

一种新的原子模型

作者: 叶苍

电子邮件: cang.ye1@gmail.com, 或 jshelp@163.com

摘要

本文给出了库仑定律在原子尺度上的扩展—一个描写和规范在原子世界里电子和原子核如何作用的公式。根据这个扩展的库仑定律,作者提出了一个新的原子模型。与现有的电子云模型和更早期流行的波尔模型比较,本模型更加接近原子的真实物理结构。在这个新原子模型基础上,利用简单的积分运算,作者成功导出了氢原子气体的光谱和电离氦气体的光谱。

关键词: 能级, 库仑定律扩展, 平衡点, 平衡球面。

库仑定律的微观扩展

物理上著名的库仑定律 $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$ 是人类认识宏观世界的结论。在原子尺度上,这个公式并不适用。其微

观扩展公式是:

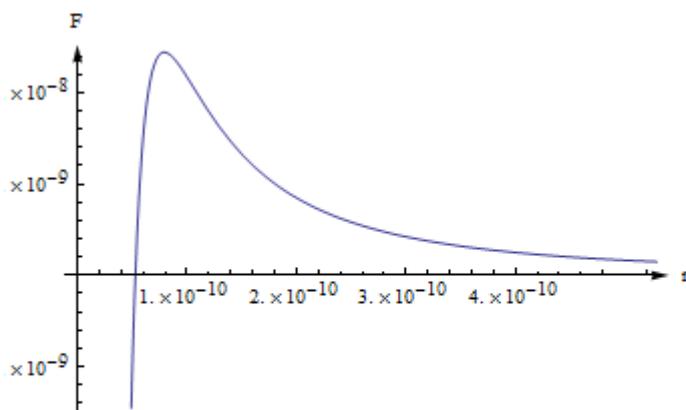
一个质子对电子的吸引力:

$$F = \left(1 - \frac{R}{r}\right) k \frac{q_1 q_2}{r^2} \text{ ----- (1)}$$

公式里 R 是波尔半径($R = 5.29177 \times 10^{-11} \text{ m}$)。 k 是库仑常数为 $\frac{1}{4 \pi \epsilon_0}$, ($k = 8.98755 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$), $q_1 = q_2$ 是基础电荷

电量= $1.6021892 \times 10^{-19} \text{ C}$, 也就是一个电子或一个质子的电量的绝对值。

根据这个公式,质子附近的电子受力如下图所示:



Force exerted on an electron by a proton

我们早已知道,当一个电子慢慢靠近一个质子的过程中,它们之间的引力不可能按照库仑定律说的那样无限增加。实际情况是,在靠近质子的路径上有一个受力平衡点。电子在这点之外时候受到的是引力,距离小于这个点电子受到的是排斥力。在这点上,电子受力是0。这个平衡点和质子的距离实际就是波尔半径。我们用 B 表示这个平衡点。

以氢原子为例:

平衡点 B 等于波尔半径 R ($R = 52.9 \text{ pm}$)。当 $r > R$ 时候,电子受到的是质子的引力,当 $r < R$ 时候电子受到的是排斥力。

这也是为什么电子永远不会被吸入原子核的原因,随着电子和质子的距离减小,引力变为了排斥力并且异常强大。

在宏观尺度上，这个扩展 $F = \left(1 - \frac{R}{r}\right) k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ 退化为我们熟知的库仑定律 $k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ ，因为 $r \gg R$ 。

等机会电子排列

在一个原子内部，如果各个电子有均等的机会被原子核吸引，我们就称作这个原子是一个等机会排列原子。也就是：从原子核往外看，各个电子位于对称的空间位置，有均等的机会被原子核吸引。

在等机会排列原子中，每个电子受到合力（原子核的引力和其它电子的排斥力）可以用下面公式表示：

$$F = \frac{n_p}{n_e} \left(1 - \frac{B}{r}\right) k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad \text{----- (2)}$$

公式里 n_p 是原子核里质子数， n_e 是被原子核吸引的电子数。平衡点 $B = \frac{n_e}{n_p} R$ (电子之间的排斥力使得平衡半径加大)。R 是波尔半径。

根据公式 (2)，多于核电荷数（质子数）的电子可以被原子核临时吸引，这时候电子数 n_e 大于质子数 n_p 。公式 (1) 是公式 (2) 的特殊情况，也就是当原子中正负电荷数各等于 1 时的特例。

