

## The orbit of electrons and the spectrum of atoms

Jing-lun Zhang

Henan cable network group Luohe branch, Luohe

Email: lh\_zjl@163.com

---

### Abstract

The operation of electrons outside the nucleus is an indisputable fact, but the mode of operation is controversial. Modern theory holds that the electron has no orbit, but many experiments show that the orbit of the electron is present. Based on the principle of resonance, the orbit of the electron can be calculated and the spectrum of the atom can be calculated according to the orbit of the electron, without any assumption. The orbital model based on electrons can explain the luminescence process of atoms, and where photons come from, and the relationship between light and electromagnetic waves.

### Keywords

electron orbit, atomic spectrum, orbital resonance, energy quantum

**Subject Areas** Math & Physics

---

## 电子的轨道及原子的光谱

张景伦

河南有线电视网络集团漯河分公司

Email: lh\_zjl@163.com

收稿日期: 2018年7月2日; 发布日期: 2018年7月3日

---

### 摘要

电子在原子核外运转是不争的事实,但运行模式却存在争议,现代理论认为电子没有轨道,但很多实验表明:电子的轨道是存在的。基于共振原理就可以计算出电子的运行轨道,并且能够根据电子的轨道计算出原子的光谱,而且不需要任何的假设。基于电子的轨道模型可以说明原子的发光过程、光子是从哪里来的,以及光和电磁波的关系等物理现象。

### 关键词

电子轨道,原子光谱,轨道共振,能量子

---

## 1. 引言

现代物理认为:光是由于原子核外的电子从高能态跃迁到低能态的过程中发出的,电子的轨道是用概率密度描述的。但是,如果电子的轨道不确定,所发出的光的能量也不可能是确定的。发光的过程也没有描述,例如,光子是从哪里来的?光是什么时候发出的?电子是如何知道跃迁到哪个能级?如何知道发出多少能量的光子?这就是本文所讨论的内容。本文所述的质量和能量是同一概念,不再单独说明。由于原子的发光和电子的轨道关系密切,因

此对于电子的轨道，本文规定一种命名的方式，如图 1 所示：

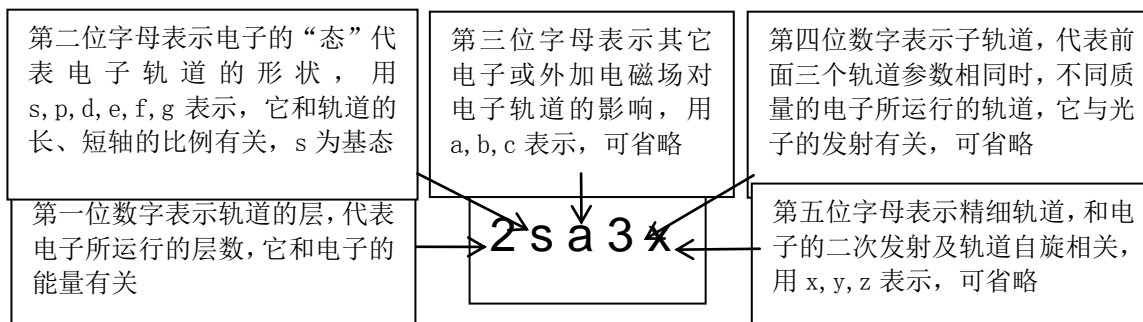


Figure 1. The naming of electronic orbits  
图 1. 电子轨道的命名方式

## 2. 计算

### 2.1. 氢原子的电子轨道及光谱

#### 2.1.1. 氢原子的基态

共振是十分普遍的自然现象，没有共振就没有氢原子<sup>[1]</sup>。氢原子之所以能稳定地存在，是因为电子的固有频率和它绕质子旋转的频率相同。由德布罗意的物质波理论可知：电子的波长可表示为： $\lambda = h / m_e v_e$ ，电子的固有频率为： $f_e = \frac{v_e}{\lambda} = \frac{m_e v_e^2}{h}$ ，电子绕质子运动的频率为： $f_o = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{v_e}{2\pi r_e}$ ，因此，当  $f_e = f_o$  时，电子能稳定运行，即： $\hbar = m_e v_e r_e$  (1)

( $\hbar$  为约化普朗克常数)，由于电子的库仑力和离心力相等： $\frac{kq^2}{(r_e + r_p)^2} = m_e \frac{v_e^2}{r_e}$  (2)

又由于电子和质子绕共同的质心旋转，根据质心定律可得： $\frac{v_e}{v_p} = \frac{r_e}{r_p} = \frac{m_p}{m_e}$  (3)

取电子静态质量  $m_0 = 9.10938215 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ，质子质量  $m_p = 1.672621637 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ，库仑引力系数  $k = 8987551787$ ，电子电量  $q = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，约化普朗克常数  $\hbar = 1.05457174 \times 10^{-34}$ ，设  $\mu = 1 + m_e / m_p = 1.000544632$ 。由 (1) -(3) 可得： $v_e = kq^2 / \hbar \mu^2 = 2185312.3 \text{ m/s}$ 。

电子的空间轨道：电子绕核作圆周运动时，在质心处产生磁场，其大小为： $B = \frac{\mu_0 q v_e}{4\pi r_e^2} = 12.5 \text{ T}$ ，方向符合右手定则，质子在这个磁场中运动会产生一个向心力，其大小为： $F = q v_p B = 2.38 \times 10^{-15} \text{ N}$  ( $v_p$  为质子速度)，为了平衡这个力质子最有可能的方法是：在运动轨道平面的垂直方向增加一个运动速度，其大小为： $v_{p\perp} = (F r_p / m_p)^{0.5} = 0.2 \text{ m/s}$ ，在质子的影响下，电子也会产生垂直于轨道平面的速度，其值为： $v_{e\perp} = (F r_e / m_e)^{0.5} = 372 \text{ m/s}$ 。

电子的空间轨道方程为：
 
$$\begin{cases} x = r_e \cos \omega_1 t \cos \omega_2 t \\ y = r_e \sin \omega_1 t \cos \omega_2 t \\ z = r_e \sin \omega_1 t \sin \omega_2 t \end{cases}$$
 其中：
 
$$\begin{cases} \omega_1 = v_e / r_e \\ \omega_2 = v_{e\perp} / r_e \end{cases}$$

其轨迹如图 2 示：

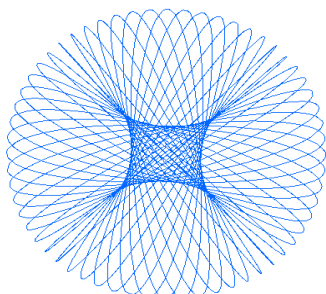


Figure 2. Electronic space orbit  
图 2 电子的空间轨道

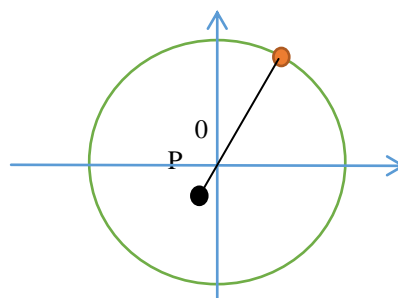


Figure 3. Plane orbit of the electrons  
图 3 电子的平面轨道

如果用统计的方法对核外电子空间分布进行描绘，它就是量子力学中的电子云。图 3 为电子 e 和质子 p 共同绕质心 O 运动的平面轨道。

由于轨道平面的转动所产生的力很小，在以后的计算中忽略。

### 2.1.2 氢原子的激发态

和玻尔的假设不同，电子是不可能跃迁的，因为电子有质量，有动量。电子从一个轨道到另一个轨道只能是过渡，而且角动量守恒，如图 4 示。

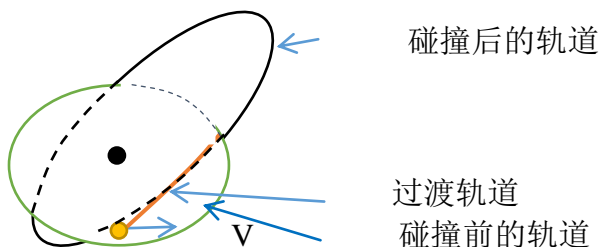


Figure 4. Effect of atom collisions on orbit  
图 4. 原子的碰撞对轨道的影响

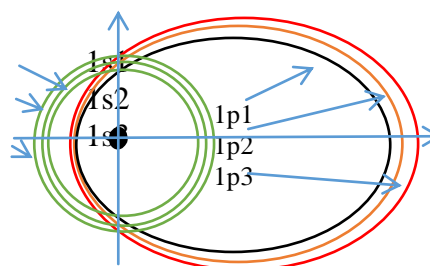


Figure 5. Electronic subtrack  
图 5. 电子的子轨道

椭圆轨道是普遍存在的一种运行轨道，园形轨道只是椭圆轨道的特例，电子运行于基态时是园形轨道，因为只有园形轨道才能使电子的固有频率时刻和轨道频率相等。当原子由于碰撞等原因迫使电子离开基态时，电子的轨道就必然是椭圆轨道（动量守恒）。设电子的振动方程为：  $y = A \sin \omega x$ ，前进的速度为  $u$ ，如图 6 所示：

