

古代哲学家在以往漫长的岁月中对物质的结构有过许多设想。他们中具有代表性的是古希腊的留基伯(Leucippus)和他的学生德谟克利特(Democritus),被称为古原子论的奠基者。他们认为物质是由简单的不可分割的基本单元——原子组成。这种朴素的思想虽属机械唯物论,却是原子论的萌芽。如今世界上通常使用的原子一词,就沿用了古希腊

的 *atoma*(原意是不可分割的),在古印度将原子称为 *anu*(意为微小)。在我国战国时期的墨家称为“端”,意思是组成物质的不可分割的最原始的东西;而名家称为“小一”,认为“小一”这东西不再有内,也就无法再分割了,即为最原始的微粒。

但是,差不多同时代的亚里士多德(Aristotle)等人却认为物质全是连续的、可以无限地分割下去。我国战国时期以公孙龙为代表的也主张物质无限可分的,他曾有一句名言:“一尺之捶,日取其半,万世不竭。”近几百年来物理学一直在考验公孙龙在两千多年前的臆想。

建立在科学基础上的原子学说大约是二、三百年内的事情。1666年牛顿光谱的发现以及后来许多关于这方面资料的累积成为探索原子结构的重要依据;1833年法拉第提出电解定律,揭示了电的基本单元的存在;特别是1897年汤姆逊发现电子,是研究原子微观结构的一个重大突破,可以说在人类长期探索物质微观结构的进程中具有里程碑的意义。

电子的发现,揭示了原子的可分性。因电子带有负电,表明中性的原子内还有带正电的部分,从而说明原子是有内部结构的,这就为原子模型的建立提供了可靠的依据。

汤姆逊原子模型的提出

根据已知的实验事实和当时日臻完善的经典理论,许多人提出了关于原子结构的各种模型,其中引人瞩目的是汤姆逊1898年提出的原子模型。后经1903年、1907年的研究进一步完善。这是关于原子结构最早的模型,其内容概括为:

1. 原子中带正电的部分是一个原子那么大的、具有弹性的、冻胶状的球,正电荷均匀分布,电子嵌在其中,电子的数目恰使其负电荷刚好能抵消正电荷,故整个原子呈中性。
2. 电子在其平衡位置作简谐振动,并向外辐射能量。
3. 电子振动的频率等于向外辐射的频率,也就是原子所发光的频率。

有人形象地把这种模型比喻为“西瓜模型”或“葡萄干面包模型”。汤姆逊原子模型似乎把当时已经知道的实验现象和理论都包括了,如正负电荷及其分布,光谱现象等。为了能够解释元素周期表,汤姆逊(J. J. Thomson)还假设电子分布在一个个环上,而每一个环上只能安置有限个电子,比如第一个环上只能放5个电子,第二个环上放10个电子……。

1903年勒纳特(Lenard)在研究阴极射线被物质吸收的实验时,发现高速运动的电子很容易通过金属薄膜,原子并不象具有半径为 10^{-10} 米那样大小的实球体,而显得十分空虚。这样的实验结果是汤姆逊模型不相符的。为此,1908年卢瑟福的两位学生盖革——马斯顿设计了 α 粒子散射实验,利用高能量的 α 粒子流去碰撞原子,通过观察 α 粒子的散射情况来研究原子内部的结构。

按照汤姆逊原子模型, α 粒子被原子散射后,散射角度

物理学史

学部委员唐孝威教授主持

原子模型的建立和发展

王德云

一般不会很大,平均应小于万分之一弧度。运用统计理论计算,散射角大于3度的 α 粒子远小于1%,散射角大于90度的约为 10^{-3500} 。实验观察的结果,大部分也是属于小角度散射,一般只有2至3度,而观察到的大角度散射所占的百分比却远远大于汤姆逊模型所予言的数字,得到的实验值为1/8000,有少数 α 粒子的散射角度接近180度,这种现象称为大角度散射。面对事实,卢瑟福曾惊奇地说道:“这是我一生中从未有过的最难以置信的事件,它的难以置信就象一枚15英寸的炮弹打在一张纸上又被反射回来而打在身上一样。”

尽管汤姆逊模型无法解释 α 粒子大角度散射现象被彻底否定了,但 α 粒子散射为新原子模型的提出提供了重要的实验基础。

卢瑟福原子有核模型的建立

卢瑟福在分析了 α 粒子散射实验以后,写道:“经过思考,我认为反向散射必定是单次碰撞的结果。而当我做出计算时看到,除非采用一个大部分质量都集中在微小核内的原子系统,否则无法得到符合上述数量级的结果。这就是我后来提出的原子具有一个体积很小而变量却很大的核心的想法。”这个核心后来称为原子核。这段话生动地写出了卢瑟福原子有核模型提出的实验依据和思想基础。

卢瑟福原子模型的基本思想是:原子由带正电的原子核和带负电的电子构成,原子核的体积比原子体积小得多,原子的绝大部分质量都集中在原子核内,电子围绕原子核运转。这种模型类似于太阳系的组成,故又称为行星模型。

