

高中物理

马祥芸

May 16, 2024

Contents

1	匀变速直线运动问题	2
1.1	中间时刻/平均速度	2
1.2	纸带加速度问题	2
2	机械振动	3
2.1	简谐振动	3
2.2	数学准备	3
3	光学	4
3.1	折射率	4
3.2	干涉实验	5
3.3	总结	5
4	热学	7
4.1	黑体辐射	7
4.1.1	物理大厦上的”两朵乌云”	7
4.1.2	为什么要研究辐射	7
4.1.3	黑体模型	8
4.1.4	能量子-普朗克	8
4.1.5	光的一些描述	9
4.2	光电效应	9
4.2.1	理想模型	9
4.2.2	实验雏形	9
4.2.3	电学实验	10
4.3	原子结构	10
4.3.1	物理学史	10
4.3.2	α 散射实验	10
4.3.3	玻尔模型	11
4.4	天然放射性现象	12
4.5	放射性元素的衰变	13
4.6	质能方程	15
4.7	结合能与比结合能	15

1 匀变速直线运动问题

1.1 中间时刻/平均速度

中间时刻速度 $v_{\frac{t}{2}}$ 与平均速度 \bar{v} 是同一个值

$$v_{\frac{t}{2}} = v_0 + \frac{at}{2} = \frac{v_0}{2} + \left(\frac{v_0}{2} + \frac{at}{2}\right) = \frac{v_0 + v_t}{2} = \bar{v}$$

中间位置速度

$$\begin{cases} 2a\frac{x}{2} = v_{\frac{x}{2}}^2 - v_0^2 & (1) \\ 2a\frac{x}{2} = v_t^2 - v_{\frac{x}{2}}^2 & (2) \end{cases}$$

由方程 (1) - (2) 得到 $v_{\frac{x}{2}} = \sqrt{\frac{v_0^2 + v_t^2}{2}}$

1.2 纸带加速度问题

纸带的特点, 每个计时点的时间间隔相同均为 T , 且 x_n 规定的是第 n 个时间间隔内的位移, 并非到起点的距离

推论. 相邻位移之间的差为 aT^2 , 等时位移比例式为 $x_1 : x_2 : x_3 : \cdots : x_n = 1 : 3 : 5 : \cdots : 2n - 1$

证明.

$$\begin{aligned} x_n &= \frac{1}{2}a(nT)^2 - \frac{1}{2}a[(n-1)T]^2 = aT^2\left(\frac{2n-1}{2}\right) \\ x_{n-1} &= aT^2\left(\frac{2n-3}{2}\right) \\ x_n - x_{n-1} &= aT^2 \end{aligned}$$

□

推论. 等位移比例式子 ($1m, 2m, 3m \dots$)

前 $1m, 2m, 3m \dots nm$ 所用时间比为 $1 : \sqrt{2} : \sqrt{3} : \cdots : \sqrt{n}$, 若是第 im 内则向前减一个就行

证明.

$$\begin{aligned} 1 &= \frac{1}{2}at_1^2 \implies t_1 = \sqrt{\frac{2}{a}} \cdot \sqrt{1} \\ 2 &= \frac{1}{2}at_2^2 \implies t_2 = \sqrt{\frac{2}{a}} \cdot \sqrt{2} \\ 3 &= \frac{1}{2}at_3^2 \implies t_3 = \sqrt{\frac{2}{a}} \cdot \sqrt{3} \\ n &= \frac{1}{2}at_n^2 \implies t_n = \sqrt{\frac{2}{a}} \cdot \sqrt{n} \end{aligned}$$

□

2 机械振动

2.1 简谐振动

- 定义: 具有平衡位置, 回复力形如 $F_{\text{回}} = -kx$ (来自合外力或其分力)
- 振子方程: $\sin(\omega t + \varphi)$
- 同侧法: 质点振动速度方向 v_f 与波传播方向 u 在正弦函数线的同一侧
- 摆周期: $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$
- 受迫振动: 在周期性外力的持续作用下而进行的振动称为**受迫振动**, 振动稳定后其**频率**等于外力驱动频率
- 等效绳长与等效加速度问题:
 - 等效绳长: 确定为简谐振动, 通过几何关系确定摆心
 - 等效加速度: 主要区别电场摆和电梯摆, 后者需要变换参考系 (非惯性力)
- 造成波的多解性的三大原因:
 - **波的周期性**: $\begin{cases} \text{时间周期性: 时间间隔}\Delta t\text{与周期}T\text{的关系不明确} \\ \text{空间周期性: 波传播距离}\Delta x\text{与波长}\lambda\text{的关系不明确} \end{cases}$
 - **波的双向性**: $\begin{cases} \text{传播方向双向性: 波的传播方向不确定} \\ \text{振动方向双向性: 质点振动方向不确定} \end{cases}$
 - **波形隐含性**: $\begin{cases} \text{在波动问题中, 有时只给出几个特殊点} \\ \text{(大多是两个特殊的点) 的运动状态, 其余信息均处于隐含状态} \end{cases}$

