谱的解释

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

由玻尔理论可知，当激发到高能级  $E_2$  的电子跃迁到低的能级  $E_1$  时，就会释放出能量。根据

$$E_n = \frac{-13.6}{n^2} \text{ eV} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

得  $E_2 = \frac{-13.6}{n_2^2} \text{ eV}$ ,  $E_1 = \frac{-13.6}{n_1^2} \text{ eV}$

再根据  $\nu = E_2 - E_1$

得  $\nu = \frac{13.6}{h} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$

此式在形式上与氢原子光谱规律的波长公式一致，当  $n_1=2$ ,  $n_2=3, 4, 5, 6, \dots$  时就是巴尔末公式。原子从相应的能级跃迁到  $n=2$  的能级，得到氢原子巴尔末系的光谱线（图 2-21）。

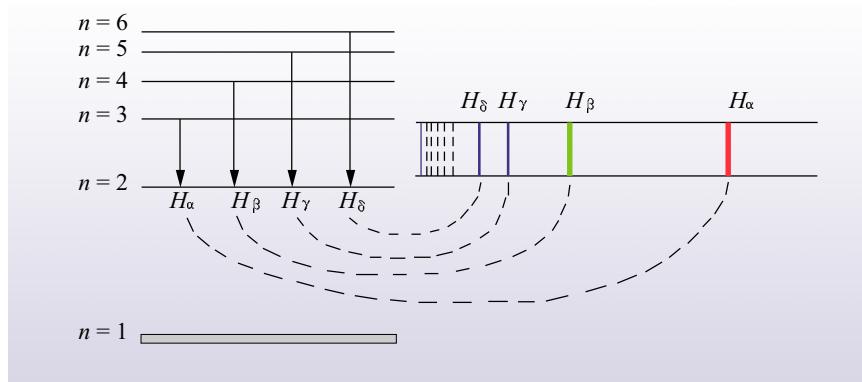


图 2-21 氢原子光谱巴尔末系的形成

玻尔理论冲破了经典物理中能量连续变化的束缚，解释了原子结构和氢原子光谱的关系，使卢瑟福—玻尔原子模型以及能量量子化、能级、跃迁等概念得到承认。然而，玻尔理论无法计算光谱的强度，对于其他元素更为复杂的光谱（包括氦原子光谱），理论与实验差别很大。玻尔在推导电子绕原子核运动的轨道半径时，是根据电子以库仑力为绕核运动向心力而求得的，完全是经典力学的方法。而假定电子轨道是量子化的，并根据量子化能量计算光的发射和吸收频率，是一种量子论的方法。因此，玻尔理论是一种半经典的量子论。

从汤姆孙到卢瑟福再到玻尔，科学家对原子结构的认识是不断深入的。科学探索是曲折而长期的过程，在此过程中，不仅显示了科学家的智慧，而且展示了他们对科学的执着追求和无私奉献精神。

### 信息窗

玻尔原子理论也得益于氢原子光谱的启示。1913年2月初的一天，玻尔的一位好友——光谱学家汉森向他介绍氢光谱的巴尔末公式和斯塔克的著作时，玻尔突然间领悟到，光谱不就是原子的照片吗？分立的谱线不正与原子量子化能量相联系吗？后来玻尔回忆道：“当我一看到巴尔末公式，我对整个事情就豁然开朗了”。

### 作业

1. 请根据巴尔末公式  $\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ ，计算当  $n = 3, 4, 5, 6$  时的波长，并与实验结果对比。
2. 一群氢原子从  $n = 4$  的激发态自发地向较低能级跃迁，最多可放出多少条频率不同的光谱线？在这些谱线中，有几条在可见光区域？
3. 当氢原子从某能级跃迁到  $n = 3$  的能级时，辐射一个波长为 1 282 nm 的光子，求氢原子在初始能级上的能量及其量子数，并说明所辐射的光属于哪个线系。
4. 根据玻尔理论，与  $H_\alpha$ 、 $H_\beta$  谱线相应的光子的能量应该是多少电子伏特？根据实验测得的  $H_\alpha$ 、 $H_\beta$  的波长算出光子的能量是多少电子伏特？二者是否一致？
5. 为什么说玻尔的理论是一种半经典的量子论？

### 提问