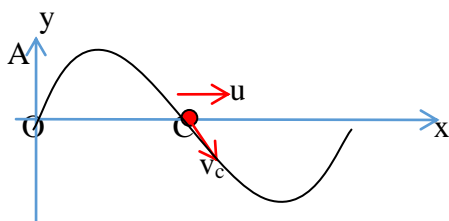


Figure 6. Motion of electrons  
图 6. 电子的运动

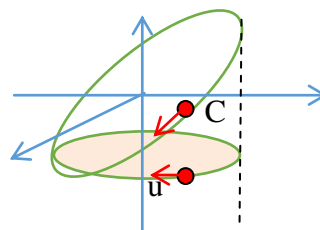


Figure 7. Actual course of motion for electronics  
图 7 电子的实际运动路线

电子在一个周期内前进的距离为  $s = uT = 2\pi u / \omega$ ，把  $x$  轴卷成一个半径  $r = u / \omega$  的圆，平面被卷成圆柱，则  $y = A \sin \omega x$  的图像就围成一个椭圆<sup>[2]</sup>（如图 7 所示），椭圆的半焦距  $c = A$ ，短半轴为  $b = r$ ，长半轴为  $a = \sqrt{A^2 + r^2}$ 。电子在图 6 中的 C 点和图 7 中的 C 点对应，椭圆轨道在垂直于 Y 轴的平面上的投影是一个圆，电子在投影上的速度为  $u$ 。从二维的角度看，电子一直沿直线以速度  $u$ 、频率  $\omega$  向前运动，但从三维角度看，它是在倾斜角为  $\theta = \arctan(A/r)$  的平面内作椭圆运动。由于电子的固有频率为  $f_e = mu^2/h$ ，椭圆轨道的频率为  $f_o = u/2\pi b$ ，当椭圆轨道的频率与电子的固有频率在 C 点相等（或整数倍）时，称之为电子在椭圆轨道上的共振，即： $nmu_c b = h$ ，又因为  $u_c = v_c b/a$ ，可得： $nmv_c b^2 = ah$  (4)

### 2.1.3 电子的亚稳态轨道

一般来说，一个系统有多个共振频率，在这些频率上振动比较容易，在其它频率上振动比较困难，一个系统一般会“挑出”其共振频率并随此频率振动，事实上，一个系统会将其它频率过滤掉<sup>[1]</sup>。在氢原子系统中，由于电子不论在哪个椭圆轨道上，其角动量守恒： $\hbar = m_n v_c b_n$  容易从 (4) 推导出：

$$\text{长半轴为短半轴的整数倍： } a_n = nb_n \quad (5)$$

$$\text{左右顶点的曲率半径恒等于 } r_e : b^2/a = r_e \quad (6)$$

$$\text{短半轴等于曲率半径的整数倍： } b_n = nr_e \quad (7)$$

$$\text{上下顶点处的速度为稳态轨道的 } n \text{ 分之一： } v_c = v_e/n \quad (8)$$

可以看出：电子并不存在跃迁，一般情况下，电子从一个轨道上不可能恰好过渡到另一个亚稳态轨道上，但系统会“挑出”其共振频率，强迫电子回到亚稳态轨道上。

### 2.1.4 电子运动质量的来源

电场具有能量，也具有质量（有争论，因无法测量），电子运动所增加的质量是从质子的电场中获得的，是从电场的能量中收集来的，这里称之为“能量量子 energy quantum”，电子有能力携带这种“能量量子”。电子收集“能量量子”的能力与电子所在点的电场强度成正比（因为电场强度越大，“能量量子”的密度越大），而电子发射能量的能力和电子的速度的平方成正比。因此，电子携带的能量是它收集的能量和发和射的能量之差。有一个形象的比喻：盐在水中的溶解能力和析出能力，盐水的浓度就等于溶解能力与析出能力之差。电子在运行过程中，一直存在吸收和发射，就象盐在水中一直存在溶解和析出一样。

电子在不同的轨道上其质量是不同的，电子在轨道  $n$  运行时的质量为：

$$m_n = m_0 + \Delta m_n \tag{9}$$

( $\Delta m_n$  为电子在轨道  $n$  上所增加的质量)，电子所增加的质量只和它的轨道能量有关，和它的速度无关。电子在椭圆轨道运行时，它的速度时刻在变，但它的轨道能量守恒，因此，电子的质量在同一轨道中是不变的。

在氢原子系统中，电子的吸收能力等于电子的势能，发射能力等于动能。因此，电子携带的能量  $\Delta E_n$  等于电子势能与动能的代数和。由于质子的运动能量  $E_p$  是电子提供的，因此：

$$\Delta E_n = E_e - E_p, \text{ 根据质能方程 } \Delta E_n = -\Delta m_n c^2, \text{ 可得: } -\frac{kq^2}{r_e + r_p} + \frac{1}{2} m_e v_e^2 - \frac{1}{2} m_p v_p^2 = -\Delta m_n c^2,$$

因为  $1 - \frac{m_n}{m_p} \approx \frac{1}{\mu}$ ，由 (3) - (7) 可得： $\frac{\Delta m_n}{m_0 + \Delta m_n} = (\mu - \frac{1}{2\mu}) \frac{v_n^2}{c^2}$ ，取  $c = 299792458 \text{ m/s}$ ，得：

$$\Delta m_n = \frac{2.66112 \times 10^{-5}}{n^2 - 2.66112 \times 10^{-5}} m_0 \approx \frac{2.424116 \times 10^{-35}}{n^2} \tag{10}$$

可得氢原子基态轨道 (1s) 的参数：电子携带的质量  $\Delta m_{1s} = 2.42418 \times 10^{-35} \text{ kg}$ ，轨道能量： $\Delta E_{1s} = -13.5986561 \text{ eV}$ ，轨道半径： $r_{1s} = 52.973924 \text{ pm}$ 。

同理，可得氢原子各轨道的参数如表 1 所示：

Table 1. Parameters of each orbit of a hydrogen atom

表 1. 氢原子各轨道的参数

n	1p	1d	1e	1f	1g
v(m/s)	1092656.15	728437.43	546328.07	437062.46	364218.71
a(pm)	211.89992	476.77659	847.60393	1324.38193	1907.11060
$\Delta E(\text{ev})$	-3.3995937	-1.5109250	-0.8498942	-0.5439320	-0.3777304
$\Delta m(10^{-35} \text{ kg})$	0.6060329	0.2693470	0.1515075	0.0969647	0.0673366