2.2 数学准备

- 展开

$$\sin(\theta \pm \beta) = \sin\theta \cos\beta \pm \cos\theta \sin\beta$$

$$\cos(\theta \pm \beta) = \cos\theta \cos\beta \mp \sin\theta \sin\beta$$

$$\tan(\theta \pm \beta) = \frac{\tan\theta \pm \tan\beta}{1 \mp \tan\theta \tan\beta}$$

- 互余 ($\theta + \beta = \frac{\pi}{2}$)

$$\sin\theta = \cos\beta \quad \tan\theta = \frac{1}{\tan\beta}$$

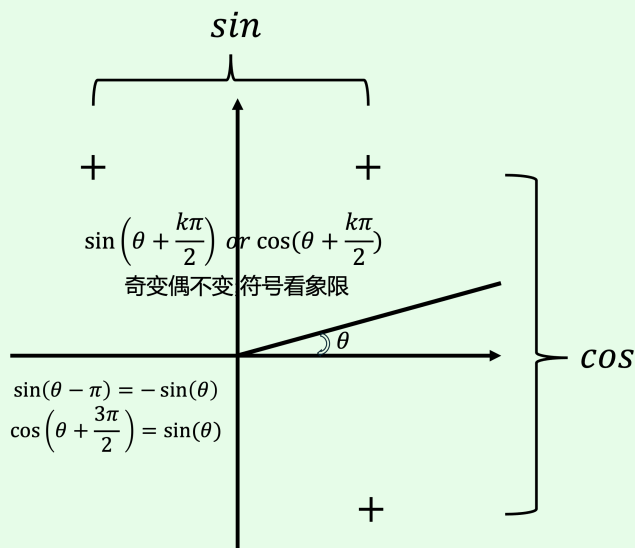
- 互补 ($\theta + \beta = \pi$)

$$\sin\theta = \sin\beta \quad \cos\theta = -\cos\beta \quad \tan\theta = -\tan\beta$$

- 半周期与奇偶性

$$\sin(\theta \pm \pi) = -\sin\theta \quad \sin(\theta - \beta) = -\sin(\beta - \theta)$$

$$\cos(\theta \pm \pi) = -\cos\theta \quad \cos(\theta - \beta) = \cos(\beta - \theta)$$



- 和关系

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$$

- 正弦定理

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma}$$

- 余弦定理

$$\cos \gamma = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab}$$

- 二倍角

$$\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta \quad \cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \quad \tan 2\theta = \frac{2 \tan \theta}{1 - \tan^2 \theta}$$

- 降次

$$\sin^2 \theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2} \quad \cos^2 \theta = \frac{1 + \cos 2\theta}{2} \quad \tan^2 \theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{1 + \cos 2\theta}$$

3 光学

3.1 折射率

- 定义式:

$$n = \frac{\sin \text{大角}}{\sin \text{小角}}$$

- 决定式:

$$n = \frac{c}{v}$$

- 全反射:

光密介质 \rightarrow 光疏介质 $\sin \text{大角} = 1$ (大角 $= \frac{\pi}{2}$)

$$\text{临界角} \quad \sin C = \frac{1}{\sin \text{小角}}$$

- 视深与视高:

H 为物点距离界面的高度; h 为像点距离界面的高度

– 视深: 从介质外看向介质内 $h = \frac{1}{n}H$

– 视高: 从介质内看向介质外 $h = nH$

- 实验误差分析:

– 非平行玻璃砖 $n_{\text{测}} = n_{\text{真}}$

– 整体平移 $d_{\text{测}} = d_{\text{玻}}$ $n_{\text{测}} = n_{\text{真}}$

– 其他情况 $n_{\text{测}}$ 和 $n_{\text{真}}$ 的大小关系与 $d_{\text{测}}$ 和 $d_{\text{玻}}$ 的大小关系相反

3.2 干涉实验

(1) 薄膜干涉: $\delta = 2d$

- 明暗条纹位置由波长和此处厚度共同决定
- 相邻明 (暗) 条纹对应的薄膜厚度差为 $\frac{\lambda}{2}$ λ 应为光在介质中传播时的波长

(2) 劈尖干涉: 样板下表面和被检查平面的上表面的反射光发生干涉

(标准板的厚度太厚大于相干长度)

I 验平问题:

若待测板平整, 干涉条纹等距

若条纹**偏头**, 则条纹提前出现, 此处光程差偏大, 因此待测样板此处凹

若条纹**偏尾**, 则条纹延后, 此处光程差偏小, 因此待测样板此处凸

II 条纹间距问题:

$$\text{薄片 (支撑两个板) 的移动改变 } \theta \text{ 角} \quad \Delta l = \frac{\Delta d}{\tan \theta} \quad \Delta d = f(\lambda) = \frac{\lambda}{2}$$

III 增反膜; 增透膜: 入射光能量 = 折射光能量 + 反射光能量

(注: 光疏到光密反射光产生半波损失, $n_{\text{膜}}$ 介于空气和另一介质之间)

