

# Atomic Physics Brochure

DOMANCY

August 2, 2021

“I learned very early the difference between knowing the name of something and knowing something.”

— Richard Feynman

## Contents

<b>1</b>	<b>卢瑟福模型</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>波尔模型</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>量子力学导论</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>电子自旋</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>泡利原理</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>X 射线</b>	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>原子核物理</b>	<b>14</b>
<b>8</b>	<b>习题</b>	<b>15</b>
8.1	卢瑟福模型 . . . . .	15
8.2	波尔模型 . . . . .	15
8.3	量子力学导论 . . . . .	15
8.4	电子自旋 . . . . .	16
8.5	泡利原理 . . . . .	16

## §1 卢瑟福模型

**Remark 1.1.** J.J.Thomson 通过实验确认了电子的存在

请默写出库伦散射公式并会推导:

请默写出卢瑟福公式并会推导:

并知晓其具体的含义 [例如解 1-2,1-5,  $dN' = N \times nd\sigma_c d\Omega$ ]

知晓  $\sigma_c$  散射截面的单位

**Remark 1.2.** 微分截面定义: 单位入射粒子, 单位立体角的散射粒子数

请写出入射粒子与原子核的最近距离公式:

请写出入射粒子散射角大于或者小于  $\theta$  的相对粒子数公式:  $[\theta < 90^\circ$  和  $\theta > 90^\circ]$

**Remark 1.3.** 若打到的箔为杂质箔, 一定要分别算不同粒子相对粒子数最后再利用 [杂质比] 加权求相对粒子数

**Remark 1.4.**

**Remark 1.5.** 粒子碰撞时一定要考虑  $a \equiv \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 E_c}$  中的  $E_c$  是质心系的动能:  $E_c = \frac{1}{2}m_\mu v^2$  其中  $m_\mu = \frac{mm'}{m+m'}$

若靶核的质量  $m'$  远大于入射粒子  $m$  即  $E_k = \frac{1}{2}mv^2 (m \ll m')$  此时  $E_c \approx E_k$

卢瑟福模型的三个解释困难的地方

**Remark 1.6.** 第一个困难可能会让定量分析, 要会计算出电子做螺旋式运动落入核中的时间  $\tau$

1. 运动的电子会不断辐射能量

2. 无法解释原子的同一性

3. 无法解释原子的再生性

## §2 波尔模型

**Remark 2.1.** 普朗克提出的黑体辐射能量密度的分布公式:

$$E(\nu, T)d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (1)$$

**Remark 2.2.** 光电效应

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

**Remark 2.3.** 光谱: 里德伯 (J.R.Rydberg) 公式

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right) \quad (3)$$

**Remark 2.4.** 波尔模型三个假定:

1. 定态条件: 电子只能在一系列分立的轨道上绕核运动, 且不辐射电磁波, 能量稳定:

$$E_n = \frac{E_0}{n^2} \quad (4)$$

2. 跃迁条件: 电子从一个定态轨道跃迁到另一个定态轨道放出或吸收的能量由能级差决定:

$$h\nu = E_n - E_m \quad (5)$$

3. 角动量量子化假设:  $L = n\hbar$

会使用经典方法计算出  $r_n, v_n$  与  $E_n$  里德伯常数, 写出其推导方法 [类氢原子]:

**Remark 2.5.** 发生非弹性碰撞即电子被粒子吸收, 使粒子变为下降一级的激发态, 例如  $\text{Li}^{2+}$  吸收一个电子变为  $\text{Li}^+$  此时电子的能量为从基态到第一激发态的能量

请默写出以下常数的值:

$$\begin{aligned} E_0 &= \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = \\ \hbar c &= m_e c^2 = \\ \alpha &\equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = \end{aligned} \quad (6)$$

### §3 量子力学导论

**Remark 3.1.** 波尔理论的困难:  
薛定谔的非难 “糟透的跃迁”

请写出爱因斯坦质能方程和动质量的表达式

请默写出德布罗意关系的两个公式:

**Remark 3.2.** 德布罗意认为: 电子波动性的波长为  $\lambda$ , 而绕核运动的电子可以稳定存在, 则此电子对应的波一定为一驻波 [电子绕核一周的周长必须是其对应波长的整数倍]

$$2\pi r = n\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \rightarrow mvr = n\hbar \rightarrow L = n\hbar \quad (7)$$

请推导出若粒子位于一刚性匣子中的动量与能量

已知宽度为  $d$  从而可以推出原子的线度  $r_{min}$  与  $E$

会推导粗糙的不确定关系

Hint: 利用 12 章波粒二象性得到的关系结合德布罗意关系推导:[粗糙的] 知道就行

请默写出严格的不确定关系:

