

教材习题解答

第十六章

动量守恒定律

第1节 实验:探究碰撞中的不变量

(问题与练习 P₅)

1. 2 球的质量与增加的速度的乘积

$$m_2 \Delta v_2 = 0.1 \times 9 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 0.9 \text{ kg} \cdot \text{m/s}。$$

1 球的质量与减少的速度的乘积

$$m_1 \Delta v_1 = 0.3 \times (8 - 5) \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 0.9 \text{ kg} \cdot \text{m/s}，$$

显然 2 球质量与速度乘积的增加量等于 1 球质量与速度乘积的减少量。

2. 从打点计时器打出的纸带可以看出, A 车在碰撞前是做匀速直线运动的, 其速度大小为:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{3T} = \frac{5.60 \times 10^{-2}}{3 \times 0.02} \text{ m/s} = 0.93 \text{ m/s}。$$

A 车和 B 车碰后连在一起做匀速直线运动的速度为:

$$v' = \frac{\Delta x'}{\Delta t} = \frac{\Delta x'}{5T} = \frac{4.50 \times 10^{-2}}{5 \times 0.02} \text{ m/s} = 0.45 \text{ m/s}。$$

碰撞前 A 车质量和速度的乘积为:

$$m_A v = 0.6 \times 0.93 \text{ kg} \cdot \text{m/s} \approx 0.56 \text{ kg} \cdot \text{m/s}。$$

碰撞后 A 车和 B 车质量和各自速度乘积之和:

$$(m_A + m_B) v' = (0.6 + 0.6) \times 0.45 \text{ kg} \cdot \text{m/s} \\ = 0.54 \text{ kg} \cdot \text{m/s}。$$

由以上计算可知, 在误差允许范围内, 碰撞前后两个物体各自的质量与它的速度的乘积之和是相等的。

第2节 动量和动量定理

(问题与练习 P₁₁)1. (1) 初动量为 $p_0 = mv_0 = 2 \times 3 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 6 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$;末动量为 $p = mv = 2 \times 6 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 12 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 。

因此, 动量增大为原来的 2 倍。

$$\text{初动能为 } E_{k0} = \frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{1}{2} \times 2 \times 3^2 \text{ J} = 9 \text{ J};$$

$$\text{末动能为 } E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \times 2 \times 6^2 \text{ J} = 36 \text{ J}。$$

因此, 动能增大为原来的 4 倍。

(2) 动量变化了, 动能没有变化。

取向东为正方向, 则物体的末速度为 $v' = -3 \text{ m/s}$, 动量变化量为 $\Delta p = mv' - mv = [2 \times (-3) - 2 \times 3] \text{ kg} \cdot \text{m/s} = -12 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 。

负号表示动量改变量的方向与正方向相反, 即向西。

(3) 取向东为正方向, 则 B 物体的速度为

$$v_B = -4 \text{ m/s}, \text{ 两物体动量之和为 } p = m_A v_A + m_B v_B = [2 \times 3 + 3 \times (-4)] \text{ kg} \cdot \text{m/s} = -6 \text{ kg} \cdot \text{m/s}。$$

$$\text{动能之和为 } E_k = \frac{1}{2} m_A v_A^2 + \frac{1}{2} m_B v_B^2 = \left(\frac{1}{2} \times 2 \times 3^2 + \frac{1}{2} \times 3 \times 4^2 \right) \text{ J} = 33 \text{ J}。$$

说明: 动量是矢量, 单位是千克米每秒; 动能是标量, 单位是焦耳。运算法则不同, 动量遵循矢量的平行四边形定则, 动能遵循代数加减法则。

2. B、D 选项正确。因为根据题意, 由动量定理、动能定理和题意可知 $Ft = p$, $Ft = E_k$ 。解得 $p = \sqrt{2mE_k} = \sqrt{2mFl}$, $E_k =$
 $\frac{p^2}{2m} = \frac{F^2 l^2}{2m}$ 。由前两式可以判断 B、D 选项正确。由第三式可判断 A 选项错误, 由第四式可判断 C 选项错误。
3. 取初速度方向为正方向, 根据动量定理, 有 $F(t' - t) = mv' - mv$, $F = \frac{mv' - mv}{t' - t} = \frac{10 \times (-2) - 10 \times 10}{4} \text{ N} = -30 \text{ N}。$

该力大小为 30 N, 方向与初速度的方向相反。

4. 撞击前, 铁锤只受重力作用, 机械能守恒, 因此 $\frac{1}{2} m v^2 = mgh$ 。可以求出打击前铁锤的速度 v 为

$$v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 10 \times 5} \text{ m/s} = 10 \text{ m/s}。$$

撞击时, 铁锤受到重力和桩对铁锤竖直向上的冲击力, 撞击后铁锤的速度为 0。设桩对铁锤的冲击力大小为 F , 取竖直向下为正方向, 根据动量定理, 有 $(-F + mg) \Delta t = 0 - mv$,

$$\text{解出 } F = mg + \frac{mv}{\Delta t} = \left(40 \times 10 + \frac{40 \times 10}{0.05} \right) \text{ N} = 8400 \text{ N}。$$

根据牛顿第三定律, 铁锤对桩的平均冲击力的大小也为 8400 N, 方向竖直向下。

5. 体操运动员在着地时, 动量的改变量是一个定值, 通过屈腿, 可以增长作用时间, 由动量定理可知, 将会减小地面对运动员的作用力, 从而使运动员避免受伤。

6. 因为在光滑冰面上的摩擦力可以忽略, 因此可以认为甲、乙两人组成的系统所受外力的矢量和为 0, 满足动量守恒定律的条件。所以, 甲推乙后, 他们的总动量仍为 0。甲、乙两人各自的动量大小相等、方向相反, 矢量和为 0。

设甲、乙的速率分别为 $v_{\text{甲}}$ 和 $v_{\text{乙}}$, 取甲的运动方向为正方向, 根据动量守恒定律, 有 $0 = m_{\text{甲}} v_{\text{甲}} + m_{\text{乙}} (-v_{\text{乙}})$,

$$\text{由此解出 } \frac{v_{\text{甲}}}{v_{\text{乙}}} = \frac{m_{\text{乙}}}{m_{\text{甲}}} = \frac{50}{45} = 1.1。$$