增透膜: 反射光相消 $2d = \frac{\lambda}{2}(2n + 1)$

增反膜: 反射光相长 $2d = \frac{\lambda}{2}(2n)$

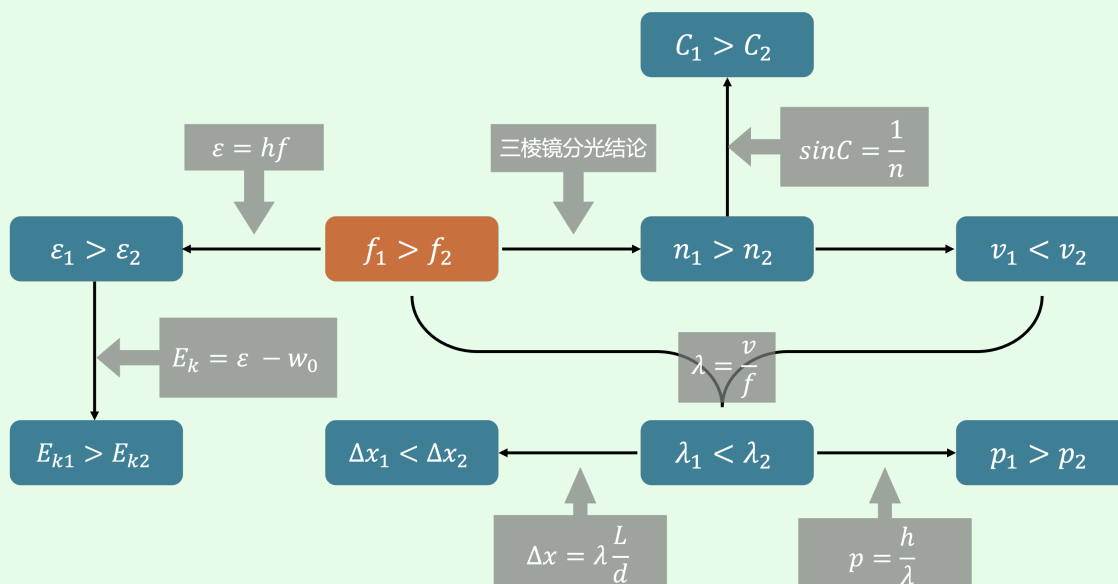
(3) 双缝干涉: $\Delta d = \lambda \frac{L}{d}$ (条纹间距 Δd , 双缝间距 d , 缝板距离 L)

3.3 总结

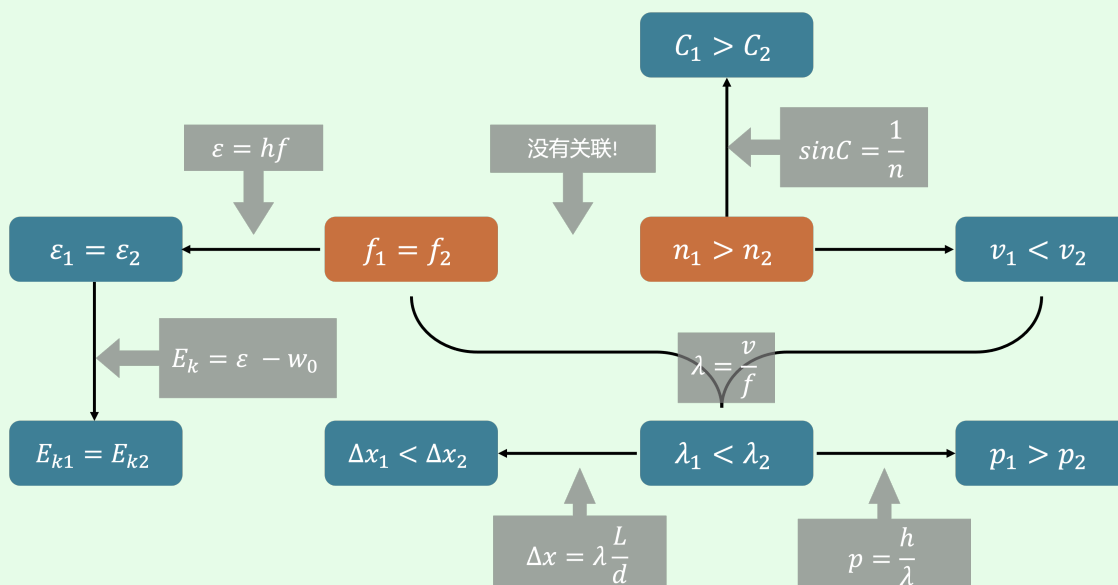
符号说明

频率	折射率	速度	临界角	波长	动量	干涉	能量	逸出功	逃逸光子动能
f	n	v	C	λ	p	Δx	ε	w_0	E_k

- 同一介质中不同频率的光



- 同一频率的光在不同介质 (下标表示不同介质中) 中

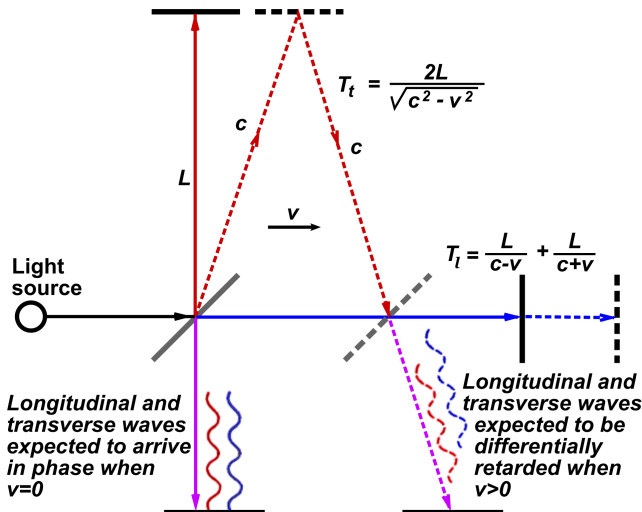


4 热学

4.1 黑体辐射

4.1.1 物理大厦上的”两朵乌云”