### 2.1.5 电子的子轨道

由于碰撞，任何质量的电子可以运行在任何轨道，也就是说运行在同一个轨道的电子有不同的质量，因此，运行在同一轨道电子由于质量的不同，其半径也会稍有不同，本文称为“子轨道”，如图 5 所示。例如，1s1 为基态主轨道（电子携带的能量和轨道能量相等时的子轨道称为主轨道，不等时称为偏轨道），电子所携带的质量为  $2.42418 \times 10^{-35} \text{ kg}$ ，半径为  $52.973924 \text{ pm}$ ，1s3 为基态第三偏轨道，它是电子在第三轨道 (1d) 发射完光子后返回基态轨道时所运行的轨道，半径为  $52.975177 \text{ pm}$ ，比主轨道 (1s1) 多了  $1.2531 \text{ fm}$ ，这时它所携带的质量为  $0.269347 \times 10^{-35} \text{ kg}$ ，但它也开始从电场中吸收能量，质量一直增长到  $2.42418 \times 10^{-35} \text{ kg}$  为止，其轨道也从 1s3 下降到 1s1。1p2 为第二轨道的主轨道，长半轴为  $211.89992 \text{ pm}$ ，电子携带的质量为  $0.6060329 \times 10^{-35} \text{ kg}$ ，1p1 为电子从第一轨道碰撞到第二轨道时所运行的轨道，此时它所携带的质量为  $2.42418 \times 10^{-35} \text{ kg}$ ，半径为  $211.89569 \text{ pm}$ ，比主轨道少了  $4.229 \text{ fm}$ ，电子发射光子后，其轨道从 1p1 上升到 1p2。运行在各子轨道的电子的长半轴与主轨道的差值（部分）如下表：

Table 2. the difference between the long axis of the electron orbit and of the main

表 2. 电子轨道的长半轴与主轨道的差别

n	1s1	1s2	1p1	1p2	1d1	1d2
$\Delta m(10^{-35} \text{ kg})$	2.42418	0.606033	2.42418	0.606033	2.42418	0.606033

$\Delta a(\text{pm})$	0	+1.0573	-4.229	0	-11.278	-9.5158
-----------------------	---	---------	--------	---	---------	---------

### 2.1.6 电子的发光过程

电子绕质子作椭圆运动时，如果电子携带的质量大于运行轨道的能量，将会产生轫致辐射，辐射的几率和电子所携带的质量与轨道能量之差成正比，在同一轨道中，辐射的几率和轨道的形状有关，电子的速度越大，辐射的几率也越大，也就是说在同一轨道中，近核点的辐射几率最大。

当电子从基态（1s）由于碰撞等原因过渡到第一激发态（1p）时（一般不会直接被碰撞到亚稳态，需要系统的共振选择），电子的轨道从圆形变为椭圆形，上下顶点的速度也变为基态时的一半，但由于从1s态到1p态，其质量并没有变化（ $\Delta m_s = 2.42418 \times 10^{-35} \text{kg}$ ），因此，电子在1p态可能会“甩出”一部分质量，完成自发发射，“甩出”的质量为  $\Delta m_s - \Delta m_p = 1.8181471 \times 10^{-35} \text{kg}$ ，能量为  $\Delta E_{ps} = (\Delta m_s - \Delta m_p)c^2 = 1.63407 \times 10^{-18} \text{J}$ （在E的下标中，p表示电子的运行轨道，s表示电子的原轨道，下同），“甩出”的光子波长为  $\lambda_{ps} = hc / \Delta E_{ps} = 121.564 \text{nm}$ 。

同理，可计算出电子在其他轨道上运行时可能“甩出”的光子的波长（横列表示电子运行的轨道，竖列表示电子原来的轨道，红色字体为各轨道的能量（eV），负数部分为电子从高轨道过渡到低轨道时从电场中吸收的能量）：

Table 3. Relationship between spectra and orbits

表 3. 光谱与轨道的关系

$\lambda(\text{nm})$	1s	1p	1d	1e	1f	1g
1s	13.60	121.56	97.25	94.98	93.78	93.1
1p	-10.20	3.40	656.46	486.27	434.17	410.29
1d	-12.09	-1.89	1.51	1875.6	1282.2	1094.1
1e	-12.75	-2.55	-0.66	0.85	4052.3	2625.9
1f	-13.05	-2.86	-0.97	-0.31	0.54	7459.9

可直接根据（10）式可算出氢原子的里德伯常数： $R = n^2 E_n / hc = n^2 \Delta m_n c / h$

$= 2.424116 \times 10^{-35} c / h = 10967764.79$ ，它比实验值 10967758.54 稍大，是因为没考虑电子不完全发射的影响。

### 2.1.7 电子的精细轨道

电子的精细轨道主要由电子的不完全发射引起的。当电子所携带的能量和运行轨道的能量相等（或小于）时，电子就不能再发射光子了。当电子从一个轨道过渡到另一个轨道时，由于动量守恒，电子不可能直接进入主轨道。如图 5 所示，当电子从 1s 轨道进入 1p 轨道时，电子没发射光子之前的轨道就是 1p1，发射光子后才进入主轨道 1p2，但在主轨道 1p2 中还存在精细轨道 1p2x，这是由于电子没有完全发射引起的。电子为什么不是一次性地全部发射呢？因为电子运行的速度略小于主轨道（主轨道的  $\mu$  值小），而电子发射光子的质量是由它携带的质量和它的速度共同决定的，它们之间的差值越大，发射的光子质量越小。在前面的计算中，电子发射的质量为两个轨道的能量差，但前提是电子发射光子前后的速度保持不变，但光子被发射前的  $\mu (= 1 + m_e / m_p)$  值比发射后的  $\mu$  稍大（ $\mu_{1p1} = 1.000544632$ ， $\mu_{1p2} = 1.000544621$ ）。电子从 1p1 轨道过渡到 1p2 轨道，其速度分别为： $v_{1p1} = 1092656.148 \text{m/s}$ ， $v_{1p2} = 109265.172 \text{m/s}$ 。

因此，电子第一次发射光子后不可能从从 1p1 直接过渡到 1p2 轨道，而是过渡到 1p2x 轨道，电子在 1p2x 轨道第二次发射后才能进入到 1p2 轨道，第二次发射的光子的质量可用实验的方法得出：设  $\gamma$  = 里德伯常数实验值/里德伯常数理论值，则： $\gamma = 10967758.54 / 10967764.79 = 0.99999943$ 。第二次发射光子的质量为：第一次发射的质量乘以  $(1-\gamma)/\gamma$ ，其值为  $1.036 \times 10^{-41} \text{kg}$ 。其物理意义为：由于电子二次发射光子的几率很小，可以认为：实验值就是电子第一次发射的光子质量，而理论值却是两次发射质量的总和。计入电子的精细轨道后，氢原子的光谱就和理论值就一致了。可以算出精细轨道 1p2x 的轨道半长轴和正轨道 1p2 半长轴的差值为  $2.44 \times 10^{-21} \text{m}$ 。如果精细轨道 1p2x 上的电子被碰撞到 1d2 轨道上，电子所发射的光子的波长（比从 1p2 被碰撞到 1d2 轨道上）多 2.04pm。唯有主轨道中存在电子的二次发射。

### 2.1.8 21cm辐射的来源

现代理论认为：21 厘米波来自于基态氢原子的两个超精细结构之间，两个超精细结构能阶的能量不同，当氢原子处在能量最低的能级时，质子的自旋状态从平行变成反平行时会发生超精细分裂。但从氢原子钟的应用过程来看，21 厘米波是不可能产生于氢原子的基态的，氢原子在基态时，不管用什么方法，也不可能发射出 21 厘米波，只有在轨道 1p2x 时才能被发射出来。也就是说：21 厘米波就是电子从基态 1s1 被碰撞到 1p1 态，放出一个质量为  $1.818146 \times 10^{-35} \text{kg}$  光子（波长为 121.6nm），过渡到精细轨道 1p2x 后的第二次发射，其发射质量为  $1.047 \times 10^{-41} \text{kg}$  的光子（波长为 21.1cm），电子在 1p2x 轨道发射光子后过渡到主轨道（1p2）。二者的能量差为  $5.873 \mu\text{eV}$ 。从上述计算可以看出：里德伯常数并不是一个常数，它和电子所在的轨道也有一定的关系。宇宙中之所以存在 21cm 波，是因为氢原子发生碰撞的几率很低，电子能够在 1p2x 轨道存在较长的时间。