第3节 动量守恒定律

(问题与练习 P₁₆)

1. 研究对象是人(包括锤)和平板车组成的系统。用锤打车, 是人、车系统的内力作用。在光滑水平面上, 系统所受外力的矢量和为 0, 所以系统的总动量守恒。人和车的初动量为 0。如果在锤的连续敲击下, 平板车能持续向右行驶, 则系统的总动量将不为 0, 这违反了动量守恒定律, 因此是不可能的。根据动量守恒定律, 举起锤头的过程, 锤头向左运动, 车就向右运动; 把锤头打下去的过程, 锤头向右运动, 车就向左运动; 用锤头连续敲击时, 车只是左右运动, 一旦锤头不动, 车就停下来。

2. 由于在 A、B 的运动过程中, 除了两者之间的相互作用力, 其他的力可以忽略, 即 A、B 组成的系统所受外力的矢量和为 0, 满足动量守恒定律的条件。取初速度方向为正方向, 根据动量守恒定律, 有 $m_A v_A + m_B v_B = m_A v_A' + m_B v_B'$ 。

$$\text{由此解出 } v_A' = \frac{m_A v_A + m_B v_B - m_B v_B'}{m_A} = \frac{5 \times 9 + 2 \times 6 - 2 \times 10}{5} \text{ m/s} = 7.4 \text{ m/s}。$$

A 的速度大小为 7.4 m/s, 方向与初速度方向相同。

3. 因为木块在光滑水平桌面上, 所受的摩擦力为 0, 且子弹与木块的相互作用属于系统的内力, 因此整个系统所受外力的矢量和为 0, 满足动量守恒定律的条件。

取子弹的初速度方向为正方向。

若子弹留在木块中,已知子弹的质量 $m_1 = 1.0 \times 10^{-2} \text{ kg}$, 初速度 $v_1 = 300 \text{ m/s}$, 木块的质量 $m_2 = 2.4 \times 10^{-2} \text{ kg}$, 初速度 $v_2 = 0$, 根据动量守恒定律, 有 $m_1 v_1 = (m_1 + m_2) v$,

由此解出 $v = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2} = \frac{1.0 \times 10^{-2} \times 300}{1.0 \times 10^{-2} + 2.4 \times 10^{-2}} \text{ m/s} = 88.2 \text{ m/s}$ 。

若子弹穿过木块后, 末速度 $v_1' = 100 \text{ m/s}$, 根据动量守恒定律, 有 $m_1 v_1 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$ 。

由此解出 $v_2' = \frac{m_1 v_1 - m_1 v_1'}{m_2} = \frac{1.0 \times 10^{-2} \times (300 - 100)}{2.4 \times 10^{-2}} \text{ m/s} =$

83.3 m/s 。

4. A 以速度 v 向静止的 B 飞去时, A 的速度会减小, B 的速度会增大, 二者之间的距离缩小。当它们的距离最近时, 二者速度相同, 设这个速度为 v' , 根据动量守恒定律, 有 $m_A v + 0 = (m_A + m_B) v'$, $m_A v = (m_A + 4m_A) v'$, $v' = 0.2v$ 。

5. 取机车和 15 节车厢为系统, 所有的碰撞过程中系统的合外力为 0, 故动量守恒。根据动量守恒定律, 有 $mv_0 = (m + 15m) v'$ 。由此解出 $v' = \frac{v_0}{16} = \frac{0.8}{16} \text{ m/s} = 0.05 \text{ m/s}$ 。

6. 取甲物体碰撞前的速度方向为正方向。碰撞前, $v_{\text{甲}} = 6 \text{ m/s}$, $v_{\text{乙}} = -2 \text{ m/s}$; 碰撞后, $v_{\text{甲}}' = -4 \text{ m/s}$, $v_{\text{乙}}' = 4 \text{ m/s}$ 。根据动量守恒定律, 有 $m_{\text{甲}} v_{\text{甲}} + m_{\text{乙}} v_{\text{乙}} = m_{\text{甲}} v_{\text{甲}}' + m_{\text{乙}} v_{\text{乙}}'$ 。

由此解出 $\frac{m_{\text{甲}}}{m_{\text{乙}}} = \frac{v_{\text{乙}}' - v_{\text{乙}}}{v_{\text{甲}} - v_{\text{甲}}'} = \frac{4 - (-2)}{6 - (-4)} = \frac{3}{5}$ 。

7. 设子弹射入沙袋前的速度为 v_0 , 射入后子弹与沙袋的共同速度为 v_1 , 在子弹打沙袋的过程中, 根据动量守恒定律, 有

$$mv_0 = (m_1 + m) v_1。$$

子弹和沙袋沿圆弧向上摆至最高点的过程, 根据机械能守恒定律, 有 $\frac{1}{2}(m + m_1) v_1^2 + 0 = (m + m_1) gl(1 - \cos \theta)$ 。

联立上面两式, 解得 $v_0 = \frac{m + m_1}{m} \sqrt{2gl(1 - \cos \theta)}$ 。

第4节 碰撞

(问题与练习 P₂₁)

1. 以质量为 600 g 的滑块的初速度 v_1 的速度方向为正方向, 根据动量守恒定律, $m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'$ 。

$$v' = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} = \frac{600 \times 15 + 400 \times (-10)}{600 + 400} \text{ cm/s} = 5 \text{ cm/s}。$$

碰后滑块的速度大小为 5 cm/s, 方向与质量为 600 g 的滑块的初速度的方向相同。

2. 若 A 和 B 的碰撞是弹性碰撞, 则根据动量守恒和机械能守恒

可以解得 B 获得的最大速度为 $v_{\text{max}} = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v = \frac{2m}{m + 3m} v = 0.5v$ 。