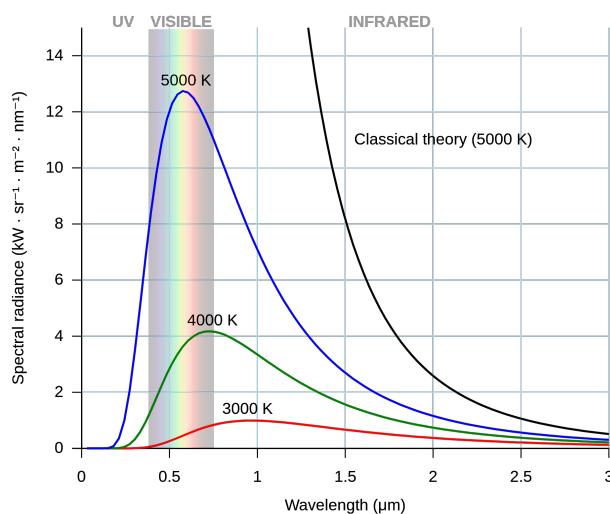
- 迈克尔逊-莫雷实验: 测量假想介质以太 (绝对参考系) \Rightarrow 否定以太得到狭义相对论



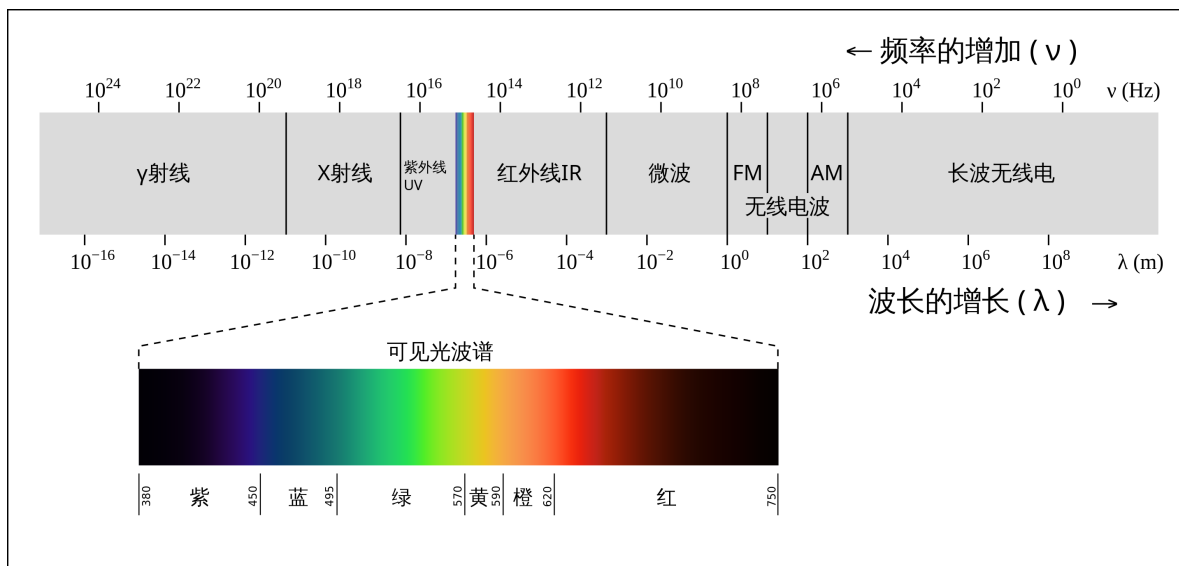
- 热辐射实验-紫外灾难: 紫外波段辐射能量在当时理论下应为 ∞ , 实际辐射能量为 0

4.1.2 为什么要研究辐射

- 各个国家都在大炼钢铁 (大炼钢时代), 资本家为了提高炼钢技术请物理学家进行研究
- 热辐射: 任何物体都在进行热辐射 (电磁波), 且与**温度** (非唯一) 有关
- 物理学家尝试测量最好炼钢温度所产生的热辐射 (电磁波波谱)



- (1) 在特定温度下, 辐射的电磁波波段范围较广, 强度不一
 - (2) 随着温度的升高, 辐射出的各个波段的电磁的辐射强度均升高
 - (3) 随着温度升高, 辐射强度最强的波长向**左**移动 (频率上升)
- (a) 维恩公式 (短波接近)
(b) 瑞利公式 (长波接近) \Rightarrow 紫外灾难 (短波接近无穷)



4.1.3 黑体模型

- 理想黑体概念: 反射率与透射率为 0, 吸收率 100%, 全靠自身发射辐射
- 常见近似黑体: 太阳 发光灯泡 钻孔箱

4.1.4 量子-普朗克



- 量子: 认为带电微粒的能量只能是某一最小能量值的整数倍, 最小能量值称之为—量子
- 光子: 爱因斯坦在**光电效应**现象中认为光本身由一个个不可分割的能量子组成, 频率为 ν 的光其能量为 $h\nu$, 后被称为光子