### 2.1.9 兰姆位移

现代理论认为：兰姆位移是  $2^2S_{1/2}$ （量子力学表示法）和  $2^2P_{1/2}$  之间的能量差，主要是量子化的电子场与电磁场的高次相互作用引起的，即所谓的辐射修正效应，但这种解释并不一定正确。首先，在量子力学中，所谓的  $2^2S_{1/2}$  态并没有物理意义（没有物理参数，如速度），由于对电子状态的描述是电子云，电子并没有确定的轨道，电子的跃迁也失去了物理意义，跃迁规则更无从谈起，电子的  $2^2S_{1/2}$  态只存在于数学方程中，而本文的轨道理论所描述的 1p1 态具有确定的轨道参数，具有明确的物理意义。其次，电磁波的能量和频率之间没有关系（只与振幅有关），1057.8Mz 的电磁波与电子的能级之间也不存在任何的关系。再次，氢原子和钨极板的碰撞并不能使钨原子电离（不论氢原子的核外电子处于何种状态），而使钨原子电离的是氢原子发射的光子。从实验过程来看，微波系统并不是使氢原子产生  $2^2S_{1/2}$  和  $2^2P_{1/2}$  态的塞曼能级之间的共振跃迁，而是对 1p1 态的扰动(1057.8 MHz 可能是系统的一个共振频率，例如当氢原子以 20.47m/s 运动时，它的共振频率就是 1.0578GHz)，使处于 1p1 态的电子回到 1s1 态，从而使氢原子丧失了发射光子的机会，无法使钨极板发生光电效应。

## 2.2 氢原子的电子轨道及光谱

### 2.2.1 氢原子的基态

氦原子的核外有两个电子，这两个电子是平等的，其轨道结构如图 7 所示，两个电子的轨道在同一个平面，并且关于原子核对称。

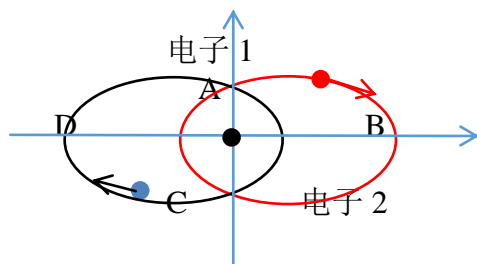


Figure 7. Ground state of helium atoms

图 7. 氦原子的基态

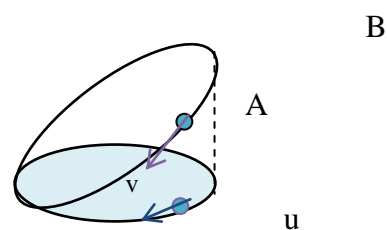


Figure 8. Relationship between speed  $v$  and speed  $u$

图 8 运动速度  $v$  和前进速度  $u$  的关系

和单电子的共振不同，由于两个电子以原子核为中心形成镜像，两个电子之间存在斥力，因此，双电子共振时，其轨道为椭圆形，其短轴与长轴的比值和电子所受的排斥力与吸引力的比值  $\eta$  有关，即  $b/a = (1-\eta)^2$ ，共振时电子的运动速度  $v$  和前进速度  $u$  的关系为  $u/v = 1-\eta$ 。对于氦原子， $\eta = (kq^2 / (2r)^2) / (2kq^2 / r^2) = 1/8$ ，因此， $b/a = (1-1/8)^2 = 0.765625$ ，这时电子在 C 点所受到的力为： $F_c = 2kq^2 / a^2 - kq^2 / (2a)^2 = 7kq^2 / 4a^2$ ，由于  $F_c = mv_c^2 / a$ ， $\hbar = mbv_c$ ，可求出电子在 C 点的速度为  $v_c = 7bkq^2 / 4a\hbar = 2931173m/s$ ， $b = \hbar / mv_c = 39.4926pm$ ，轨道能量  $E = 24.4264eV$ ，共振频率  $f_o = f_e = v_c / 2\pi a = 9.044 \times 10^{15} Hz$ 。

在上述计算中，一直把原子核作为质点，没考虑原子核的大小和结构，由于电子的斥力是通过场传送的，而原子核一直在两个电子的中间，如果考虑原子核的大小和结构， $\eta$  值可能会小一点，但我们对原子核的结构和运行方式并不了解，原子核对电子间斥力传送的影响也不了解，因此，轨道的能量无法准确计算，只能估计为  $E = 24.537eV$ （这时原子核对斥力传送的影响为 0.53%， $\eta = 0.12434$ ， $b/a = 0.766784$ ， $v_c = 2937829m/s$ 。随着原子核体积的增大，原子核对斥力传送的影响也将增大），这时， $b = 39.40pm$ ， $a = 51.46pm$ ，电子云半径为  $r = a + (a^2 - b^2)^{0.5} = 84.6pm$ ，电子携带的质量为  $4.374 \times 10^{-35} kg$ 。根据轨道的命名规则，两个电子的轨道组合为  $1s1s$ 。

### 2.2.2 氦原子的激态轨道

原子碰撞后，其中两个电子都将会脱离原来的轨道，如果碰撞的能量较小，由于共振的作用，电子迅速恢复原状。但如果碰撞的能量足够大，两个电子的轨道将分内外两层，电子 2 在内层，处于共振状态，角动量的值为  $\hbar$ ，轨道为圆形，半径为 26.4632 皮米，速度为 4371495.4m/s，携带的质量为  $9.70147 \times 10^{-35} kg$ ，轨道能量为 54.4212eV，受电子 1 的影响可以忽略不计。电子 1 的轨道也是系统根据共振筛选出来的。

电子 1 的轨道层数由碰撞前的 1 变为 2，和氢原子每个激态都有确定的轨道不同，它的每一个激发态轨道都有多个，这是由于两个电子的轨道平面不能保持平行造成的，但有两种特殊情况（这两种特殊情况并没有特别的意义，只是便于计算，两个轨道平面的夹角一直发生变化）：



第一种是两个电子的轨道在同一平面（用 2xa 表示），如图 9 所示。设电子 1 的激发态为椭圆轨道，图中 A、B、C 为椭圆的三个顶点，在三个点的速度分别为  $V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$ ，轨道的半长、短轴和半焦距分别为 a、b、c，在 C 点，电子 1 所受到的力为原子核的引力和电子 2 在法线方向上的斥力之差，即：

$$F_c = 2kq^2 / a^2 - \frac{kq^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} (a - r \cos \theta) / (a^2 + r^2 - 2ar \cos \theta)^{3/2} d\theta \quad (11)$$

（其中 r 为电子 2 的轨道半径），由于在椭圆的上下顶点处，电子的轨道可等效为一个以原子核为圆心，半长轴为半径的园： $F_c = mv_c^2 / a$

(12)

根据（4）式：当 n=1 时， $a_1 = b_1 = 62.93\text{pm}$ ，很明显，这个轨道是不存在的，因为当电子 2 出现在原子核和电子 1 的中间时，它所受到的斥力大于引力，应舍弃。当 n>1 时，和氢原子的轨道计算方式相似，得到的 a、 $V_C$  及轨道能量如下表所示：

Table 4. Orbital parameters when two electron orbitals of helium atoms are parallel

表 4. 氦原子的两个电子轨道平行时的轨道参数

n	2pa	2da	2ea	2fa	2ga	2ha
a(pm)	214.157	477.357	847.295	1323.326	1905.293	2593.143
$v_c(\text{m/s})$	1081144	727548	546524	437408	364563	312503
E (eV)	-3.32289	-1.4657	-0.7959	-0.49198	-0.37683	-0.27763

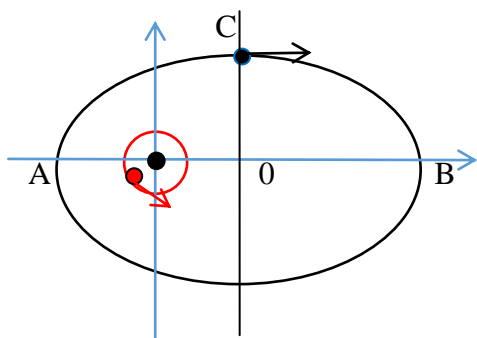


Figure 9. Parallel plane of two electrons  
图 9 两个电子的轨道面平行

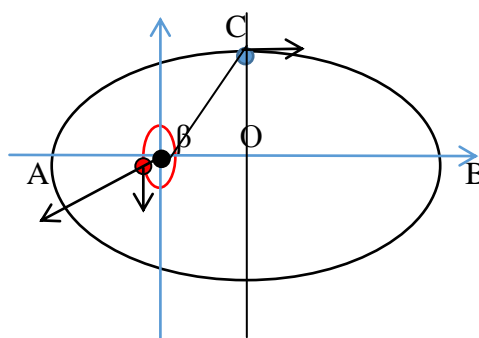


Figure 10. Vertical plane of two electrons  
图 10 两个电子的轨道面垂直

第二种情况是两个电子的轨道平面相垂直，如图 10 所示，和前一种情况相似，设电子的轨道为椭圆，电子 1 在 A、C 点所受的力分别为：

$$F_c = 2kq^2 / a^2 - \frac{kq^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} (a - r \cos \theta \sin \beta) / (a^2 + r^2 - 2ar \cos \theta \sin \beta)^{3/2} d\theta$$

