

玻尔原子模型的建立

1922年12月10日，在瑞典斯德哥尔摩的音乐厅里，一位著名的瑞典科学家一板一眼地宣布丹麦科学家尼尔斯·玻尔“因对原子结构以及原子放射性的研究工作做出了贡献而获得诺贝尔奖金”。这是紧接受因斯坦1921年后又一伟大科学家获得诺贝尔物理学奖。玻尔在第二天的讲演也以“原子的结构”为题。那么究竟他对原子结构的贡献是什么？玻尔原子模型又是如何建立的呢？

当时在玻尔研究所工作过的一位科学家曾看到一首小诗，题为“为了玻尔，干杯”。其中有一小段：

凡是你所说的，
量子也会服从。
每个小小的电子，
呆在自己的轨道中；
它把形势看好，
突然一下飞掉。
预先知道往哪儿跳，
一路辐射一路跑。
从原来的位置
一下转向另一条轨道，
在飞行中找到了另一处避难所——
不过也是徒劳。

从这一小段诗里可以见到两个重要之点：一是电子按一定量子轨道在原子中运动；二是电子按一定规律可以从一条轨道跃迁到另一条轨道。这两点正是玻尔提出原子结构模型的两大支柱。

（一）原子模型提出的前夜

在玻尔开始学习物理的时候，科学正经历着迅速的变化和发展，处在一个革命时期。十九世纪末，汤姆逊发现一细束阴极射线能在电磁场中弯曲，这就是电子射线。1911年玻尔的博士论文就是“金属电子理论的研究”，并以杰出的成绩取得了博士学位。1911年5月卢瑟福发现原子内部有一个核心（原子核）这是一个划时代的新发现。卢瑟福和他的助手盖革用 α 粒子束轰击各种物质制成的靶子，发现有一些 α 粒子会明

显偏转。有一天，他的学生发现有些 α 粒子竟向后面拐去！多次实验证实了这一现象。卢瑟福深入地思考着，原子有什么东西能把以每秒一万英里左右速度在空间奔驰的粒子挡住并弹回来呢？他以伟大的科学想象找到了答案：原子很像是缩小了的太阳系，其中有一个很小很重的核心，电子绕着这个核心运转。这一设想在当时是很惊人的，物质最小单元的原子竟会与巨大的太阳系的构造相像。1912年4月初，玻尔从剑桥来到曼彻斯特卢瑟福实验室，这里集中了优秀的科学家。每天下午傍晚的时候，实验室全体聚在一起用午茶。茶、糕点、面包片和奶油就放在一张实验桌上。卢瑟福常常引导着谈话，总离不开原子模型，为什么各种元素的性质有如此多的千差万别，与原子结构有什么关系？

谈及卢瑟福的原子模型时首先要回答的问题是电子能不能绕原子核旋转，按照经典力学的观点，电子在绕原子核旋转时，会以辐射能量的形式失去自己的能量，其结果是电子会沿着螺旋线逐渐接近原子核，最终将落到核上，这时原子也就坍缩了。这正像人造卫星在绕地球转了一段时间之后，逐渐按螺旋线越来越接近地球最终掉回地球上。这是因为人造卫星在气体分子和宇宙尘的阻力作用下损失能量，速度逐渐变慢，轨道缩小；当速度慢到小于第一“宇宙速度”（每秒7.9公里）时，它抵抗不了地球引力而最终地掉回地球上。按照经典力学规律，一切原子都会坍缩，整个物质世界也会坍缩。然而事实并非如此，世界和宇宙极其稳定，各种元素都按自己的方式存在于大自然中。物质客观存在是铁一般的事实，原子不坍缩，物质不坍缩。这样，玻尔以及当时的科学家们就面对着这一不可调和的矛盾：一方面是发现原子中有一微小的原子核，电子又存在于原子之中按某种未知的规律运动；另一方面按照经典力学规律，一切原子将要坍缩。

玻尔想到历史上也出现过实验事实与经典理论间的一些不可调和的矛盾。例如，1900年普朗克指出热辐射是以特有的量子单位（ $h\nu$ ）一份一份地向外辐射，经典理论不适用。爱因斯坦在1906年也证实了光辐

射是一份一份的以量子方式向外辐射的。玻尔从历史上找到了借鉴，就大胆地设想原子结构是深入一层次的问题，已知的经典物理规律不适用。后来，他回顾这段岁月时写道“1912年春天，我开始觉得卢瑟福的原子中的电子是全然受作用量子支配的”。这就是说玻尔意识到原子中的电子不是按经典规律作连续运动。