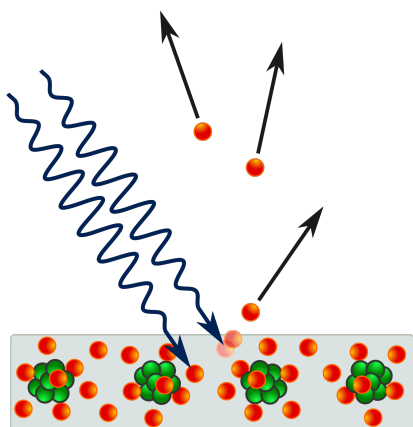
$$E = h\nu \quad \text{普朗克常数 } h = 6.63 \times 10^{-34}$$

4.1.5 光的一些描述

- 光速 (传播): 真空中传播速度 $3 \times 10^8 m/s$
- 频率 (颜色): 单位时间内完成的周期次数 ν
- 强度 (亮度): 单位时间内的光子数 (粗浅定义) $I = nh\nu$ (单一光的强度改变仅改变 n)

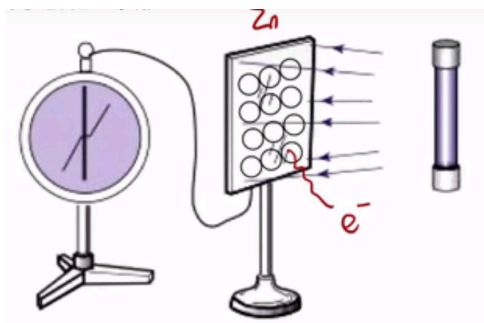
4.2 光电效应

4.2.1 理想模型



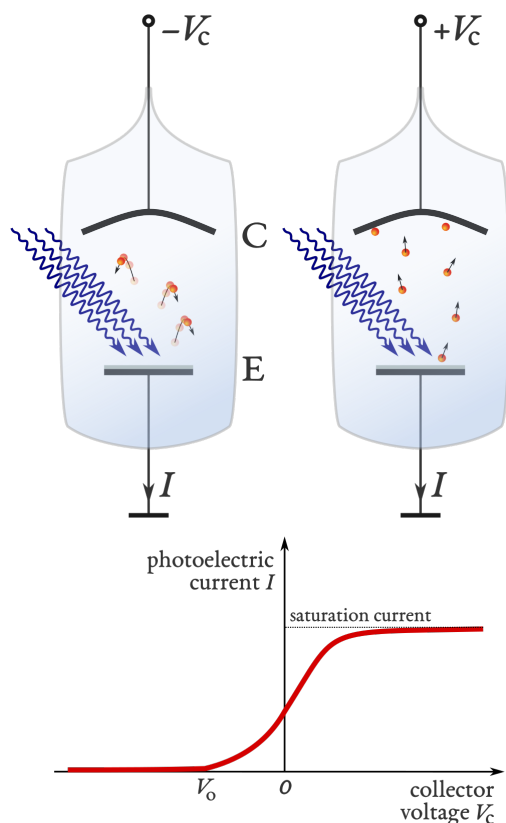
- 核外电子处于某能级上, 吸收特定能量将会跃迁或逃离 (电离)
- 单个光子的能量被吸收后仍有余量, 则作为电子的初动能
- 电子逃离在化学中 \iff 被氧化, 这也是有些材料需要避光存储的原因

4.2.2 实验雏形



- 电子吸收能量逃离
- Zn 板处于正电
- 验电器处于正电 (工作原理: 接触式起电)

4.2.3 电学实验



- 逸出功: 电子逃逸出金属表面所需要的最小能量 W_0
- 最大初动能: 一定频率光照下刚逃逸的电子所具有最大初动能 $E_{kmax} = h\nu - W_0$
- 饱和光电流: 所有逃逸电子均打到极板 (忽略速度对电流的影响) I_s
 增大光频率 \times
 增加光照强度 (调整 n) \checkmark
- 遏止电压: 恰好使得没有任何电子打到极板 $V_{stop}q = E_{kmax}$ (抵消电子最大初动能)
- 截止频率 (极限频率): 恰好发生光电效应时的频率 $E_{kmax} \Rightarrow \nu_0 = \frac{W_0}{h}$

4.3 原子结构

4.3.1 物理学史

1. J.J 汤姆孙发现了电子: 阴极射线的粒子称为电子
2. J.J 汤姆孙提出”枣糕模型”: 认为原子是一个球体, 其中正电荷分布均匀, 电子镶嵌其中
3. 卢瑟福通过 α 粒子散射实验 提出”核式结构模型”: 所有带正电部分体积很小但几乎有全部质量, 电子在外运动