若 A 和 B 的碰撞是完全非弹性碰撞, 则碰撞之后二者连在一起运动, B 获得最小的速度, 根据动量守恒定律, $m_1 v = (m_1 +$

$$m_2) v_{\text{min}} \quad v_{\text{min}} = \frac{mv}{m + 3m} = 0.25v。$$

B 获得的速度 v_B 应满足: $v_{\text{min}} \leq v_B \leq v_{\text{max}}$, 即 $0.25v \leq v_B \leq 0.5v$ 。

可见, B 球的速度可以是 $0.4v$, 不可能是 $0.2v$ 和 $0.6v$ 。

3. 由于碰撞是弹性的, 根据动量守恒与机械能守恒可以解得碰撞之后二者的速度分别为

$$\begin{aligned} \text{氦核: } v_1' &= \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v = \frac{4m - m}{4m + m} v = \frac{3}{5} \times 10^3 \text{ m/s} \\ &= 6 \times 10^2 \text{ m/s}。 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{质子: } v_2' &= \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v = \frac{2 \times 4m}{4m + m} v = \frac{8}{5} \times 10^3 \text{ m/s} \\ &= 1.6 \times 10^3 \text{ m/s}。 \end{aligned}$$

4. 中子和原子核的碰撞可以看成是弹性碰撞, 设中子的质量为 m_1 , 碰撞前速度为 v , 方向为正方向, 原子核的质量为 m_2 , 碰撞前可以认为是静止的, 则碰撞后中子的速度为 $v' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v$ 。

由于中子的质量一般小于原子核的质量, 因此 $|v'| = \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} v =$

$\left(1 - \frac{2m_1}{m_1 + m_2}\right) v$ 。可见, m_2 越小, $|v'|$ 越小。故应选用质量较小的原子核来降低中子的速率。核电站常常用石墨(碳)作为中子减速剂。

5. 设未知粒子的质量为 m , 碰撞前其速度为 v , 它与氢和氮原子核的碰撞都是弹性的, 所以碰撞后氢原子核的速度为 $v_{\text{H}} =$

$$\frac{2m}{m + m_{\text{H}}} v。 \quad \text{氮原子核的速度为 } v_{\text{N}} = \frac{2m}{m + m_{\text{N}}} v = \frac{2m}{m + 14m_{\text{H}}} v。$$

两式联立, 解得未知粒子的质量为 $1.16m_{\text{H}}$ 。

6. 没有多大影响。因为内力远大于外力时系统动量仍然近似守恒。

第5节 反冲运动 火箭

(问题与练习 P₂₄)

1. 喷气后, 宇航员做匀速直线运动的速度为

$$v_1 = \frac{\Delta x}{t} = \frac{45}{10 \times 60} \text{ m/s} = 0.075 \text{ m/s}。$$

设喷气前总质量为 m_1 , 喷气过程喷出的气体质量为 m_2 , 取喷气后宇航员的速度方向为正方向, 由动量守恒定律, 列方程 $0 = (m_1 - m_2) v_1 + m_2 v_2$ 。

$$\text{解得 } m_2 = \frac{v_1}{v_1 - v_2} m_1 = \frac{0.075 \times 100}{0.075 - (-50)} \text{ kg} = 0.15 \text{ kg}。$$

2. 设飞机的质量为 m_1 , 喷出的气体质量为 m 。取飞机喷气前速度 v_0 的方向为正方向, 喷出的气体的速度为 v_1 , v_1 的方向与 v_0 相同, 但 $v_0 > v_1$, 由动量守恒定律, 列方程 $(m_1 + m) v_0 =$

$$mv_1 + m_1 v_2。 \quad \text{解得 } v_2 = v_0 + \frac{m(v_0 - v_1)}{m_1}。$$

由于 $v_0 > 0$, $v_1 > 0$, 且 $v_0 > v_1$, 故有 $v_2 > v_0$, 因此飞机的速度还会增加。

3. 设皮划艇、枪(含子弹)及人整个系统的质量为 m , 每发子弹的质量为 m_0 , 子弹射出运动的方向为正方向, 子弹相对步枪的速度大小为 u 。

(1) 设第 1 次射击后艇的速度大小为 v_1 , 由动量守恒定律有

$$0 = (m - m_0) v_1 + m_0 (v_1 - u)。$$

$$v_1 = \frac{m_0 u}{m}。$$

设第 2 次射击后艇的速度大小为 v_2 , 由动量守恒定律有

$$(m - m_0) v_1 = (m - 2m_0) v_2 + m_0 (v_2 - u)。$$

$$v_2 - v_1 = \frac{m_0 u}{m - m_0}。$$

设第 3 次射击后艇的速度大小为 v_3 , 由动量守恒定律有

$$(m - 2m_0) v_2 = (m - 3m_0) v_3 + m_0 (v_3 - u)。$$

$$v_3 - v_2 = \frac{m_0 u}{m - 2m_0}。$$

同理, 第 10 次射击后艇的速度大小为 v_{10} , 由动量守恒定律有

$$(m - 9m_0) v_9 = (m - 10m_0) v_{10} + m_0 (v_{10} - u)。$$

$$v_{10} - v_9 = \frac{m_0 u}{m - 9m_0}。$$

所以, 设射出子弹 n 发, 则每次射击后皮划艇速度的改变量

$$\text{为 } \Delta v = \frac{m_0 u}{m - (n-1)m_0} = \frac{8}{120.01 - 0.01n} \text{ m/s}。$$

(2) 连续射击 10 次后, 可得

$$\begin{aligned}
 v_{10} &= \frac{m_0 u}{m} + \frac{m_0 u}{m - m_0} + \cdots + \frac{m_0 u}{m - 9m_0} \\
 &= \left(\frac{0.01 \times 800}{120} + \frac{0.01 \times 800}{120 - 0.01} + \cdots + \frac{0.01 \times 800}{120 - 9 \times 0.01} \right) \text{ m/s} \\
 &= 8 \times \left(\frac{1}{120} + \frac{1}{120 - 0.01} + \cdots + \frac{1}{120 - 9 \times 0.01} \right) \text{ m/s} \\
 &\approx 8 \times \frac{10}{120} \text{ m/s} \approx 0.67 \text{ m/s}.
 \end{aligned}$$