（其中  $\beta$  为 C 点与焦点的连线和 X 轴的夹角）， $F_A = 2kq^2 / a^2 - kq^2(a - c) / ((a - c)^2 + r^2)^{3/2}$ 。当 n 大于 1 时，可计算出电子 1 的轨道参数如表 5 所示：

Table 5. Orbital parameters when two electron orbits are vertical

表 5. 两个电子轨道垂直时的轨道参数

n	2pb	2db	2eb	2fb	2gb	2hb
a(pm)	206.69	460.370	832.14	1308.91	1891.26	2579.35
$v_c$ (m/s)	1120204	754398.5	556481	442228.6	367271	314177
E (eV)	-3.5763	-1.63575	-0.88033	-0.55596	-0.38346	-0.2806

表 6 为氢原子的外层电子运行的轨道、能量及波长（横列表示电子运行的轨道，竖列表示碰撞前的轨道，红色字体为各轨道的能量（eV），负数部分为电子从高轨道过渡到低轨道时从电场中吸收的能量）。

Table 6. Relationship of orbits, energy levels, and wavelengths of outer electrons

表 6. 外层电子的轨道、能级及波长的关系

$\lambda$ (nm)	1s	2pb	2pa	2db	2da	2ea	2fa
1s	24.537	59.15	58.44	54.14	53.73	52.22	51.56
2pb	-20.96	3.576	5072.37	639.09	587.60	447.37	403.16
2pa	-21.22	-0.25	3.323	734.99	667.59	490.64	437.96
2db	-22.90	-1.94	-1.68	1.636	7468.91	1649.45	1083.76
2da	-23.07	-2.11	-1.86	-0.25	1.466	1850.23	1284.33
2ea	-23.74	-2.78	-2.53	-0.91	0.67	0.796	4079.49
2fa	-24.05	-3.09	-2.83	-1.14	-0.97	-0.30	0.492

氢原子处于激态时，外层电子的轨道、能级及波长图（灰色方框为理论上存在）如图

11 所示：

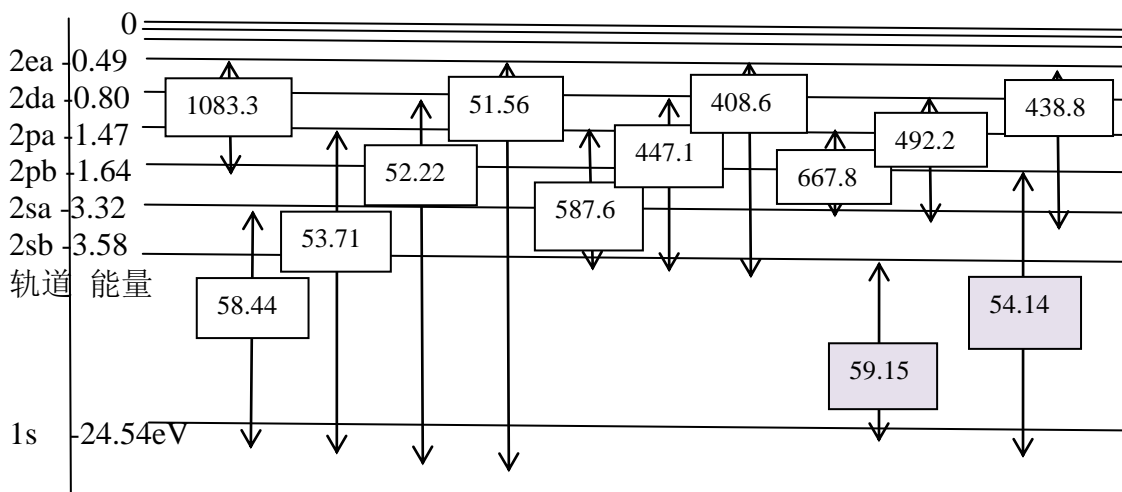


Figure 11. Orbital, energy level, and wavelength diagram of the outer electron

图 11. 外层电子的轨道、能级及波长图

### 2.3 锂原子的轨道及光谱

锂原子的电子层结构如图 11 所示，锂原子核外共有 3 个电子，分为两层，内层有两个电子，结构和氢原子相似，可以求出内层电子的轨道参数： $a=26.35\text{pm}$ ， $b=22.44\text{pm}$ ， $E=75.62\text{eV}$ ， $\eta=0.077$ ，外层电子和氢原子的第一激发态相似，轨道平面和内层电子的轨道平面相互垂直，但它并不是标准的椭圆形，而是蛋圆形，它的近核点的曲率半径大于远核点的曲率半径，角动量守恒但能量不守恒。为了计算方便，仍然假设外层电子的轨道为理想的椭圆形，但所得

到的轨道参数为近似值。由于动量守恒，根据第一电离能 ( $E=-5.39\text{eV}$ ) 可计算出半短轴： $b = \hbar / mv = \hbar / (2Em)^{0.5} = 84.1\text{pm}$ 。由于轨道和氢原子的第一激发态相似，可计算出轨道的长轴： $a/b = \sqrt{E_H / E_{Li}} = \sqrt{13.6 / 5.39} = 1.59$ ， $a=133.6\text{pm}$ ，和电子云的半径： $r=a+c=237.4\text{pm}$ 。

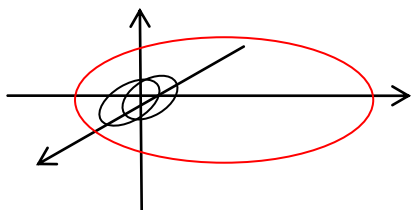


Figure 12. Ground state orbits of lithium atoms

图 12. 锂原子的基态轨道

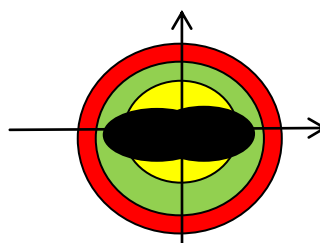


Figure 13. Energy distribution at the near-nuclear point

图 13. 锂原子的近核点的能量分布

### 2.3.1 “量子缺”形成的原因

在量子力学中，计算锂原子光谱时，需要引入“量子缺”的概念，它是由于外层电子的运行轨道受内层电子的影响引起的，电子越靠近原子核，轨道近核点的曲率半径越大，平方反比定律失效。当没有内层电子影响时，由于动量和动能都守恒，电子的轨道总满足  $a = nb = n^2 r$  ( $r$  为近核点的曲率半径)。考虑内层电子的影响后，外层电子的角动量守恒但动能不守恒，外层电子的轨道是蛋圆形而不是椭圆。但如果引入“量子缺”，电子向原子核靠近时，在一定的位上，平方反比定律仍然有效。所谓的“有效量子数”可能就是  $a/b$ 。

### 2.3.2 辅线系是如何形成的

锂原子的近核点可大致划分四个区域，黑色部分为内层电子的运行空间，是外层电子的禁区，黄色为低能区（其轨道用  $2xa$  表示），绿色为中能区（其轨道用  $2xb$  表示），红色为高能区（其轨道用  $2xc$  表示）。锂原子外层电子的基态运行在低能区。当原子发生碰撞时，外层电子就会脱离原来的轨道进入高轨道，由于内层电子轨道平面的旋转(轨道的进动)，外层电子的轨道平