原子内有一核心，带正电荷，它几乎集中了原子的全部质量，而电子在原子内必须不停地运动，才能维持平衡而保持原子的稳定性。那么电子在原子内部以什么方式运动呢？按经典规律显然不行。玻尔说“原子的稳定性问题必须用另外一种观点来看待。”

此外，还有一个重要的实验事实：1885年巴尔末开始研究最简单的氢元素的光谱。当时发现它只包含有三条谱线：一条红色的，一条青色的，一条是紫色的。巴尔末惊讶地发现，这三条谱线表现出令人吃惊的规律性：它们的频率分别与 $\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}$ ， $\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}$ 和 $\frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2}$ 成正比。第二项的分母不多不少正好是 3^2 、 4^2 、 5^2 。当时谁也无法解释这种明显的规律性，玻尔关于原子模型的新观点能否解释原子光谱的规律性呢？

(二)“三部曲”

1913年玻尔将他的崭新观点写成论文，发表在“哲学杂志”上，标题是“论原子和分子的结构。”第一部分发表于7月，第二部分发表于9月，第三部分发表于11月，这三篇论文称为玻尔论文的“三部曲”。正是这“三部曲”使得玻尔成为现代微观物理学的先驱者，而获得了1922年的诺贝尔物理学奖金。

在论文中，玻尔明确认为，如果没有发生辐射，绕原子核运动的电子就会保持作圆周运动呈现稳定状态，不会坍缩而落到原子核上。这虽然与经典理论相违背，但经典理论的预言与实验事实不符，所以必须放弃经典理论。

玻尔还认为，原子系统能够在一定条件下吸收一种辐射，其频率与此系统从一种稳定状态过渡到另一种稳定状态时所放出的辐射频率相当。

那么，原子核和束缚的电子又是如何构成稳定状态呢？玻尔设想电子是在一系列的稳定轨道上绕原子核旋转。氢原子有一个电子，在第一层电子轨道上运动，氢原子有两个电子，它们也都在第一层轨道上运动；锂有三个电子，第三个电子必须填充在第二层轨道上，第二层轨道上可以填充八个电子；等等。

玻尔提出的电子分层轨道排列的原子结构模型为光谱线规律性提出了解释。玻尔说，“我一看到巴尔末公式，整个形势一下子就清楚了。”如果一个电子从一个轨道跳跃到另一条轨道，就会伴随着一道闪光发生，这就是实验上观测到的特定颜色的光。如果从最外层轨道中移走一个电子，就会产生该元素的正常光谱线，

即它的特征光谱线；如果从最内层移走一个电子，就会产生该元素的特征X光谱线。实验不仅与理论符合，甚至符合得大大超乎人们的意料。玻尔论文的第二部分题目是“单原子核系统，”论述原子的分层结构和光谱线规律；第三部分题目是“多原子核系统”，提出了分子键的概念，又一次超出了当时的认识水平。

九年后，玻尔在获得诺贝尔奖金的讲演中，将原子模型归纳为两条重要假定：

(1) 在电子的各种可能的运动状态中，有一些运动状态称为稳定态。这些稳定态具有无法解释的特殊的力学稳定性。当原子系统的运动状态发生某确定的变化时，一定会相应地发生从一种稳定态转变到另一种稳定态的彻底改变。

(2) 从一种稳定态向另一种稳定态的转变过程会伴有电磁辐射的放出或吸收。如果从甲态转变到乙态时放出某一频率的电磁波，那么从乙态转变到甲态时就要吸收同一频率的电磁波。这就是说，原子既能辐射出能量，又能把这能量吸收。

第一条假定说明了原子的稳定性。第二条假定解释了原子在受激时所发出的光谱线。玻尔认为，氢原子核外有四种稳定态，如果在第二、三两态之间稳定态的转变就会产生红色谱线；在第二、四两态之间稳定态的转变就会产生青色谱线；图中未画出第五条轨道，如果在第二、五两态之间稳定态的转变就会产生紫色谱线。现在我们知道，巴尔末系并不止这三条谱线，从氢光谱中已经确定了29条这样的谱线，它们的频率分别与 $\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2}\right)$ 成正比，其中 m 从3一直到31。实验观

测值很好地与巴尔末公式一致。显然巴尔末公式包含了内在的规律性。玻尔正是抓住了这一经验规律提出了他的模型理论的两条假定。顺便指出如果在第一态和其它态之间发生转变时产生的谱线就是赖曼系，赖曼系光谱处在紫外区域中。