(3) 对整个过程应用动量定理, 得

$$Ft = (m - 10m_0)v_{10} - 0.$$

$$F = \frac{(m - 10m_0)v_{10}}{t} = \frac{(120 - 10 \times 0.01) \times \frac{2}{3}}{2} \text{ N} \approx 40 \text{ N}.$$

第十七章

波粒二象性

第1节 能量量子化

(问题与练习 P₃₀)

1. D

2. 由 $\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$ 得 400 nm 电磁辐射的能量子

$$\varepsilon_1 = h \frac{c}{\lambda_1} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{4 \times 10^{-7}} \text{ J} = 4.97 \times 10^{-19} \text{ J};$$

760 nm 电磁辐射的能量子

$$\varepsilon_2 = h \frac{c}{\lambda_2} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{7.6 \times 10^{-7}} \text{ J} = 2.62 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

3. 开水向外辐射的每一份能量子能量很小(微量), 而水降低 1 °C 释放的能量很大(宏观量), 由于温度计的精度不够, 所以观察到的温度计温度不是一段一段地降低的。

第2节 光的粒子性

(问题与练习 P₃₆)

1. 紫光的光子能量最大。这种光不一定最亮, 因为人对光的亮度的感觉除了光子的能量大小外, 还和光子的多少及人对某种光的敏感程度有关。

2. (1) 入射光强度增加, 单位时间内发射的光电子数增加。

(2) 入射光频率增加, 逸出光电子的最大初动能增大。

3. 紫光光子的频率大于绿光光子频率, 紫光光子能量大于绿光光子能量, 红光光子频率小于绿光光子的频率, 红光光子能量小于绿光光子能量。因此, 用紫光照射时能发生光电效应, 用红光照射时不能发生光电效应; 由光电效应方程 $E_k = h\nu - W$ 可知, A、B 两种金属的极限频率不同, 故用同种光照射时, 逸出的光电子最大初动能不同, 光电子的最大速度大小不同。

4. 根据爱因斯坦光电效应方程 $h\nu = E_k + W_0$ 可得 $E_k = \frac{hc}{\lambda} - W_0$ 可求得最大初动能。由 $E_k = eU_c$ 可求得遏止电压。铝的截止频率由 $\nu_c = \frac{W_0}{h}$ 可求。

(1) 根据光电效应方程 $h\nu = E_k + W_0$ 可求得 $E_k = \frac{hc}{\lambda} - W_0 = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3.0 \times 10^8}{200 \times 10^{-9}} \text{ J} - 4.2 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = 3.225 \times 10^{-19} \text{ J}.$

(2) 由 $E_k = eU_c$ 可得: $U_c = \frac{E_k}{e} = \frac{3.225 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} \text{ V} = 2.016 \text{ V}.$

(3) 由 $h\nu_c = W_0$ 知 $\nu_c = \frac{W_0}{h} = \frac{4.2 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} \text{ Hz} = 1.014 \times 10^{15} \text{ Hz}.$

5. 在此电路的光电管上施加反向电压, 用已知频率为 ν_1 的光照射阴极 K, 调节电压大小, 直到光电管刚好无电流通过, 测出此时的遏止电压 U_{c1} , 用另一已知频率为 ν_2 的光照射, 测出遏止电压 U_{c2} 。利用光电效应方程 $h\nu_1 = W_0 + E_{k1}$ 和 $E_{k1} = eU_{c1}$ 可得: $h\nu_1 = W_0 + eU_{c1}$, $h\nu_2 = W_0 + eU_{c2}$ 。

由以上两式可解出 $h = \frac{e(U_{c1} - U_{c2})}{\nu_1 - \nu_2}$ 。

6. 散射光子的频率比原来光子的频率小。

入射光子与一个静止电子碰撞, 要把一部分动量转移给电子, 因而光子动量变小。

从 $p = \frac{h}{\lambda}$ 看, 动量 p 减小意味着波长 λ 变大, 因此散射后光子波长变大, 频率变小。

第3节 粒子的波动性

(问题与练习 P₄₀)

1. 光的干涉、衍射说明光不可怀疑地具有波动性, 光电效应和康普顿效应又说明光具有粒子性, 即光具有波粒二象性。

2. 电子的德布罗意波长 $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}}$, 动能相同时, 质量越小, 波长越长。

3. 不会“失准”。一个质量为 0.01 kg, 速度为 300 m/s 的子弹, 它的德布罗意波长只有 $2.2 \times 10^{-34} \text{ m}$, 比宏观物体的尺度小得多, 根本无法观察到它的波动性, 忽略它的波动性也不会引起大的偏差, 所以不会“失准”。

第4节 概率波

(问题与练习 P₄₂)

1. 不对。在双缝干涉实验中, 假使光很弱, 弱到光子一个一个地射向胶片(这时排除了光子间有相互作用), 在照射时间足够长时, 胶片上最终还是形成了干涉图样, 这说明波动性不是由一些光子间相互作用引起的, 而是单个光子的固有属性。

2. 在光的双缝干涉实验中, 某个光子打在光屏上的落点根本不能预测, 但大量光子打在光屏上将形成明暗相间的干涉条纹, 这说明光子落在各点的概率是不一样的, 光子落在明纹处的概率大, 落在暗纹处的概率小。光子在空间出现的概率遵循波动规律。所以光波是一种概率波。

3. 由公式 $\varepsilon = h\nu$, 得 $\varepsilon_1 = h\nu_1 = 6.63 \times 10^{-34} \times 10^6 \text{ J} = 6.63 \times 10^{-28} \text{ J}.$

$$\varepsilon_2 = h\nu_2 = 6.63 \times 10^{-34} \times 6 \times 10^{14} \text{ J} = 3.978 \times 10^{-19} \text{ J}.$$

$$\varepsilon_3 = h\nu_3 = 6.63 \times 10^{-34} \times 10^{18} \text{ J} = 6.63 \times 10^{-16} \text{ J}.$$