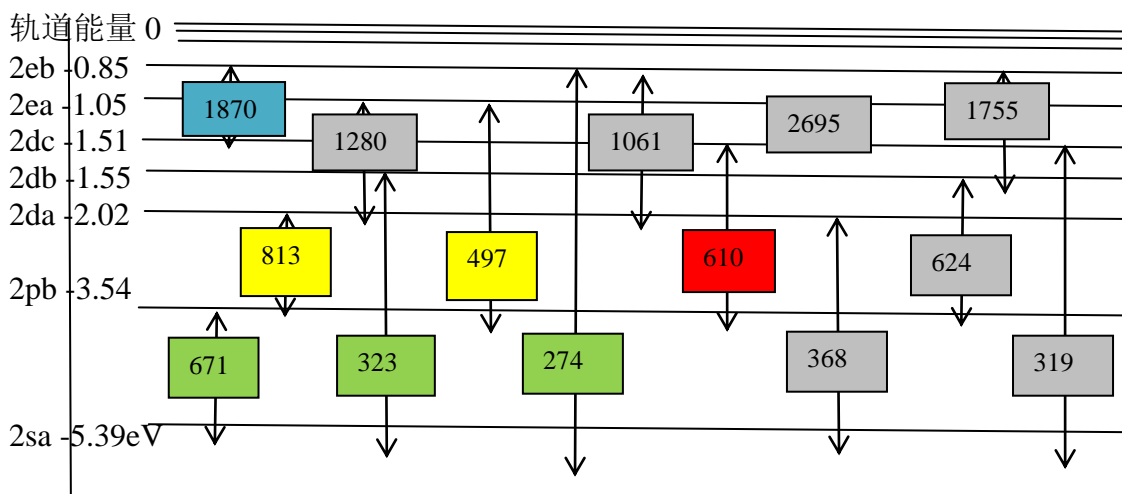


Figure 14. Orbits, Energy Levels, and Wavelengths of Outer Electrons in Lithium Atoms  
图 14 锂原子外层电子的轨道、能级及波长图

面与内层并不同步，当电子返回到近核区域时，它可能会进入上述三个区域中的任何一个。电子在近核区发射光子的几率最大，进入低能区的电子所发射的光称为漫线系，中能区称为主线系，高能区称为锐线系。

锂原子的能级及光子的波长如图 14 所示（灰色为理论上存在），2pa 和 2pc 轨道理论上存在的，但由于轨道周期不是太长，所有在核外运行的电子都在努力寻找合适的轨道使自己的能量最低，这时的外层电子还能和内层电子保持准同步，因此，只有 2pb 存在。

### 2.3.3 原子实的极化和电子轨道贯穿

原子实是指内层电子运行的轨道，对于锂原子，它的内层电子的电子云半径为  $r=a+c=36.35\text{pm}$ ，由于内层电子能量高，其运行轨道几乎不受外层电子的影响，因此，原子实的极化可以忽略不计。锂原子基态时，外层电子离原子核最近处为  $29.73\text{pm}$ ，称之为轨道贯穿，轨道贯穿的原因是原子实并不是球形（像花生）。轨道贯穿是产生“量子缺”的必要条件，贯穿越深，“量子缺”越大，漫线系的每条谱线是由多条谱线组成的原因就是轨道贯穿。

## 2.4 电子层的结构

电子层的结构和原子的发光存在紧密关系，在多电子的原子中，电子的运行轨道及相互关系是计算原子发光的根据。电子在原子核外的排列必须是球对称，因此每层的电子数必须为  $2n^2$ ，也就是说，电子数必须为：2、8、18、32、50、72。每个电子都处于共振状态，其角动量都为  $\hbar$ 。

### 2.4.1 第一电子层

这一层的电子共两个，轨道和氢原子相似，如果不考虑原子核对两个电子间斥力的影响，电子在 C 点（椭圆的上下顶点）所受的力为  $F_c = Zkq^2/a^2 - kq^2/(2a)^2 = (4Z-1)kq^2/4a^2$ ， $b/a = (1-1/4Z)^2$ ，由于共振和动量守恒， $\hbar = mv_c b$ ， $v_c = (4Z-1)bkq^2/4a\hbar$ ，每个电子的能量为： $E = mv_c^2/2$ ，电子携带的质量为  $\Delta m = E/c^2$ 。如果考虑原子核对电子间斥力的影响，所得的结果有一定的修正。例如钠原子，它的质子数  $Z=11$ ， $b/a = (1-1/44)^2 = 0.955$ ， $v_c = 43kq^2(b/a)/4\hbar = 22459448\text{m/s}$ ， $E = 1438.1\text{eV}$ ， $b = 5.14\text{pm}$ ， $a = 5.38\text{pm}$ 。考虑原子核对电子斥力的影响后， $b = 5.09\text{pm}$ ， $a = 5.33\text{pm}$ ， $E = 1465.1\text{eV}$ ， $\Delta m = 2.612 \times 10^{-33}\text{kg}$ 。原子序数小于 10 的原子第一层电子的参数如表 7 所示。

Table 7. Orbital parameters of the first layer of electrons  
表 7. 第一层电子的轨道参数

Z	3	4	5	6	7	8	9	10
E(eV)	75.64	159.51	259.37	392.09	552.07	739.28	953.91	1195.8
a(pm)	26.707	17.582	13.426	10.729	8.9293	7.6439	6.6799	5.9308
b(pm)	22.442	15.453	12.117	9.8537	8.3029	7.1737	6.3140	5.6379
a/b	1.1901	1.1378	1.1080	1.0888	1.0754	1.0656	1.0580	1.0519

### 2.4.2 第二电子层

该电子层共有 8 个电子，每个电子都是平等的，都有基本相同的轨道参数（没成对的电子稍有不同），基本相同的能量，每两个电子构成一对（和氦原子相似），共 4 对电子组成“米”字型结构围绕原子核运转，如图 13 所示。

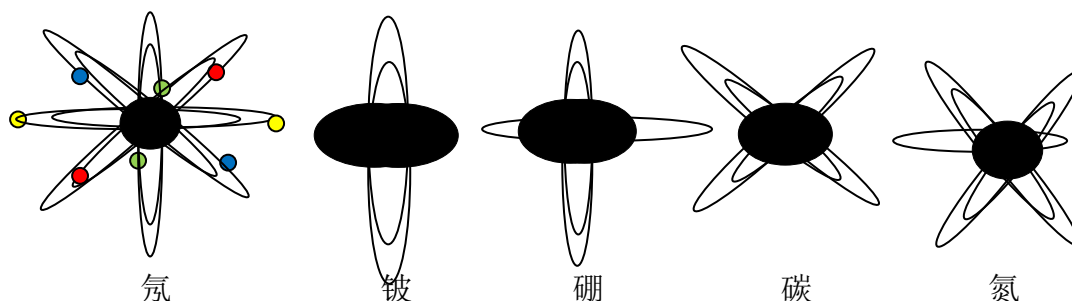


Figure 15. Second layer electronic structure of atoms

图 15.原子的第二层电子结构

如果电子达不到满层，电子的结构就会自动排列成像硼、碳或氮原子那样。当原子序数大于 10 时，第二电子层将会被充满。每个电子都会自动寻找电场强度最大的地方运转，使自己的能量达到最低。由于每个电子都是平等的，当原子核一定时，核外不同的电子数，电子的结构也会有所不同，例如，氖原子的核外有 9 个电子时，它的结构和氟原子相同。电子轨道的长、短轴的比值与轨道能量的关系为： $a/b = ((Z-2)^{0.5} (13.6/E))^{0.5}$ ，它在量子力学中被称为“有效量子数”。电子在上下顶点处的速度为  $v_c = (2E/m)^{0.5}$ ，短轴为  $b = \hbar/mv_c$ 。

Table 8. Orbital parameters of the second layer of electrons

表 8 第二层电子的轨道参数

Z	3	4	5	6	7	8	9	10
E(eV)	5.3917	9.3226	8.2980	11.260	14.534	13.618	17.423	21.565
a(pm)	133.58	91.87	114.22	90.45	74.10	82.77	67.24	56.17
b(pm)	84.06	63.93	67.76	58.17	51.20	52.89	46.76	42.03
a/b	1.588	1.436	1.685	1.554	1.446	1.564	1.437	1.336

