



关于原子模型的对话

姜永梅

这就是模型的研究法功能,这在认识论上有重要意义,它使人们的认识不断地向真理迈进。

学生:听了老师这一番论述,使我对模型作用的认识大为深入,但具体涉及玻尔模型,我总觉得它的提出是多么牵强,直到今天,我仍觉得玻尔模型难以理解。

老师:你这个问题实际上道出了广大高中学生心中的疑虑。人们知道,玻尔模型提出的背景是要解决原子的稳定性以及原子的线状光谱问题。根据经典电磁理论,原子的核外电子绕核运动要辐射电磁波,原子的能量就要减少,那么电子就不能维持原来的轨道运行,旋转半径必将越来越小,很快会坍缩到原子核上,所以原子会是不稳定的,在这个过程中,原子会辐射连续光谱。实际情况不是这样,原子是稳定的,所以玻尔提出了定态的假设:原子系统处于各个特定状态,在每个状态都有相应的能量 E ,在这些状态原子不辐射能量。原子的光谱是线状的,所以提出了跃迁的假设:原子在两个定态之间发生跃迁才会发生光辐射或光吸收,光子能量为两个定态能量之差。这两条假设与经典物理理论相结合,得到氢原子的能量表述

$$E = -\frac{ke^2}{2r},$$

为使氢原子能量 E 取某些特定值,玻尔还提出了轨道的假设:电子绕核运动的轨道不是任意的,只有符合 $mvr = n \cdot \frac{h}{2\pi}$ 的轨道才是可能的,玻尔的假设创造性地运用了量子化思想,解决了原子的稳定性及光谱问题。

学生:玻尔模型的确是挺成功的,但是我还有一个感兴趣的问题:玻尔的第三条假设到底是怎么想出来的?为什么电子的动量 mv 要与运动半径 r 去相乘,还要与 $\frac{h}{2\pi}$ 去挂钩,他是怎么考虑的?

老师:既然你问到这个深度,那么我必须向你指出,玻尔原先提出的第三条假设叫做对应原理,它是确

学生:我们学习高中物理的原子结构这部分内容,觉得现代物理知识很新奇,尤其是它的研究方法与力学和电学的研究方法很不相同。

老师:你指的是研究现代物理常用的模型方法吧,那是物理学研究中最重要方法之一。在研究原子结构时,由于我们对微观客体不能直接进行观察,所以必须通过实验获得一定的观测资料进行分析,提出一种假说,即一种原子模型去替代客观原型。模型在提出时首先要履行其解释功能,不论什么模型,它们都要能解释已知的实验现象。比如说,汤姆生模型能解释原子的电中性,卢瑟福模型能解释 α 粒子散射实验。

学生:用模型去解释已知的实验现象,但不一定能解释将来发现的实验现象,这也算一种科学方法吗?

老师:是啊!模型作为一种假说,光能解释已知的实验现象还不够。随着实践的发展,它应该受到实践的检验,履行其判据功能,当它与新的实验结果一致时就被肯定;不一致时就被否定(扬弃)。

学生:但是我总觉得变化太多,关于原子结构,先是汤姆生模型,接着是卢瑟福模型,后来又是玻尔模型,没有一个定论,原子到底是怎样的啊?

老师:一种模型的提出,标志着人们的一个阶段性的认识水平。随着实践的发展,新实验现象的发现,暴露出旧模型的缺点,比如 α 粒子散射实验,暴露出汤姆生的枣糕模型的缺点,卢瑟福提出的核式结构模型能很好地解决这个问题,而在解释原子电中性这一点,它与汤姆生模型是一样的。同样,随着实践的发展,卢瑟福模型也暴露出其缺点,为玻尔模型所取代,而且玻尔模型也能解释 α 粒子散射现象,因为它本身也是一个有核模型。可见,旧模型的修正,新模型的提出是科学发展的必然结果,是人们认识问题不断深入的标志,

性迹象。分析还表明,这次事故的发生,有人为的原因,也有设备本身的原因,例如苏联的石墨沸水堆已经落后,在西方国家已经淘汰了。由于这种堆具有固有的不安全性,又没有设置安全壳,只要发生厂房爆炸,房顶被炸飞,放射性物质就进入大气,污染环境;另外,苏联核电站缺少先进的安全电脑系统,自动控制和监测手段落后,没能及时将事故处理。

这次严重核事故,导致了一场国际性有关核电安全的大辩论,其结果是肯定继续发展核电,而不是废弃核电,但又承认核电有危险性,要采取高度安全措

施,核电应该在最大限度地保证人与环境安全条件下发展。目前世界上普遍应用的压水堆、沸水堆等都设有安全壳,能够承受意外事故造成的冲击,加上电脑安全系统的监测和控制运行,完全可以确保反应堆的安全。因此,苏联切尔诺贝利核事故后,西方几个主要工业国首脑在日本东京召开会议决定,今后核电生产份额将继续增长,1986年5月15日欧洲会议以压倒多数通过决议,支持继续发展核电;苏联、东欧国家也表示,事故不会影响核电发展;日本政府也宣布,苏联核事故不会影响日本的核电建设规划。