低频电磁波的光子能量小, 波长长, 容易观察到干涉和衍射现象, 波动性显著, 在衍射的亮纹处表示到达的光子数多, 概率大, 而在暗纹处表示到达的光子数少, 概率小。相比之下, 高频电磁波光子能量大, 波长极短, 很难找到使其发生明显衍射的狭缝或障碍物, 因而波动性不容易观察到, 粒子性显著。

第5节 不确定性关系

(问题与练习 P₄₅)

1. 例: 一个质量为 m 的小球做自由落体运动, 经时间 t , 下落高度: $h = \frac{1}{2}gt^2$, 动量: $p = mgt$ 。

2. 例: 微观粒子的单缝衍射实验中, 狭缝越窄, 粒子的位置不确定量越小, 而动量不确定量却越大, 在微观物理学中牛顿运动定律不成立。

3. 这种说法不对。例如在单缝衍射现象中, 当粒子数很少时,

我们不能预言粒子通过挡板上的狭缝后落在屏上的位置,但却可以准确地知道粒子落在屏上某点的概率;概率大的位置正好是某种波通过狭缝发生衍射时产生亮条纹的位置。

4. 在单缝衍射现象中,光子在到达狭缝之前沿水平方向运动,而在经过狭缝之后有些光子跑到投影位置以外,我们可以说这些光子具有与其原来运动方向垂直的动量。由于哪个光子到达光屏上的哪个位置完全是随机的,所以光子在垂直方向上的动量也具有不确定性,不确定量的大小可以由中央亮条纹的宽度来衡量。

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

第十八章

原子结构

第1节 电子的发现

(问题与练习 P₅₀)

1. 汤姆孙通过测定阴极射线的电性实验,测得阴极射线中含有带负电的粒子,然后通过测定阴极射线中负粒子的比荷的大小(通过带电粒子在电磁场中的运动实验),从而推理得到阴极射线中的粒子是电子。

2. 据动能定理得 $eU = \frac{1}{2}mv^2$, 所以 $v = \sqrt{2eU/m} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 4 \times 10^3}{9.1 \times 10^{-31}}} \text{ m/s} = 3.75 \times 10^7 \text{ m/s}$ 。

3. 油滴的体积 $V = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3} \times 3.14 \times (1.64 \times 10^{-4} \times 10^{-2})^3 \text{ m}^3 = 1.847 \times 10^{-17} \text{ m}^3$ 。

油滴的质量 $m = \rho V = 0.851 \times 10^3 \times 1.847 \times 10^{-17} \text{ kg} = 1.572 \times 10^{-14} \text{ kg}$ 。

设油滴中有 N 个电子。

因油滴所受库仑力与重力平衡,所以有 $mg = Eq = E \cdot N \cdot e$,

即 $N = \frac{mg}{Ee} = \frac{1.572 \times 10^{-14} \times 9.8}{1.92 \times 10^5 \times 1.6 \times 10^{-19}} = 5(\text{个})$ 。

所以这个油滴带有约 5 个电子的电荷。

4. 因电子在正交的电场、磁场中不偏转且匀速直线运动,所以有 $Bev = Ee = \frac{U}{d}e$, 所以 $v = \frac{U}{Bd}$ ①, 电子在只有偏转电场时,偏转距离设为 y_1 , 则由几何关系知

$\frac{y_1}{y} = \frac{l}{L}$, 所以 $y_1 = \frac{yl}{2L}$ ②,

而 $y_1 = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \frac{Uel^2}{mdv^2}$ ③,

由①②③得, 电子的比荷 $\frac{e}{m} = \frac{Uy}{B^2 d l L}$

$$= \frac{200 \times 3.0 \times 10^{-2}}{(6.3 \times 10^{-4})^2 \times 1.50 \times 10^{-2} \times 5.00 \times 10^{-2} \times 12.50 \times 10^{-2}} \text{ C/kg}$$

$= 1.6125 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ 。

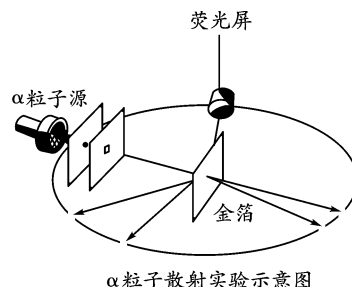
所以电子的比荷为 $1.6125 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ 。

第2节 原子的核式结构模型

(问题与练习 P₅₃)

1. 实验装置如图所示。在一个小铅盒里放有少量的放射性元素钋,它发出的 α 粒子从铅盒的小孔射出,形成很细的一束射线射到金箔上。 α 粒子穿过金箔后,打到荧光屏上产生一个个闪光点。整个装置放在一个抽成真空的容器里。荧光

屏和观察闪光的显微镜能够围绕金箔在一个圆周上运动。



α 粒子散射实验示意图

第1题图

实验现象及解释:

- (1) 绝大部分 α 粒子不偏转(说明原子内部绝大部分是空的)。
- (2) 有少数 α 粒子发生较大角度偏转(这一定不是电子作用的结果,而是原子中质量大的部分作用的结果)。
- (3) 大角度偏转的 α 粒子数很少(说明原子中质量大的一部分体积小,只有少数 α 粒子接近此部分时,才发生大角度偏转)。
2. 由于电子质量很小, α 粒子与之碰撞根本不会改变其运动方向, α 粒子穿过原子时,原子内部的正电荷均匀分布,故 α 粒子受到原子中两侧的正电荷的斥力绝大部分被抵消,因而使 α 粒子偏转的力不可能很大, α 粒子不可能有大角度偏转,沿直线前进的可能性最大。所以汤姆孙模型不能解释 α 粒子的大角度散射。
3. 原子内部有一个带正电的原子核,原子核体积很小,但几乎占有原子的全部质量,电子在原子核外绕核运动。卢瑟福提出这个模型的依据是 α 粒子散射实验结果:绝大多数 α 粒子穿过金箔后运动方向不变,少数 α 粒子发生较大角度偏转,极少数 α 粒子偏转角超过 90° , 有的几乎达到 180° , 沿原路返回。
4. 篮球大约是半径为 0.125 m 的球体,视为原子核,整个原子就是半径为 12.5 km 的球体。
5. 重金属原子核大,发生大角度偏转概率大,便于观察。