当 Z 大于 10 时，由于电子数不再增加，长、短轴的比值与轨道能量的关系为： $a/b = 0.561(Z-7)(13.6/E)^{0.5}$ ，随着 Z 值的增加，a/b 趋近于 1，轨道也逐渐变为近园形。Table

9 Orbital parameters of the second layer of electrons

表 9. 第二层电子的轨道参数

Z	11	12	13	14	15	16	17	18
E(eV)	47.29	80.14	119.99	166.77	220.42	280.95	348.28	422.45
a(pm)	43.063	31.118	23.998	19.304	15.999	13.557	11.690	10.222
b(pm)	28.384	21.802	17.817	15.112	13.144	11.642	10.456	9.493
a/b	1.2052	1.1571	1.1348	1.1230	1.1164	1.1124	1.1101	1.1088

### 2.4.3 第三电子层

第三电子层和第二电子层结构相同，但第三层电子轨道的长轴和第二层轨道的长轴相互垂直，电子轨道的长、短轴的比值与轨道能量的关系为： $a/b = ((Z - 10)^{0.5} (13.6 / E))^{0.5}$ 。

Table 10. Orbital parameters of the third layer of electrons

表 10. 第三层电子的轨道参数

Z	11	12	13	14	15	16	17	18
E(eV)	5.139	7.646	5.986	8.152	10.487	10.360	12.968	15.760
a(pm)	140.07	111.95	158.26	124.88	102.64	108.74	90.29	76.81
b(pm)	86.10	70.59	79.78	68.36	60.27	60.64	54.20	49.17
a/b	1.627	1.586	1.984	1.827	1.703	1.793	1.666	1.562

当 Z 大于 18 时，由于电子数不再增加，长、短轴的比值与轨道能量的关系为： $a/b = 0.422(Z - 14)(13.6 / E)^{0.5}$ 。

Table 11. Orbital parameters of the third layer of electrons

表 11. 第三层电子的轨道参数

Z	19	20	21	22	23	24	25	26
E(eV)	31.63	50.91	73.49	99.30	128.13	160.18	194.54	233.61
a(pm)	48.048	35.821	28.953	24.487	21.349	18.974	17.185	15.611
b(pm)	34.704	27.354	22.768	19.586	17.241	15.420	13.992	12.768
a/b	1.3833	1.3084	1.2706	1.2492	1.2372	1.2295	1.2272	1.2217

### 2.4.4 第四电子层

第四电子层和第五层相似，与第三层相比，电子的轨道具有明显的立方体化，如果以第一电子层的  $\sigma$  平面为准，第二电子层的轨道短轴平行于这个平面，第三电子层则是长轴平行于它，而第四电子层的所有电子轨道平面只平行于同一条直线（称之为中轴线）。第四和第五电子层结构相同，都是 9 个电子对，每 6 个电子为一组，构成 3 个电子对，其轨道的长轴在一个平面内，其短轴互相平行。18 个电子组成三组，这三组电子轨道的长轴所在的平面互成 60 度的角。每个电子通过上下顶点的平均间隔为轨道周期的 1/9，每个相邻轨道之间的夹角为 20 度。其电子轨道如图 16 所示，其参数如表 12 所示。

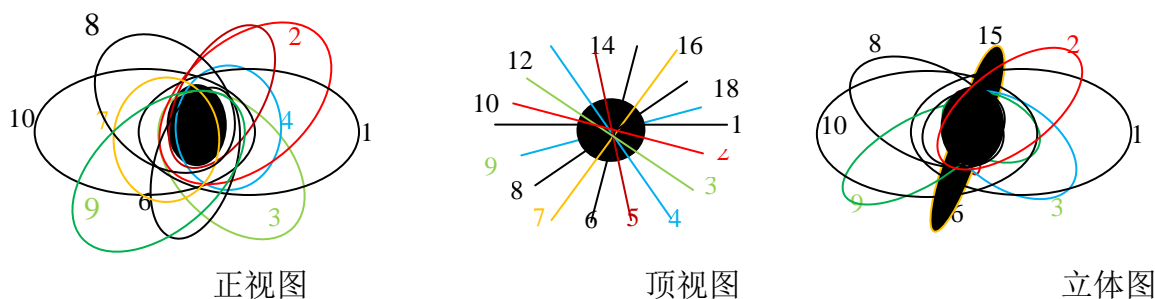


Figure 16. Electron orbit of the fourth electron layer

图 16. 第四电子层的电子轨道

Table 12. Orbital parameters of the fourth layer of electrons  
表 12 第四层电子的轨道参数

Z	19	20	21	22	23	24	25	26
E(eV)	4.341	6.113	6.767	7.434	7.902	7.881	7.64	7.264
a(pm)	165.83	124.76	116.58	108.69	104.16	106.05	110.81	117.84
b(pm)	93.690	78.950	75.040	71.590	69.430	69.530	70.620	72.420
a/b	1.770	1.580	1.554	1.518	1.500	1.525	1.569	1.627

第六和第七电子层相同，都是 16 个电子对。和第四、五层不同的是：它是每 8 个电子为一组，构成 4 个电子对，32 个电子组成四组，每组电子轨道的长轴所在的平面互成 45 度的角。但前 9 个电子对和第四层有相似的结构。

总之，原子核外的电子所运行的轨道必须满足共振和角动量守恒，也就是： $\hbar = mvb$ ，电子轨道的大小和原子核的电荷数、内层电子数及本层电子数有关，与外层电子的关系不大，可以忽略外层电子的影响。电子的运行规律符合经典力学和经典电磁学。

### 3 讨论

本文对电子轨道的讨论忽略电子的进动和轨道平面的旋转。

#### 3.1 电子的轨道理论为什么被抛弃

按经典电磁学，电子绕核运动必须向外辐射电磁波，电子能量逐渐降低，最终落入原子核，即原子将不能稳定存在。但事实上原子可以稳定存在，为了解决这一问题，玻尔假设电子处于某些定态（即我们现在所说的轨道）时，不辐射电磁波，到了薛定谔仍然沿用这个假设，只不过将定态波函数理解为驻波以解释它的稳定性。但是量子力学并没有解决这个问题，只是回避了这个问题。电子绕核运动是不争的事实，电子绕核运动确实向外辐射电磁波（不是光子），但电子所辐射的电磁波是从电子的静态电场能量转化而来的，电子的运动能量并没有降低，因此，抛弃电子的轨道理论是没道理的。

#### 3.2 玻尔理论的缺陷

玻尔理论<sup>[3]</sup>第一次把光谱纳入到一个理论体系，起到了一定的推动作用，指出了电子的轨道是离散化的（量子化），但它是轨道共振筛选的结果。电子并不存在跃迁，任何粒子都有轨迹，而且必须是连续的，光子也不例外。发光也不是在跃迁过程中产生的，电子并不知道将会跃迁到哪里，也就不可能知道要发出多少光子。因角动量是守恒的，电子在任何轨道的角动量恒等于约化普朗克常数 $\hbar$ ，并不等于 $n\hbar$ 。除第一轨道外，电子运行的轨道是椭圆的，并不是园形轨道。

#### 3.3 电子的质量和速度有关吗

从上面的讨论可以看出：电子的质量和它的速度没有关系，但是在相对论中质速度关系 $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ 是经过实验证明的，可是，相对论并没有说明质量为什么增加，所增加的质量是什么。实际上，各种实验证明的是质能定理的正确，即： $\Delta E = \Delta mc^2$ ，并不是质速关系，如果电子为束缚态，当然要包括势能。电子在电场中的加速过程，也是电子在电场中吸引能量的过程，相对论中所增加的质量是电子在电场中吸收的“能量子”。电子在电场中吸收的“能量子”和电场强度成正比，和吸收的时间成正比，而电子释放能量只能是以发射光子的

方式，因此，如果一个能量为 1MeV 的电子经过一个反向电场时，如果这个反向电场的强度不太大（使电子不发生韧致辐射），它的质量就不会减少。也就是说：电子处于加速电场时，质速关系成立，但在反向电场中失效，在反向加速器中能够产生高质量低速度的电子，因此，电子的质量和速度没有关系。同理，可以认为光子的静止质量与运动质量相等，但静止的光子不存在，因为光子又变为“能量子”。