原子是如何形成的

当一个电子接近一个质子的時候，质子吸引电子靠近自己一直到平衡点位置。电子在这里受力是 0 保持不动，一个氢原子就形成了。平衡点有无数个，构成了以 R 为半径的球面。电子在这个平衡球面上有热运动，包括球面上漂移或者径向热震动。

氢原子的形成是最简单的情况。对于更大的原子，比如钠，是多个电子被原子核吸引而形成。这时候的电子排列分层。最开始两个电子位于第一层球面（按照前面公式），因为电子之间的排斥力，第三个过来的电子将排列到更外层上而不在第一层。

在第一层有 2 个电子以后，系数 $\frac{n_p}{n_e}$ 仍然大于 1，在更大的半径位置将存在一个新的平衡球面。新的平衡球面可以通过求解氢离子的一个方程来知道(2 个质子一个电子，在电子更远的径向地方存在另一个平衡点)。所以，其它电子将填充在第二层的平衡球面上。第二层最多可以填充 8 个电子。然后是第三层... 直到所有的电子都填充完毕。也就是一直满足系数 $\frac{n_p}{n_e} = 1$ 。

每层的电子数目分别是 2, 8, 18, 32，这个是确保每层电子之间有基本相同的密度，避免过度排斥。层电子数 2×2^n 正比于每层的球面面积。

氢原子光谱

根据公式 (2) $F = \frac{n_p}{n_e} \left(1 - \frac{B}{r}\right) k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ ，当一个电子附属于原子核时候（在平衡点球面上）， $\frac{n_p}{n_e} = 1$ ，平衡点 $B =$ 波尔半径

$R = 52.9177\text{pm}$ ，公式变为 $F(r) = \left(1 - \frac{R}{r}\right) k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ ，我们用区间从 B 到无穷远做简单的定积分，积分结果就是把这个电子从平衡点移动到无穷远所做的功：

$$E_1 = \int_B^\infty \left(1 - \frac{R}{r}\right) k \frac{q_1 q_2}{r^2} dr = -13.6058\text{eV}$$

这就是著名的氢原子第一能级的能量。

当 2 个电子被原子核临时吸引过来时， $n_e = 2, n_p = 1, B = \frac{n_e}{n_p} R = 2R$ ，把其中一个电子从平衡点移到无穷远：

$$E_2 = \int_B^\infty \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2R}{r}\right) k \frac{q_1 q_2}{r^2} dr = -3.40145eV$$

类似地，当 3 个电子临时附属于原子核时候， $B = 3R$ ，移走其中一个电子，我们得到

$$E_3 = \int_B^\infty \frac{1}{3} \left(1 - \frac{3R}{r}\right) k \frac{q_1 q_2}{r^2} dr = -1.51176eV$$

.....

下面的积分结果列出了氢原子从 E_1 到 E_8 各个能级的能量值：

能级 能量(电子伏 eV)

1	-13.6058eV
2	-3.40145
3	-1.51176
4	-0.850362
5	-0.544232
6	-0.377939
7	-0.277669
8	-0.212591

两个能级相减立即得到氢原子的光谱：

跃迁能级 能量差(eV) 光子波长(nm)

2 -> 1	10.2043	121.5003
3 -> 1	12.0940	102.5159
4 -> 1	12.7554	97.2003
5 -> 1	13.0616	94.9221
6 -> 1	13.2279	93.7288
3 -> 2	1.8897	656.1018
4 -> 2	2.5511	486.0013
5 -> 2	2.8572	433.9297
6 -> 2	3.0235	410.0636
4 -> 3	0.6614	1874.5765
5 -> 3	0.9675	1281.4488
6 -> 3	1.1338	1093.5030
5 -> 4	0.3061	4050.0109
6 -> 4	0.4724	2624.4071
6 -> 5	0.1663	7455.7020