第3节 氢原子光谱

(问题与练习 P₅₆)

1. 由一条条亮线构成的光谱为线状谱;连续分布的含有连续波长的光带叫连续谱;原子的发射光谱是线状谱,不同原子的发射光谱不可能相同。
2. 由巴耳末公式 $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$, $n = 3, 4, 5, \dots$ 可知,氢原子光谱在可见光范围内波长最长的 2 条谱线所对应的 n 应为 3、4。
当 $n = 3$ 时,得 $\lambda_1 = 6.55 \times 10^{-7} \text{ m}$ 。
当 $n = 4$ 时,得 $\lambda_2 = 4.85 \times 10^{-7} \text{ m}$ 。
氢原子光谱是分立的线状谱。它在可见光区的谱线满足巴耳末公式,在红外和紫外光区的其他谱线也都满足与巴耳末公式类似的关系式。
3. 经典物理学在解释原子光谱是线状谱时遇到了困难。按照经典电磁理论,电子在核外做周期性运动,应该辐射电磁波,原子能量逐渐减少,电子绕核运行的轨道半径也要减小,电子将沿螺旋线的轨道落入原子核。电子绕核运行辐射的电磁波的频率等于电子绕核运行的频率。随着轨道半径连续变化,绕核频率也连续变化,辐射电磁波的频率也连续变化,由此可以推出:原子光谱是连续谱。这与原子光谱是线状谱的实验事实相矛盾。

第4节 玻尔的原子模型

(问题与练习 P₆₃)

1. 巴耳末公式 $n=5$ 时计算出的氢原子光谱的谱线是量子数为 5 的能级跃迁到量子数为 2 的能级形成的。

由 $n=2$ 时, $E_2 = -3.4 \text{ eV}$, $n=5$ 时, $E_5 = -0.54 \text{ eV}$, 及 $h\nu = E_5 - E_2$, $\nu = \frac{c}{\lambda}$, 有 $\lambda = \frac{hc}{E_5 - E_2} = 4.35 \times 10^{-7} \text{ m}$ 。

根据巴耳末公式 $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$, 得到

$$\lambda = \frac{1}{R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)} = 4.33 \times 10^{-7} \text{ m}。$$

2. 原子发光产生光谱是原子从高能级向低能级跃迁时把能量以光子形式释放出去而产生的。释放的光子能量为跃迁时两能级差, 由于原子能级分立而不连续, 所以光子能量分立, 发射光谱都是一些分立的亮线。
3. 3 种, $n=3$ 能级和 $n=1$ 能级。
4. 因原子吸收和释放能量发生能级跃迁只能是吸收或释放某两个能级间的能量差, 所以吸收光谱中的暗线与发射光谱中的亮线相对应。

第十九章

原子核

第1节 原子核的组成

(问题与练习 P₆₉)

1. 一种放射性元素, 不管它是以单质的形式存在, 还是以某种化合物的形式存在, 放射性都不受影响。也就是说, 放射性元素的化学状态无关。我们已经知道, 元素的化学性质决定于原子核外的电子数, 因此可以断定, 射线来自于原子核, 也就是说, 原子核是有内部结构的。
- 天然放射现象发现的意义: 原子核具有复杂的结构。实际上人们认识到原子核具有复杂结构就是从天然放射现象开始的。
2. γ 射线的速度等于光速, 光子能量越高时, 由 $E = h\nu$ 可知其频率越大, 又 $c = \nu\lambda$, 则其波长越短, 所以说电磁波的光子能量高, 它的波长就一定短。
3. 验电器的金属箔张角减小直至闭合。放射线具有电离本领, 照射验电器的放射线会同时照射其周围的空气, 使空气电离, 电离后出现的离子会把验电器上的静电中和掉。
4. 如果原子核只是由质子组成的, 那么, 某种原子核的质量跟质子质量之比, 应该等于这种原子核的电荷量跟质子电荷量之比。实际上, 绝大多数原子核的质量跟质子质量之比都大于原子核的电荷量跟质子电荷量之比。
5. (1) ${}_{92}^{238}\text{U}$ 或 ${}^{238}\text{U}$ (2) ${}_{6}^{12}\text{C}$ 或 ${}^{12}\text{C}$ (3) ${}_{6}^{14}\text{C}$ 或 ${}^{14}\text{C}$
(4) ${}_{8}^{17}\text{O}$ 或 ${}^{17}\text{O}$ (5) ${}_{2}^4\text{He}$ 或 ${}^4\text{He}$
6. (1) 钾的原子序数为 19, 即核电荷数为 19, 质子数为 19, 则中子数为 $40 - 19 = 21$ 。
- (2) ${}_{29}^{66}\text{Cu}$ 的核电荷数为 29, 所以质子数为 29, 则中子数为 $66 - 29 = 37$ 。
- (3) ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ 的核电荷数为 86, 所以质子数为 86, 则中子数为 $222 - 86 = 136$ 。

第2节 放射性元素的衰变

(问题与练习 P₇₃)

1. 原子核里虽然没有电子, 但是核内的中子可以转化成质子和电子, 产生的电子从核内发射出来, 这就是 β 衰变。
2. (1) ${}_{83}^{244}\text{Bi} \rightarrow {}_{84}^{244}\text{Po} + {}_{-1}^0\text{e}$; (2) ${}_{84}^{210}\text{Po} \rightarrow {}_{85}^{210}\text{At} + {}_{-1}^0\text{e}$ 。
3. (1) ${}_{90}^{234}\text{Th} \rightarrow {}_{88}^{230}\text{Ra} + {}_{2}^4\text{He}$; (2) ${}_{29}^{66}\text{Cu} \rightarrow {}_{27}^{62}\text{Co} + {}_{2}^4\text{He}$ 。