玻尔的这一原子模型不仅解释了当时的实验事实，而且立即得到了光谱线新的实验事实的证实。当爱因斯坦听到这些消息时说：“这可是一个重大的成就！”玻尔的新观点划时代地改变了物理学，由此而产生了原子物理学，原子核物理学以及近代物理学的各个

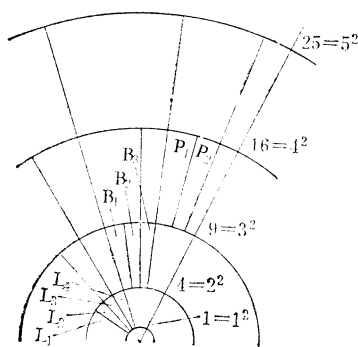


图1 氢原子的玻尔模型中的前四条轨道，电子可实现图中所示的任何一种跃迁。

分支。

(三) 探索原子的内部规律

玻尔在他 1922 年获得诺贝尔奖金的讲演结束时说,到那时为止人们对原子的新的了解,主要起了“对观察到的大量事实进行归类”的作用。他还强调指出:“目前理论仍处于相当初级的阶段,有许多基本问题尚有待于未来进行解决。”

事实也正是这样,玻尔理论虽然取得了重要成就,但也存在着很大的困难。他虽然提出原子中电子的排列规则,但是,为什么每层轨道都有固定数目的电子,既不能多,也不能少呢?电子按什么样的力学规律在稳定轨道上运动,而且规规矩矩地绕原子核转动?如果电子是在绕原子核兜圈子,那么为什么处于基态(即最内层)的电子不会越来越多呢?

1923 年泡利引入了不相容原理,说明了每个量子轨道最多只能容纳两个电子,一个电子自旋向上,一个电子自旋向下,当两个电子填满以后,下一个电子只能进入另一个量子轨道。因此基态电子(最内层电子)不可能愈来愈多。原子中的电子只能按一定规律规规矩矩地排在轨道上绕原子核运动。这样就合理解释了元素周期表。

至此,物理学家只是描述了原子的结构模型,然而原子的内部运动服从的是什么样的力学规律?事实上,

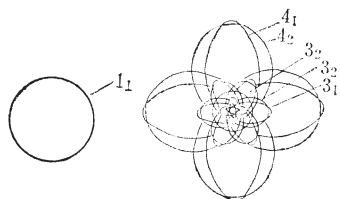


图 2 只有一个电子的氢原子(左图)和具有三十六个电子的氮原子的简图(右图)

上,玻尔理论有着内在的矛盾,因为他一方面把电子、原子核看作是经典力学中的质点,把经典力学规律强加于微观粒子,另一方面又假

定电子处于定态不发出辐射,这两者是互相矛盾的,这个矛盾预示着微观世界存在新的力学规律。

1924 年德布罗意揭示出微观粒子具有波粒二象性,根本不同于经典质点。接着薛定格和海森堡建立了量子力学理论,反映了微观世界的波粒二象性和新的力学规律。玻尔理论的固有矛盾也自然地得到了解释。新的力学规律说明了原子的电子壳层的周期性结构。玻尔理论中的稳定态相应于一系列的能级 E_1, E_2, \dots, E_n 。理论上并可计算出在电磁场作用下,电子从一个量子状态跃迁到另一个量子状态的跃迁几率、光的辐射和吸收几率。

从 1913 年玻尔提出原子模型理论到 1927 年量子力学建立,整整经历了十四个年头。正如奥本海默所说:“这是个天翻地覆的年代。这不是哪一个人造成

的,它包含了许多来自世界各地的科学家的共同努力。当然,玻尔本人深刻的创造精神和识别本领,自始至终在引导、限定、深化和改变着这一事业。这是一个坚韧地工作的年代;是进行实验与采取果断行动的年代;是出现许多虚假开端和站不住脚的假设的年代;是讨论的年代,批评的年代;也是数学迅速发展、得到光辉结果的年代。”“在参加者看来,这是一个创造的年代,在他们的工作中既有畏惧,也有欢乐。……”

从玻尔模型提出至今已七十年过去了,人们的认识发展到如此深远的地步,从原子到原子核,从原子核到基本粒子,从基本粒子到层子。今天,人们已在普遍谈论电子和层子的结构模型。在未知的世界里,又有一条路正在开辟。

(黄厚昌)