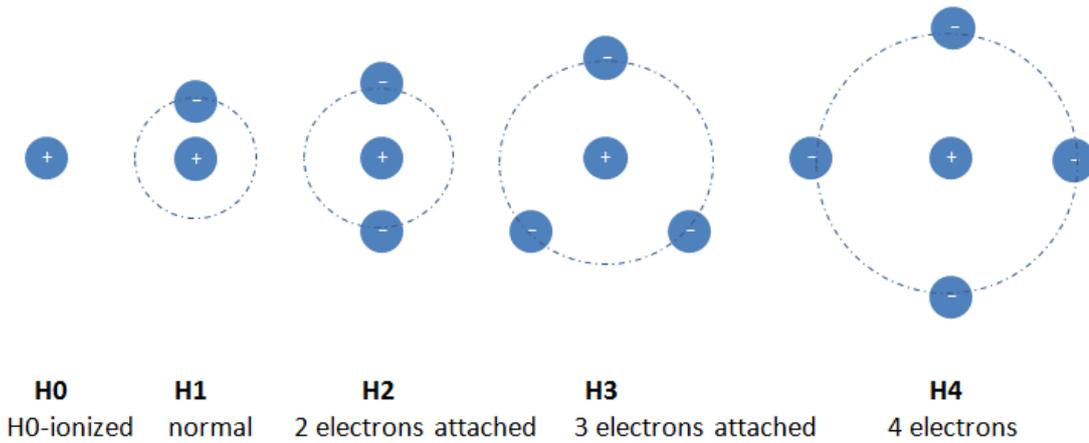
什么是能级？能级如何存在的？电子的跃迁如何发生？

当氢原子气体被加热或通电给予外部能量时候，大量的氢原子会被电离而电子脱离了质子束缚跑到原子离子蒸汽中。逃脱掉的电子会向四周游荡，结果被其它原子（或质子）吸引而临时附属于这些原子（或质子）。

结果是：在氢原子蒸汽中临时存在大量的 $H_0, H_1, H_2, H_3, \dots, H_8$ 原子。 H_n 表示 n 个电子的氢原子。 H_0 是质子， H_1 是正常的氢原子， H_2 是临时附属了 2 个电子的氢原子。等等。

我们把这种气体叫原子气体的激发态。每一个原子都有一个对应的能级（H0 不算，单独的质子）。示意图如下：

Excited Hydrogen Gas, H0 – H4 illustrated, H5 and above not shown



一个正常的未被激发氢原子 H1 所在能级是 1 (13.6eV)。被激发后的氢原子：临时束缚了 2 个电子的氢原子 H2 的能级是 2(3.4eV)，临时束缚了 3 个电子的氢原子是能级 3 (1.511eV) ... 等等直到 H8。电子从一个能级的位置跳到另一个较低能级位置叫做能级的跃迁。这时候，多余的能量以光子的形式释放出来。

能级的跃迁

跃迁是因为电子跳跃位置而发生的。分为两类。第一类是电子在同一个原子内的跃迁，第二类是电子在不同氢原子之间的跃迁。

第一类的例子：比如在 H2(束缚了 2 个电子的氢原子，如上图示意)中，如果一个电子逃逸掉了，另外一个电子将从能级 2 变为能级 1，结果是大约 121.5nm 波长的光子发出。或者在 H3 中，如果一个电子逃逸掉了，另外两个电子将从能级 3 降为能级 2，这时候两个波长为 656.1nm 的光子会放出。或者在 H4 中，如果 2 个电子同时逃逸掉，另外 2 个电子将从能级 4 降低为能级 2，两个波长为 486nm 的光子会发出。

第二类跃迁是电子从一个原子跳到了另一个相邻原子中导致的能量释放。上面说的电子逃逸掉了，逃逸到哪里了？大部分是被附近的其它原子束缚住了。就是逃逸到另外一个氢原子中。举例来说，比如 H3 中的一个电子逃逸掉了被附近的 H0 (质子) 所俘获，这个电子从能级 3 变为能级 1，发射出来 102.5nm 的光子。与此同时，H3 原子的另外两个电子将从能级 3 变为能级 2，发出 2 个 656.1nm 光子。