### 3.4 光是电磁波吗<sup>[4]</sup>

光和电磁波有很多相同之处，但光却不是电磁波，二者的区别如下：

- 1、根源不同，电磁波是振荡电路中的自由电子周期性运动产生的，是电子的静电场转换而来的，电磁波产生后，电子的质量不会减少；光子是电子发射的自身所携带的能量，光子发射后，电子的质量会减少。
- 2、形式不同，电磁波是面，光子是点。
- 3、结构不同，电磁波是场，光子是粒子。
- 4、性质不同，电磁波受电和磁的影响，而电和磁对光子影响很小。
- 5、传播不同，电磁波符合麦克斯韦理论，能穿越非电磁屏蔽性物质，而光子符合物质波理论，只能穿越透光性物质。
- 6、能量不同，电磁波的能量和振幅有关，而光子的能量和频率有关。
- 7、作用不同，电磁波能对物体的内部加热，而光子只能对物体表面加热。
- 8、人类无法“看”到和可见光同频的电磁波。

21cm 辐射虽然是在微波频段，但它是光，而不是电磁波，只能采用光的接收方法，而不能采用电磁波的方法接收它。

可以认为：电磁波是发散的光子。

### 3.5 电子轨道的变迁

电子自发发射时，并不存在所谓的跃迁，自发发射的能量是由电子所携带能量的大小及轨道能量共同决定的，子轨道是由电子的质量决定的，轨道的变迁是由碰撞等因素决定的。电子从稳态到亚稳态比从亚稳态到稳态困难很多，电子从稳态到亚稳态时，原子的碰撞能量必须不小于轨道间的能量差，而从亚稳态回到稳态要容易很多，只需很小的能量（如电场的扰动）。由于碰撞的不确定性，电子可以从任意轨道到任意轨道，并不存在所谓的“跃迁规则”。电子从高轨道回到低轨道时是不可能释放能量的，它也没有能量可以释放，当电子在高轨道释放完光子后，必须回到低轨道吸收电场的能量，才能重新发光。如果电子回到低轨道后还没有吸收足够的能量，即使又被碰撞到高轨道，也不可能再发光。

### 3.6 X 射线标识谱

现代理论认为：当高速电子轰击靶原子，将原子内层电子电离，内层产生一个电子的空位，外层电子跃迁到内层空位所发出的电磁辐射谱线就是标识谱。但是，外层电子跃迁到内层时是不可能发出光子的，因为没有光子可发。当高速电子轰击靶原子时，高速电子并不是将原子内层电子电离，而是在电子层之间穿梭，例如  $K\alpha$  就是高速电子穿越第一层和第二层之间时所释放的能量， $K\alpha$  和第一电子层的能量  $E_1$  有一定的关系：



Table 13. Relationship between X-ray identification spectrum and orbital energy  
表 13.X 射线标识谱与轨道能量的关系

Z	19	20	21	22	23	24	25	26
E1(eV)	4611.0	5128.9	5674.9	6249.1	6851.4	7481.8	8140.8	8828.5
Ka(eV)	3310	3690	4088	4508	4949	5411	5895	6400
E/Ka	1.393	1.390	1.388	1.386	1.384	1.383	1.381	1.379

可以认为：X 射线标识谱是高速电子经过原子核附近时发出的韧致辐射，其原因是每种原子的每层电子的半径是固定的。

### 3.7 电离能

每个原子的每个电子的能量是固定的，是可以计算出来的，例如：如果不考虑原子核的大小和电子质量的增加，每个原子的最后一个电子的电离能（第 Z 电离能）为： $E_z = 13.6Z^2$  eV，13.6eV 是氢原子的电离能，Z 是原子的核电荷数，例如钾的第 19 电离能为 4909.6eV。但实测钾的第 19 电离能为 4934.2eV，这是由于没考虑原子核的大小和电子质量的增加引起的。随着原子核的半径增加，电子的速度  $v$  将比  $Zkq^2 / \hbar$  略小，但由于原子核的结构不知道，速度减少的值无法计算出来，而电子增加的质量为  $v^2 / (2c^2 - v^2)$ 。因此，每个原子的第 Z 电离能可以估算为： $E_z = 13.6Z^2(1 - Z/10000)(1 + Z^2 / (50000 + 10Z^2))$ ，其中，第一修正项为原子核的影响，第二修正项为电子质量增加的影响。其它电子的电离能需要增加椭圆轨道修正。例如每个原子的第 Z-1 电离能为（式中的最后一项为轨道修正）：

$$E_{Z-1} = 13.656Z^2(1 - Z/5000)(1 + Z^2 / (50000 + 10Z^2))(1 - 1/Z/1.523)^2。$$

电子的轨道能量是电子的势能和动能的代数和，但它和电离能相差很小，因此，本文没有对二者区分。

### 3.8 电磁场是什么

17 世纪的 R.笛卡尔最先将以太<sup>[5]</sup>引入科学，建立了以太旋涡说，以太虽然不能为人的感官所感觉，但却能传递力的作用，19 世纪大多数物理学家相信以太的存在。麦克斯韦用以太成功地将电磁力线表述为一组数学方程式，但将电磁理论推广到运动物质上并未成功，因为这理论的一个难题是物质本身并不会衰变为以太。1920 年，爱因斯坦曾指出：狭义相对论虽然不需要以太的概念，但是并未否定以太，而根据广义相对论，空间具有物理性质，在这个意义上，以太是存在的。他甚至说，根据广义相对论，没有以太的空间是无法想像的。随着 21 世纪人类对暗物质、暗能量研究的开展，“以太说”开始复活。在笛卡儿看来，以太是一种刚性的粒子，十分地坚硬，比最硬的物质金刚石还要硬上不知多少倍。同时，物质在穿过它们时完全不受到任何阻力。宇宙中存在这种物质吗？当然有！它就是中微子。现代科学认为：太阳体内的核反应每秒会产生 10 的 38 次方个中微子，畅通无阻的从太阳流向太空，每秒钟会有 1000 万亿个来自太阳的中微子穿过每个人的身体。实际上，中微子也是光子，只是波长较长，但也是由本文提出的“能量子”组成的。光子是通过电子收集“能量子”而成的，而光子和其它物质碰撞后，又变回“能量子”，宇宙中的光子在传播过程也会逐渐衰减<sup>[6]</sup>（产生红移），最终都会变为“能量子”。从某种意义上说物质和以太是可以相互转换的，因此，电磁场就是“能量子”组成的涡旋场，“能量子”的质量可能为  $m = h/c^2 = 7.37 \times 10^{-51} \text{ kg}$ 。

## 4 结论

共振不仅在物理学上运用频率非常高，而且，共振现象也可以说是一种宇宙间最普遍的和最频繁的自然现象之一，所以在某种程度上甚至可以这么说，是共振产生了宇宙和世界万物，没有共振就没有世界。通过以上讨论，可以得出如下四点结论：

- 1、电子的轨道是确定的，其大小是由共振关系决定的。
- 2、光子是电子从原子核的电场中收集的“能量子”，收集“能量子”的能力和轨道的势能有关，发射光子的能力和轨道的动能有关。
- 3、电子的轨道的变迁是由原子的碰撞决定的，和光子的发射无关，电子可以过渡到任何轨道，并且动量守恒，电子不存在跃迁，更不存在跃迁规则。
- 4、当电子沿椭圆轨道运行时，它离原子核最近时发射光子的几率最大，所发射的光子质量的大小是由电子所携带的能量及所在的轨道共同决定的，电子发射光子后，它所携带的能量和轨道能量基本相等，二次发射的几率很小。

## 参考文献

- [1] 百度百科 <https://baike.baidu.com/item/共振>
- [2] 百度百科 <https://baike.baidu.com/item/正弦>
- [3] 玻尔的原子理论 <https://wenku.baidu.com/view>
- [4] 韩书亭 光与电磁波的本质 <http://www.docin.com>
- [5] 李宏远 (2004) 以太说的潜科学价值。台州学院学报, 26, 3
- [6] 张景伦 (2017) 恒星距离的计算方法。汉斯预印本, 2, 1-7