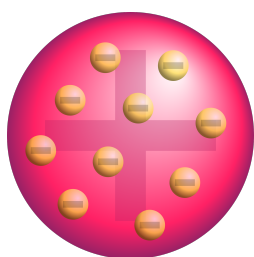


Figure 1: 枣糕结构

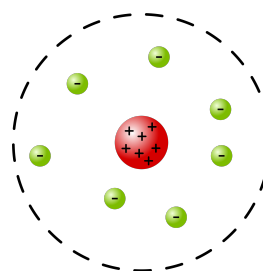


Figure 2: 核式结构

4.3.2 α 散射实验

- α 粒子: He 原子核
- 实验原理: 使用 α 粒子轰击金箔 (原子间缝隙), 边旋转荧光屏边接收粒子发光

- 实验中: 电子间的相互作用, 质量, 空气阻力等 (极小); 为何使用金箔 (重, 不易被碰撞影响; 延展性好, 可以做很薄)
- 实验结果

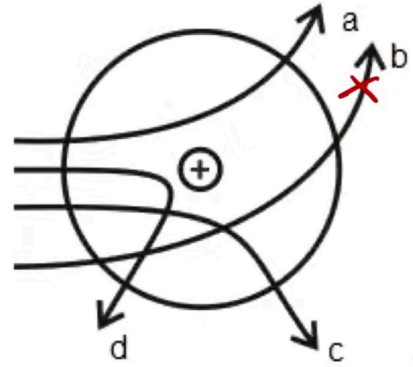
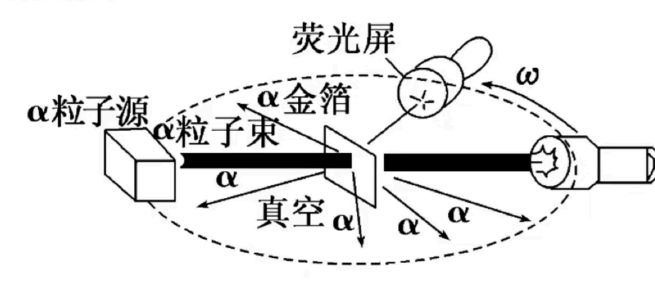
当时理论: 几乎所有粒子均可以穿过金箔

真实结果: 大部分穿过, 少部分偏角较大, **极少部分反弹** (不符合枣糕结构模型)

结论: 原子内部极度空旷, 极少反弹现象是由集中的大量正电荷带来的库伦力造成

α 粒子: He 原子核

实验原理



4.3.3 玻尔模型

- 经典理论的困难:
 - 卢瑟福的核式结构正确指出了原子核的存在, 很好的解释了 α 散射实验, 但是经典物理学既无法解释原子的**稳定性**, 又无法解释原子**光谱的分立特性**.
 - 绕核转动的电子在做周期性运动, 其电磁场周期性的变化 (波的传播) 因而会激发电磁波, 其绕核转动的能量将以电磁波的形式辐射出去. 所以电子绕核转动这个系统是不稳定的. 然而事实是, 原子是个很稳定的系统.
 - 经典电磁理论, 电子辐射的电磁波的频率就是其绕核转动频率. 电子越转能量越小, 那么离原子核就越来越近, 转的也就越来越快, 这个变化应当是连续的, 即应当是原子辐射各个频率的光都有 (光谱应当是连续的). 事实是分立的线状谱.

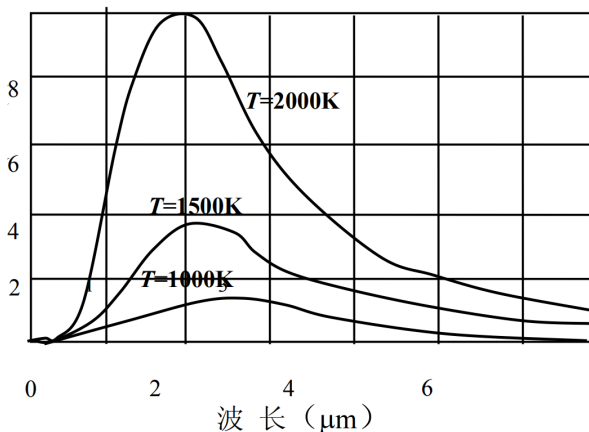


Figure 1: 黑体辐射光谱

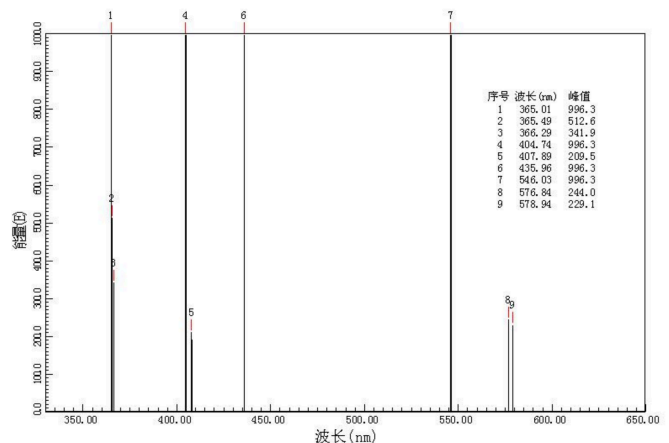
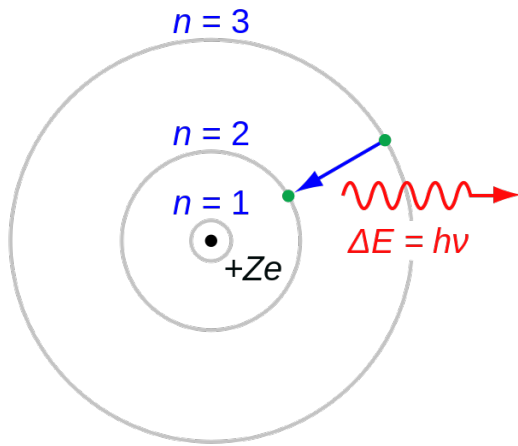