定原子容许能态的方法。正象相对论中 $\frac{v}{c} \rightarrow 0$ 时,即在低速范围内相对论结果与经典理论相同那样,量子理论在那些已经知道经典理论正确的极限内,必须得出同经典理论相同的结果,对于氢原子,对应原理需要在大量系统的极限里,其容许能量是连续的,量子辐射条件就产生同经典计算相同的结果,被氢发射的射线的频率就应该与电子绕原子核转动的频率相同,他根据广义巴尔末公式

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

得:

$$h\nu = hcR \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

由玻尔第二假设 $E_n - E_m = h\nu$, 取 $m = \infty$, 可得氢原子稳定态的容许能量必然为 $E_n = -\frac{hcR}{n^2}$, 再应用对应原理求得里德伯恒量的表述 $R = \frac{2\pi^2 k^2 e^4 m}{h^3 c}$, 则氢原子稳定态的容许能量 $E_n = -\frac{2\pi^2 k^2 e^4 m}{n^2 h^3}$; 另外, 结

合电子的圆周运动及势能知识可得 $E_n = -\frac{k e^2}{2r}$,

进而可得氢原子轨道容许半径 $r_n = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 k e^2 m}$, 电子运动速度 $v_n = \frac{2\pi k e^2}{nh}$ 。玻尔当时考虑, 由于原子处于定态, 电子沿圆轨道运动时, 它的动量大小 mv 是一定的, 轨道半径 r 是一定的, 所以 mv 与 r 的乘积是不变的量(叫角动量)。玻尔注意到 $mv r$ 的量纲与普朗克恒量 h 的量纲是相同的, 由于玻尔相信普朗克恒量在原子理论中起着基本作用, 所以他寻找角动量与普朗克恒量的关系, 他算得

$$mv_n r_n = m \left(\frac{2\pi k e^2}{nh} \right) \left(\frac{n^2 h^2}{4\pi^2 k e^2 m} \right) = n \frac{h}{2\pi},$$

玻尔得出的这个结论虽然只是第一和第二假设和行星模型的结果, 但玻尔觉得这个结果的表述比对应原理简单, 所以玻尔就把 $mv r = n \frac{h}{2\pi}$ 这个简单的表述作为第三条假设了, 这条假设叫角动量量子化规则。

学生: 玻尔真聪明, 真亏他想得到。

老师: 是啊! 爱因斯坦称玻尔具有独特的直觉和洞察力, 取得了一个奇迹, 是思想领域中最高形式的音乐才能。实际上, 玻尔也是站在前人的肩膀上而取得的成就啊! 他后来说过: “我一看到巴尔末公式, 就全都清楚了。”

学生: 我现在在想, 怎样从物理解释这个角动量量子化规则呢?

老师: 我先跟你打个比方, 你做过示波器的实验了吧, 当我们把“衰减”调到“ ∞ ”档, 这时机内产生一

个 Y 方向的正弦电压, 把“扫描”调到“10”档, 再调节扫描微调旋钮, 可使荧光屏上出现三个正弦波(如图 1), 这就是说 AB 这段长度(扫描周期长)等于正弦波长(正弦电压周期长)¹⁾ 的 3 倍, 当电子在第二次扫描时出现的波形与第一次出现的波形正好叠加, 我们看到了一个稳定的波形。如果我们再把扫描微调变化一下, 使 AB 的长不等于正弦波长的整数倍(比如 2.9 倍), 那么图形就不稳定了, 继续调节使 AB 的长为正弦波长的 2 倍时, 图形又出现一个稳定状态(如图 2)。

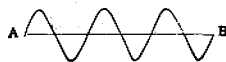


图 1

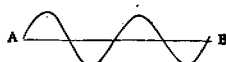


图 2

学生: 老师, 您说得对, 示波器上的稳定波形的确是这样的, 那么您的意思是……

老师: 我们可以用物质波理论给玻尔的角动量量子化规则一个物理解释。原子核外绕核运动的电子也可以看成是波, 它的波长是 $\lambda = \frac{h}{mv}$ (德布罗意波长), 对某些轨道, 其轨道长度等于电子波长的整数倍(比如 3 倍), 波每转一周波峰老是在同一个位置, 这样波就能相加, 而轨道就相应为玻尔的容许轨道, 但对长度不等于波长整数倍的一个轨道, 在电子绕核时波峰总要最终被一个波谷抵消掉, 这样的轨道就不能被容许, 所以玻尔的第三条假设可理解为 $2\pi r = n\lambda$ 。

学生: 氢原子核外电子从 3 倍波长的轨道向原子核靠近只能到 2 倍波长的轨道, 同时放出红光, 或者到等于波长的轨道, 放出紫外线, 对吗? 真是太妙了。

老师: 玻尔模型虽然取得很大的成就, 但它毕竟是一个经典理论与量子理论混合在一起的产物, 它是不完善的, 还有更好的模型取代它, 希望你注意学习“现代物理知识”。

- 1) 由库仑定律和圆周运动公式可得电子运动频率, 并与能量公式对比, 得到频率表达式后再与高能区跃迁对应, 可得里德伯恒量的表述, 限于篇幅, 计算过程从略。
- 2) 这里作了一个时空转换, 以长度表示时间, 以与下文的玻尔容许轨道的驻波条件相对应。