4. 4 次 α 衰变, 2 次 β 衰变。

5. 120 天经过了 5 个半衰期, 则剩余的质量为 $m = 1 \times \left(\frac{1}{2} \right)^5 \text{ g} = 0.03125 \text{ g}$ 。

6. 每经 1 个半衰期放射性物质的质量都减半, 则经过 n 个半衰期剩余的质量为 $m_{\text{余}} = m_{\text{原}} \left(\frac{1}{2} \right)^{n/T}$ 。

设 20 g 铋衰变剩下 1.25 g 时经过的半衰期的个数为 n , 则

$$\left(\frac{1}{2} \right)^n = \frac{m_{\text{余}}}{m_{\text{原}}} = \frac{1.25}{20} = \frac{1}{16}, \text{ 所以 } n = 4,$$

则经过的时间为 $t = 4 \times 5 \text{ d} = 20 \text{ d}$ 。

第3节 探测射线的方法

(问题与练习 P₇₆)

1. 用云室可以清楚地看出 α 粒子和 β 粒子的径迹(课本图 19.3-2)。 α 粒子的质量比较大, 在气体中行进时不易改变方向, 它的电离本领大, 在每厘米的路程中能使气体分子产生 10 000 对离子, 所以它的径迹直而粗。 β 粒子质量很小, 跟气体分子的电子碰撞容易改变方向, 而且电离本领小, 在每厘米的路程中只能产生几百对离子, 所以它的径迹比较细而且常常发生弯曲。 γ 粒子的电离本领更小, 在云室中一般不直接留下径迹。
2. 云室是利用过饱和蒸汽能以离子为核心凝结成雾滴显示气体离子的存在。盖革-米勒计数管利用在电场中被加速的离子可以在电路中引起脉冲放电来显示气体离子的存在。
3. 威耳逊云室可以观察粒子的径迹, 了解粒子的性质; 把云室放在磁场中, 还可以知道粒子所带电荷的正负, 但是不能用来计数。盖革-米勒计数器只能用来计数, 不能区分射线的种类。

第4节 放射性的应用与防护

(问题与练习 P₇₈)

1. 原子核的人工转变是在其他粒子轰击下产生新原子核的过程, 而放射性元素的衰变是原子核没有其他粒子的轰击而自发放出射线的过程。
2. 在核反应过程中根据质量数和电荷数守恒, 可以求出生成原子核的电荷数和质量数。

反应后新原子核的质量数与核电荷数分别为

$$(1) A = 23 + 4 - 1 = 26, Z = 11 + 2 - 1 = 12;$$

$$(2) A = 27 + 4 - 1 = 30, Z = 13 + 2 - 0 = 15;$$

$$(3) A = 16 + 1 - 1 = 16, Z = 8 + 0 - 1 = 7;$$

$$(4) A = 30 + 1 - 1 = 30, Z = 14 + 1 - 0 = 15。$$

所以反应后的新原子核分别为 (1) ${}_{12}^{26}\text{Mg}$; (2) ${}_{15}^{30}\text{P}$; (3) ${}_{7}^{16}\text{N}$;

$$(4) {}_{15}^{30}\text{P}。$$

则核反应方程分别为

$$(1) {}_{11}^{23}\text{Na} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{12}^{26}\text{Mg} + {}_1^1\text{H}; (2) {}_{13}^{27}\text{Al} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P} + {}_0^1\text{n};$$

$$(3) {}_8^{16}\text{O} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_7^{16}\text{N} + {}_1^1\text{H}; (4) {}_{14}^{30}\text{Si} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_{15}^{30}\text{P} + {}_0^1\text{n}。$$

3. (1) ${}_{9}\text{F} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_1^1\text{H} + {}_{10}^{22}\text{Ne}$; (2) ${}_{5}^{11}\text{B} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_0^1\text{n} + {}_7^{14}\text{N}$;

$$(3) {}_7^{14}\text{N} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_6^{14}\text{C} + {}_1^1\text{H}。$$

4. 设某学身体质量为 50 kg。

该同学体内含碳质量为 $50 \times 18\% \text{ kg} = 9000 \text{ g}$ 。

该同学身体中 1 s 内衰变的碳原子的个数为 $9000 \times \frac{10}{60} = 1500$ 个。

5. 在医院的放射室看见过这个标志。一般情况要远离这些地

方,特殊情况时要在医生指导下进出这些场所。

第5节 核力与结合能

(问题与练习 P₈₂)

- (1)核反应涉及强相互作用(核力),化学反应涉及电磁相互作用(电磁力)。
(2)核反应中核子发生了改变,化学反应中元素重新组合。
- 因为通常我们看到的物体速度非常小,物体的动质量和静质量相差非常微小,所以觉察不到物体的质量发生变化。
- 由爱因斯坦的质能方程得

$$\begin{aligned} E &= mc^2 = 1 \text{ u} \times c^2 \\ &= 1.6606 \times 10^{-27} \times (2.9979 \times 10^8)^2 \text{ J} \\ &= 1.4924 \times 10^{-10} \text{ J}。 \end{aligned}$$

又因为 $1 \text{ eV} = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ J}$, 则有

$$E = 1.4924 \times 10^{-10} \text{ J} = 931.5 \text{ MeV},$$

所以 1 u 相当于 931.5 MeV 的能量。

- $1 \mu\text{g}$ 的质量相当于 $E = mc^2 = 10^{-9} \times (3 \times 10^8)^2 \text{ J} = 9 \times 10^7 \text{ J}$ 这些能量用来增加重力势能使直升机升高的高度为

$$h = \frac{E}{Mg} = \frac{9 \times 10^7}{(6000 + 60 \times 50) \times 10} \text{ m} = 10^3 \text{ m}。$$

第6节 核裂变

(问题与练习 P₈₈)