Figure 2: 汞灯光谱

- 基本假设:

轨道量子化



- * 电子**跃迁**辐射电磁波, 电子在不同轨道运动 \iff 原子处于不同状态 (原子跃迁)
- * 原子在不同的状态中具有不同的能量, 因此原子的能量是**量子化**, 这些量子化的能量叫做**能级**
- * 原子中具有确定能量的稳定状态称为**定态**
- * 能量最低的态叫做基态 $n = 1$; **激发态** $n > 1$ (第一激发态 $n = 2$)
- 状态标识 $n = 1, 2, 3 \dots$
- 能量标识 E_1, E_2, E_3, \dots

氢原子能级 (以能级差示意跃迁难度)

n	E/eV
∞	0
5	-0.54
4	-0.85
3	-1.51
2	-3.4
1	-13.6

* $E_1 = -13.6\text{eV}$ $E_2 = -3.6\text{eV}$ $E_3 = -1.51\text{eV}$

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

- * 电子吸收能量的方式:

恰好拥有某两能级差的光子 (区别于光电效应中对光能量吸收的要求)

大于某两能级差的实物粒子撞击

- * 电离: 电子吸收能量完全逃离 (最远处能级为 0) 原子核的束缚

- 电子跃迁 (从高 \rightarrow 低)

- 处于激发态的电子是不稳定的, 将会**自发**从高能级向低能级跃迁
- 向低能级跃迁过程中会发射**特定频率**的电磁波 (光)
- 有多种向低能级跃迁的方法时, 跃迁结果不定, 直至跃迁到基态
- 大量处于同一激发态的电子, 所能发射电磁波的频率的种类最多 $C_n^2 = \frac{n(n-1)}{2}$

4.4 天然放射性现象

- 定义: 放射性元素**原子核内部**自发放出射线的现象
- 三种射线:

α 射线: ${}_2^4\text{He}$ 原子核 速度 $0.1c$

β 射线: ${}_0^{-1}\text{e}$ 速度 $0.99c$

γ 射线: ${}_0^0\gamma$ 电磁波 速度 c

电离能力: 使得被射线辐射的物质发生电离的能力 $\alpha > \beta > \gamma$

距离足够近, 放射性同位素释放出的 α 粒子就足以穿透皮肤从而杀死皮下的重要组织的细胞. 相比 γ 射线和 x 光对细胞造成毁伤的能力, α 射线对细胞所造成的损坏程度超过其二十倍以上

穿透能力: 穿透物质能力 $\gamma > \beta > \alpha$ (甚至不能穿透一张纸)

$$\text{磁场半径: } r = \frac{mv}{qB} \quad q_\alpha = 2q_\beta \quad m_\alpha \gg m_\beta \implies r_\alpha > r_\beta$$

$$\text{电场偏转: } a = \frac{Eq}{m} \quad q_\alpha = 2q_\beta \quad m_\alpha \gg m_\beta \implies a_\alpha < a_\beta$$

β 粒子相比 α 粒子在电磁场中更易发生偏转

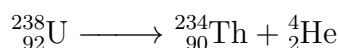
4.5 放射性元素的衰变

1. 原子核的表示: ${}_Z^AX$ (A 表质量数, Z 为原子核的电荷数 eg. ${}_2^4\text{He}$)

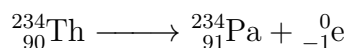
同位素: 质子数一样, 质量数不一样

2. 衰变形式:

- α 衰变: 放射性元素原子核放出 α 粒子



- β 衰变: 放射性元素原子核放出 β 粒子 (非核外电子, 中子 \rightarrow 电子 + 质子)
 β 衰变不改变质量数 (未知衰变的计算方法)



- γ 衰变: α 衰变, β 衰变过程中会伴随着 γ 射线
- 衰变的轨迹分析: eg. 进行 α 衰变并处在 X 磁场下

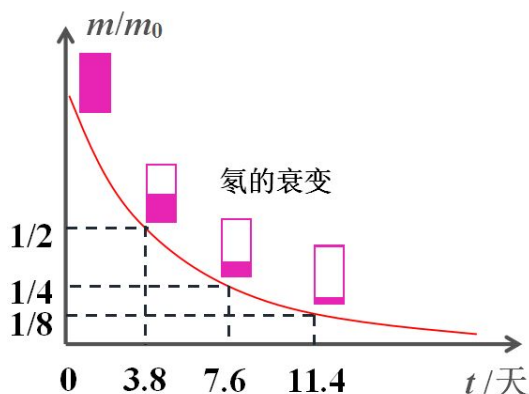
$$r = \frac{mv}{qb} \quad \text{由动量守恒} \quad |m_\alpha v_\alpha| = |m_{\text{核}} v_{\text{核}}|$$

$$q_{\text{核}} > q_\alpha \quad r_{\text{核}} < r_\alpha$$

总结: 在磁场下 α 衰变为**蝴蝶圆**, β 衰变为**内切圆**
给定元素或给定半径均需要用到**动量守恒**

3. 半衰期: 放射性元素的原子核有半数发生衰变所需要的时间

- 通过将放射性元素加速到接近光速, 由狭义相对论的时间膨胀效应可以延长半衰期
- 有些放射性元素的原子核和核外电子的波函数更多的重叠, 来发生衰变. 因此使得电子和原子核的波函数重叠更少或者直接剥离所有核外电子能够使得半衰期延长