顺便提一下，656nm 光子（能级 3 到能级 2）应该有光谱线分裂（所谓的精细结构），因为这个光谱是由 3 个不同的电子产生的：1 个从 H3 跳到 H1 产生（不同原子间跳跃，从能级 3 到能级 2），与此同时 H3 里面的另外 2 个电子也从能级 3 跳到能级 2。（同一个原子内的跳跃）。不同的跳跃路径会有光谱波长的细微区别，精细结构由此产生。类似地，121.5nm(能级 2 到能级 1)光谱应该也有谱线分裂，因为这个光谱由不同的两个电子产生：1 个电子从 H2 跳跃到 H0(从能级 2 到能级 1)，与此同时 H2 里面的另外一个电子也会从能级 2 变为能级 1。这种不同电子同时按不同路径跃迁发出的光谱都会有精细结构。不同的跃迁路径有微小的能量差异。

通过以上解释，我们知道，单个的氢原子无法发出这么多不同波长的光谱。能级存在于受激发的氢原子气体之中，而不是存在于一个氢原子中。这就是为什么我们要观察一种物质的全光谱，必须把这种物质汽化才有可能。单个氢原子只能发出一个能量为 13.6eV 的光子。不能产生我们熟知的氢原子光谱。

氦 II 光谱的计算

对于氦原子， $n_p = 2(2 \text{ protons})$,

当一个电子束缚在原子中时候（电离的氢原子），平衡半径 $B = \frac{n_e}{n_p} R = \frac{1}{2} R$,

库仑扩展公式

$$F = \frac{n_p}{n_e} \left(1 - \frac{B}{r}\right) k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad \text{变为} \quad F = \frac{2}{1} \left(1 - \frac{R^{1/2}}{r}\right) k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

$$\text{当 2 个电子被束缚, } F = \frac{2}{2} \left(1 - \frac{R^{2/2}}{r}\right) k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$\text{当 3 个电子被束缚, } F = \frac{2}{3} \left(1 - \frac{R^{3/2}}{r}\right) k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

...

简单计算这个定积分，积分区间从 B (分别等于 $n/2 R$, $n=1,2,3\dots$) 到无穷远，我们立即得出氢原子的能级表

能级 能量 (eV)

1	-54.4232eV
2	-13.6058
3	-6.0470
4	-3.4014
5	-2.1769
6	-1.5118
7	-1.1107
8	-0.8504

各个能级相减得到的氢光谱表：

跃迁能级 能量差(电子伏) 光谱波长（纳米）

2 -> 1	40.8174eV	30.3751nm
3 -> 1	48.3762eV	25.6290nm
4 -> 1	51.0217eV	24.3001nm
5 -> 1	52.2463eV	23.7305nm
6 -> 1	52.9114eV	23.4322nm
7 -> 1	53.3125eV	23.2559nm
3 -> 2	7.5588eV	164.0254nm
4 -> 2	10.2043eV	121.5003nm
5 -> 2	11.4289eV	108.4824nm
6 -> 2	12.0940eV	102.5159nm
7 -> 2	12.4951eV	99.2253nm
4 -> 3	2.6456eV	468.6441nm
5 -> 3	3.8701eV	320.3622nm
6 -> 3	4.5353eV	273.3757nm
7 -> 3	4.9363eV	251.1640nm
5 -> 4	1.2245eV	1012.5027nm
6 -> 4	1.8897eV	656.1018nm
7 -> 4	2.2908eV	541.2287nm
6 -> 5	0.6652eV	1863.9255nm
7 -> 5	1.0663eV	1162.7961nm
7 -> 6	0.4011eV	3091.2487nm

这个表完全和实测的 HeII 的光谱数据吻合。

本原子模型的要点

- 1) 电子是静态地在原子核外面分层排列，和镶嵌在那里一样，电子仅仅有微小的热运动，包括径向的振动和在平衡球面上的滑动。
- 2) 离开原子核的单个电子没有能级，例如加速器里面的电子没有能级，真空管里面的电子没有能级。
- 3) 单个氢原子没有光谱（仅仅有一条 91nm 固定线）。能级是存在于受到激发的原子气体中，是一种群体效应。单个原子不具备。比如单个氢原子不会发出我们看到的氢光谱。

进一步讨论和展望

当世界看起来对我们非常复杂，最有可能的情况是，我们解释这个世界的方法出了问题。

本文提出的库仑定律扩展，连同这个扩展带来的原子模型都应该可以被精心设计的物理实验检验。作者希望，这类物理实验能够在不久的将来开展起来。

参考资料

Nist 数据库（Nist database）。网址是 physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables

本文中所用于对比的所有实测光谱数据都来自这个数据库。