- 重核分裂成中等质量原子核的核反应叫作重核的裂变。
由重核裂变产生的中子使裂变反应一代接一代继续下去的过程,叫作核裂变的链式反应。
- 调节中子的数目来控制反应速度。用镉或硼钢制成控制棒,用来吸收减速后的中子,控制反应速度。当反应太快时,控制棒能自动插入,多吸收些中子;当反应速度不够时,控制棒能自动抽出一些,少吸收一些中子。
- 4.94 MeV 。
- 因为中子与碳核每次都是弹性正碰,所以碰撞过程中动量守恒、能量守恒,中子失去的动能即为碳核增加的动能。

(1)设中子的质量为 m 、碳核的质量 M , 则有 $M = 12m$ 。

设中子碰前的速度为 v_0 , 碰后的速度为 v_{n1} , 碳核碰后的速度为 v_c , 由动量守恒定律得 $mv_0 = mv_{n1} + Mv_c$,

$$\text{由能量守恒定律得 } \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv_{n1}^2 + \frac{1}{2}Mv_c^2,$$

$$\text{由以上三式解得: } v_c = \frac{2}{13}v_0,$$

$$v_{n1} = -\frac{11}{13}v_0, \text{ 负号表示速度反向。}$$

则经过一次碰撞,中子损失的动能为

$$\Delta E = \frac{1}{2}Mv_c^2 = \frac{1}{2} \times 12m \left(\frac{2}{13}v_0 \right)^2 = \frac{48}{169}E_0 = 0.284E_0。$$

$$(2) \text{同理,中子第2次碰撞后的速度为 } v_{n2} = -\frac{11}{13}v_{n1} = \left(-\frac{11}{13} \right)^2 v_0,$$

$$\text{中子第3次碰撞后的速度为 } v_{n3} = -\frac{11}{13}v_{n2} = \left(-\frac{11}{13} \right)^3 v_0,$$

.....

$$\text{中子第 } k \text{ 次碰撞后的速度为 } v_{nk} = \left(-\frac{11}{13} \right)^k v_0,$$

则中子经 k 次碰撞的动能为

$$E = \frac{1}{2}mv_{nk}^2 = \frac{1}{2}m \left[\left(-\frac{11}{13} \right)^k v_0 \right]^2 = \left(\frac{11}{13} \right)^{2k} \times \frac{1}{2}mv_0^2 = \left(\frac{11}{13} \right)^{2k} E_0,$$

所以中子的动能小于 $E_0 \times 10^{-6}$ 时,有 $\left(\frac{11}{13} \right)^{2k} < 10^{-6}$,

解得 $k > 41.35$ 。

所以中子至少经过 42 次碰撞,中子的动能才小于 $E_0 \times 10^{-6}$ 。

- 衰变后的质量亏损

$$\Delta m = (3.853131 \times 10^{-25} - 3.786567 \times 10^{-25} - 6.64672 \times 10^{-27}) \text{ kg} = 0.0000968 \times 10^{-25} \text{ kg},$$

$$\text{释放的能量 } \Delta E = \Delta mc^2 = 0.0000968 \times 10^{-25} \times (3 \times 10^8)^2 \text{ J} = 8.712 \times 10^{-13} \text{ J}。$$

- 每年发电 $3 \times 10^8 \times 365 \times 24 \times 3600 \text{ J} = 9.4608 \times 10^{15} \text{ J}$, 每年耗铀量 $\frac{9.4608 \times 10^{15}}{8.2 \times 10^{10}} \text{ g} = 115.38 \text{ kg}。$

第7节 核聚变

(问题与练习 P₉₀)

- 两个轻核结合成质量较大的核,这样的核反应叫作核聚变。
聚变发生时需要提供巨大的能量,但反应中放出的能量比提供的能量要大得多。

- ${}^4_2\text{He} + {}^{16}_8\text{O} \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Ne}$, 右边的原子核具有较多的结合能。

- 太阳每秒释放能量 $E = 4 \times 10^{26} \text{ J}$, 由 $\Delta E = \Delta mc^2$ 知太阳每秒

$$\text{失去质量 } \Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{4 \times 10^{26}}{(3 \times 10^8)^2} \text{ kg} = 4.44 \times 10^9 \text{ kg}。$$

- 从元素周期表中查得 ${}^{12}_6\text{C}$ 的质量为 12.0000 u , ${}^4_2\text{He}$ 的质量为 4.0026 u 。根据质能方程可以求出这个反应中放出的能量。

三个 α 粒子结合成一个 ${}^{12}_6\text{C}$ 核的质量亏损

$$\Delta m = 3 \times 4.0026 \text{ u} - 12.0000 \text{ u} = 0.0078 \text{ u},$$

$$\text{放出的能量 } E = 0.0078 \times 931.5 \text{ MeV} = 7.266 \text{ MeV}。$$

- 聚变所需要的“燃料”——氘在地球上非常丰富,1 L 海水中大约有 0.03 g 氘,如果用来进行热核反应,放出的能量约和燃烧 300 L 汽油相当,而裂变燃料——铀在地球上储量有限,尤其是用于核裂变的铀 235,在铀矿中仅占 0.7% ,相比起来聚变的燃料——氘要丰富得多,因此实现人工控制热核反应是必要的。可控的裂变反应速度可以比较容易地进行人工控制,因此,现在国际上的核电站都是利用裂变放出能量,而聚变反应的可控制性比较困难,世界上许多国家都在积极研究可控热核反应的理论和技术。

第8节 粒子和宇宙

(问题与练习 P₉₄)

- 设计表格如下:

分类	参与的相互作用	发现的粒子	备注
强子	强相互作用	质子、中子、介子、超子	质子是最早发现的强子,强子有内部结构
轻子	不参与强相互作用	电子、电子中微子、 μ 子、 μ 子中微子、 τ 子、 τ 子中微子	现代实验还没有发现轻子的内部结构
媒介子	传递各种相互作用	光子、中间玻色子、胶子	光子传递电磁相互作用,中间玻色子传递弱相互作用,胶子传递强相互作用

- (1)宇宙的演化过程

强子时代 → **轻子时代** → **核合成时代** → **星系**

- (2)恒星的演化过程

星云 → **原恒星** → **恒星(稳定阶段)** → **红巨星** → **白矮星、中子星或黑洞**