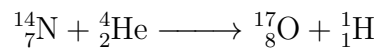
(1) 不同放射性元素的半衰期不同

(2) 半衰期的大小仅与原子核内部结构有关

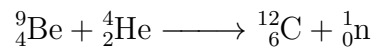
(3) 是对同一元素的大量原子核的统计规律

4. 人工核反应:

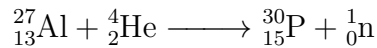
(1) 卢瑟福 α 粒子轰击氮原子核发现质子



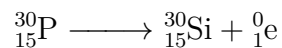
(2) 查德威克 α 粒子轰击铍原子核发现中子



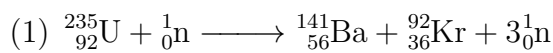
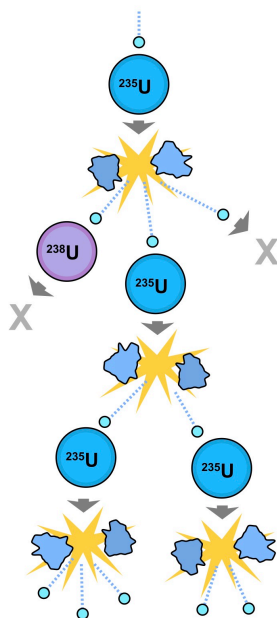
(3) 居里夫人 α 粒子轰击铝原子核发现人工放射性同位素



(4) 居里夫人同时发现正电子



5. 核裂变 (链式反应)



(2) 利用重核裂变的链式反应创造原子弹与可控核电站

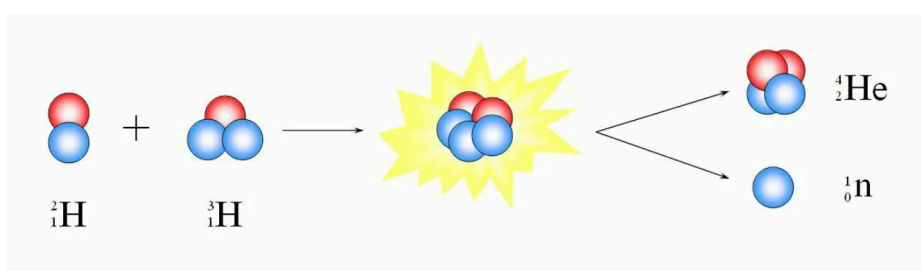
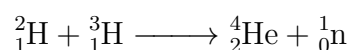
(3) 慢化剂以控制快中子

常见慢化剂有石墨, 重水, 普通水 (轻水)

(4) 氢的同位素: 氕 (轻水) ${}^1_1\text{H}$, 氘 (重水) ${}^2_1\text{H}$, 氚 (超重水) ${}^3_1\text{H}$

6. 核聚变反应 (热核反应)

- 将轻核加热使其获得动能以融合, 释放出大量能量, 以支持其他轻核聚变反应
- 氢弹是裂变与聚变反应的结合, 通过裂变反应释放的初始热量触发聚变反应
- 太阳无时无刻不在发生**可控核聚变反应**
- 核聚变反应的发生过程又可被称为**热核反应**



4.6 质能方程

- 在核反应方程中质量数与质子数是守恒的, 但是并不代表质量守恒
- 质子和中子的质量数均为 1, 但实际质量略有差异
- 质能方程: $E = mc^2$ ($m : kg$ $E : J$)
- 质量单位: $1u$ (原子质量单位, 定义为碳原子质量的 $1/12$)
- 能量单位: $1MeV$ (兆电子伏特) $1u$ 相当于 $931.5MeV$ $1MeV$ 相当于 $10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} J$

4.7 结合能与比结合能

1. 原子核的核子间有一种强大的相互作用力: **核力**
 - (a) 在原子核的尺度内, 核力比库伦力要大的多
 - (b) 核力是短程力, 作用范围在 1.5×10^{-15} 之内
(大于此距离表现为吸引力, 小于此距离表现为排斥力, 因此不会完全融合)
自然界中较轻原子核, 质子数与中子数大致相等, 对于较重原子核, 中子数大于质子数, 越重元素相差越多
2. 结合能: 原子核是核子结合在一起构成的, 要把它们分开所需要的能量称之为原子核的结合能
原子核越大, 它的结合能就越大, 所以有意义的应该是结合能与核子数的比值
3. 比结合能: 比结合能越大, 表示原子核中核子结合越牢, 原子核越稳定