请默写出布拉格公式:

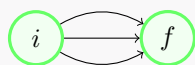
### Example 3.3

求束缚粒子的最小平均动能

**Remark 3.4.** 波函数态的叠加规则:

1. 发生在  $i$  态和  $f$  态之间的跃迁存在着物理上不可区分的途径即有:

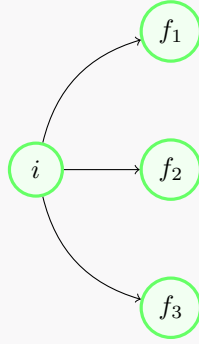
$$\langle f|i \rangle = \sum_n \langle f|i \rangle_n \quad (8)$$



2. 有  $n$  个彼此独立的不相关的末态则跃迁概率为其到达末态的概率之和:

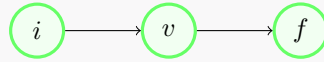
$$|\langle f|i \rangle|^2 = \sum_n |\langle f|i \rangle_n|^2 \quad (9)$$





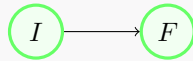
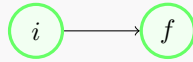
3. 总的辐射概率等于分段辐射概率之乘积:

$$\langle f|i\rangle = \langle f|v\rangle \langle v|i\rangle \quad (10)$$



4. 假设有两独立的微观粒子组成一个体系则体系的跃迁概率为个别粒子的跃迁概率乘积

$$\langle fF|iI\rangle = \langle f|i\rangle \langle F|I\rangle \quad (11)$$



## §4 电子自旋

**Remark 4.1.** 知晓四个量子数  $n, l, m_l, m_s$  的物理意义并知道各个量子数的取值范围

**Remark 4.2.** 自旋对应的磁矩在磁场的作用下将有以下势能:

$$U = -\boldsymbol{\mu}_s \cdot \boldsymbol{B} \quad (12)$$

而电子在轨道中运动也会产生磁场, 称为自旋-轨道耦合

请默写出单电子的朗德  $g$  因子表达式:

并写出任意角动量对应的磁矩  $\mu$  以及其在  $z$  方向的投影表达式:

对于  ${}^aA_b$  写出其对应的符号的意义  $[s, j, l]$

**Remark 4.3.** 原子轨道的名称源于对其原子光谱特征谱线外观的描述, 分为锐系光谱(Sharp)、主系光谱 (Principal)、漫系光谱 (Diffuse)、基系光谱 (Fundamental)

**Remark 4.4.** 请写出  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ :

请写出洛伦兹单位  $\frac{eB}{4\pi m_e}$ :

请默写出施特恩-盖拉赫实验中线束分裂间距的计算公式:

**Remark 4.5.** 单电子跃迁选择定则:  $\Delta m = \pm 1, 0, \Delta l = \pm 1, \Delta j = \pm 1$

**Remark 4.6.** 波数 = 频率/ $c$

**Remark 4.7.** 钠的 D 双线 (D line) 是指  $3P \rightarrow 3S$

**Remark 4.8.**

$$\boldsymbol{\mu} = -\frac{e}{2m_e}(g_s\mathbf{S} + g_l\mathbf{L}) \approx -\frac{e}{2m_e}g_j\mathbf{J} \quad (13)$$

**Remark 4.9.** 忽略自旋-轨道作用  $\rightarrow S = 0$

请默写出单电子原子能谱中**双能级的能量差与波数差**: [自旋-轨道耦合]

请默写出正常塞曼效应 [ $S = 0$ ] 和反常塞曼效应 [电子自旋导致][ $S \neq 0$ ] 最最最重要的公式:

## §5 泡利原理

**Remark 5.1.** 选择规则:

- L-S 耦合:

$$\Delta S = 0, \Delta L = 0, \pm 1, \Delta J = 0, \pm 1 \quad (14)$$

- j-j 耦合:

$$\Delta j = 0, \pm 1, \Delta J = 0, \pm 1 \quad (15)$$

知道某个电子态求  $L \cdot S$

**Remark 5.2.** 偶数定则: 同科电子必须使 (S+L) 为偶数

写出两个角动量的耦合规则

会从电子组态推原子态:

例题 5-7

**Remark 5.3.** 泡利不相容原理: 不可能有两个电子具有完全相同的四个量子数  $(n, l, m_l, m_s)$  [偶数规则]

**Remark 5.4.** 洪特规则:

1. 电子组态  $\rightarrow$  基态, 某原子态具有 S 最大时, 它处的能级位置最低; 对于同一个 S, L 最大时最低
2. 对于同科电子  $[(n, l, m_l, m_s)$  中  $n, l$  相同] 当同科电子数小于或者等于该层可填充的个数的一半时最小的  $J$  称为正常次序, 当同科电子大于一半的时候具有最大的  $J$  值的能级为最低 [例题 5-10]

## §6 X 射线

请默写出布拉格公式

请默写出连续谱的最小波长与外加电压  $V$  的关系

请默写出康普顿散射相关结论及其推导过程

请默写出  $K_\alpha - X, K_\beta - X, K_\gamma - X \cdots$  射线能量的近似表达式 [Moseley's law]:

## §7 原子核物理

请写出核力的基本特性

会计算核子的结合能:

请写出放射性衰变的基本规律 [包括半衰期, $\tau$  平均寿命等]

## §8 习题

### §8.1 卢瑟福模型

P28

1-2

(1) 动能为  $5.00\text{MeV}$  的  $\alpha$  粒子被金核以  $90^\circ$  散射时, 它的瞄准距离为多大 (2) 如果金箔厚  $1\mu\text{m}$ , 则入射的  $\alpha$  粒子束以大于  $90^\circ$  散射的粒子数是全部粒子数的百分之几

1-4

(1) 假定金核的半径为  $7\text{fm}$  问入射质子需要多少能量, 才能在对头碰撞时刚好到达金核表面

(2) 若将金核改为铝核, 假定铝核的半径为  $4\text{fm}$  使入射质子对头碰撞时刚好到达铝核表面问入射质子需要多少能量

1-6

一束  $\alpha$  粒子垂直射至一重金属箔上, 求  $\alpha$  粒子被散射后散射角大于  $60^\circ$  的  $\alpha$  粒子数与散射角大于  $90^\circ$  的粒子数之比

### §8.2 波尔模型

P71-72

2-1

铯的逸出功为  $1.9\text{eV}$  求:

(1) 铯的光电效应阈频率以及阈值波长

(2) 要得到能量为  $1.5\text{eV}$  的光电子必须用波长为多少的光照射

2-3

要使电子与处于基态的锂离子  $\text{Li}^{2+}$  发生非弹性散射试问电子至少具有的动能

2-6

在波长从  $95\text{nm}$  到  $125\text{nm}$  的光带范围, 氢原子的吸收光谱中包含哪些谱线

2-10

$\mu^-$  子其质量为电子的 207 倍其余性质均与电子相同则对于  $\mu^-$  子原子

1.  $\mu^-$  子原子的第一波尔半径

2.  $\mu^-$  子原子的最低能量

3.  $\mu^-$  子原子莱曼线系中的最短波长

**Remark 8.1.** Lyman series

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad (16)$$

### §8.3 量子力学导论

3-2

设光子和电子的波长均为  $0.4\text{nm}$

试问

(1) 光子的动量与电子的动量之比为

(2) 光子的动能与电子的动能之比

**3-7**

一原子的激发态发射波长为 600nm 的光谱线, 测得波长的精度为  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 10^{-7}$  问原子态的寿命为多长

## §8.4 电子自旋

P210

**4-2**

计算原子处于  $^2D_{3/2}$  的磁矩  $\mu$  以及  $\mu_z$  的可能值

**4-8**

试估计作用在氢原子 2P 态电子上的磁场强度

**4-10**

锌原子光谱中的一条谱线  $^3S_1 \rightarrow ^3P_0$  在 B 为 1T 的磁场中发生塞曼效应, 原谱线分裂为几条, 相邻两谱线的波数差为多少, 是否属于正常塞曼效应, 并画出相应的能级跃迁图

**4-14**

在  $B = 4T$  的外磁场, 忽略自旋-轨道相互作用试求氢原子的  $2P \rightarrow 1S$  跃迁所产生的谱线的波长 ( $\lambda = 121nm$ )

## §8.5 泡利原理

P255

**5-2**

计算  $^4D_{3/2}$  态的  $L \cdot S$

**5-6**

假设两个等效的 d 电子具有强的自旋-轨道作用从而导致  $j-j$  耦合试求其总角动量的可能值, 若它们发生  $L-S$  耦合则他们的总角动量又如何, 可能 J 出现的情况的次数是否相同

**5-9**

证明: 一个支壳层全部填满的原子必定具有  $^1S_0$  的基态

**5-9**

一束基态的氦原子通过非均匀磁场后, 在屏上可以接收到几条, 相同条件下对于硼原子可以接收到几条, 为什么