按照卢瑟福原子模型,因正电荷集中在很小的体积内, α 粒子深入原子内部后仍然受到整个原子正电荷的作用,其作用力的大小与它们之间的距离平方成反比; α 粒子越靠近原子的中心,所受作用力越大,其运动方向发生明显的改变。在对心碰撞的情况下,散射角可达到180度。卢瑟福在核式模型的基础上建立了 α 粒子散射理论,并得到了大量的实验验证。这些事实表明这种模型确实客观地反映了原子内部的结构。

卢瑟福原子模型最重要的意义在于提出了以核为中心的概念,将原子分为核外与核内两个部分,原子核的直径仅为原子的万分之一,但几乎集中了原子的全部质量(99.9%以上)。这种模型的建立,使人们对原子微观结构的认识前进了一大步,为现代原子模型的确立起了奠基的作用。但是,这一模型仍是很粗糙的。它虽然指出了原子内正负电荷的分布,但并没有说明核外电子的分布及其运动情况;另外,这种模型与经典理论之间存在着尖锐的矛盾,主要表现在:

1. 无法解释原子的稳定性。由经典电磁理论知道,任何带电粒子作加速运动的过程中,不断向外辐射能量,这就意味着电子不能永远围绕原子核旋转下去。由于能量损失,使得电子运动的轨道半径越来越小,最后将与原子核相碰,正负电

荷中和,引起原子“塌陷”。但事实上原子并没有“塌陷”。如几百年前埋入地下的金,今天把它挖掘出来仍然是金,这就说明原子是相当稳定的。这一基本事实,卢瑟福原子模型无法解释。

2. 无法解释原子的同一性。依照经典力学的规律,今天的太阳系是由当初形成时宇宙的初始条件决定的,初始条件不同就不可能形成相同的结果。宇宙的变化是浩瀚莫测的,因此不可想象在广阔的宇宙中会存在第二个完全一样的太阳系。然而,原子的情况就不同了,我们轻而易举地就能找到相同的原子。比如,从南极取回的铁,宇航员从月球上带回来的铁,与我们国家生产的铁,其原子结构是完全相同的,并无丝毫的变异。这种原子的同一性也是卢瑟福模型无法解释的。

3. 无法解释原子的再生性。对于太阳系的任何一颗行星,一旦受到外来星体的撞击,这颗行星原来的状态将被破坏,而且永远也不可能恢复到原来的情况,这是人所共知的常识。但是,原子确是另外一回事,一个原子同外来的粒子相互作用后,一旦这粒子远离,这个原子立刻便可恢复到原来的状态,就好象未曾发生过任何事情一样。原子的这种再生性,卢瑟福原子模型也是无法解释的。

4. 无法解释原子的光谱。依据卢瑟福原子模型,电子围绕原子核运转,电子辐射的频率是连续变化的,因此应该形成连续光谱。可是,原子光谱确是线状光谱,这一矛盾卢瑟福模型也是不能解释的。

卢瑟福模型的局限性及其所遇到的困难,说明这种模型还很不完善,有待进一步发展。

玻尔原子模型的新思想

针对卢瑟福原子模型存在的困难,著名的丹麦物理学家玻尔(Bohr)在普朗克(Planck)和爱因斯坦(Einstein)已经建立起来的量子论的启迪下,依据氢原子光谱的实验规律,于1913年首先把量子论应用于原子内部,提出了与经典理论不相容的原子模型的新思想。这种思想主要包括三点:

一、原子能较长久地停留在一些稳定状态——称为定态,各定态有一定的能量,原子处于这些状态时,不发出也不吸收能量。只有当原子从一个定态跃迁到另一个定态时,其能量才能发生改变。按照玻尔的这一思想,电子虽然绕原子核运动,但当原子处于定态时,并不向外辐射能量,体现出原子的稳定性。

二、当原子中的电子从一个能量为 E_n 的稳定状态跃迁到另一个能量为 E_m 的稳定状态时,原子将发射或吸收辐射,辐射频率的大小只与电子跃迁前后两个状态的能量有关,而与电子绕原子核运动的频率无关。若 $E_n > E_m$,则原子发射一个光子;反之,表示原子吸收一个光子,光子的能量为 $h\nu = |E_n - E_m|$ 。这就是玻尔提出的频率条件,又称辐射条件。在此玻尔创造性地把普朗克常数 h 引入了原子领域。

三、电子围绕原子核运动的轨道不是任意的,只有电子轨道角动量为普朗克常数整数倍的那些轨道才是允许的。这个条件称为轨道角动量量子化条件。

玻尔原子模型成功地解释了卢瑟福原子模型无法解释的一些问题,如原子的稳定性,原子的线状光谱等。更重要的是玻尔依据这些思想建立起来的氢原子理论,很好地解释了氢原子光谱的实验规律,揭示了原子内部的一些量子特性。这是人们探索原子内部微观结构的进程中一次飞跃,奠定了现

代原子模型的基础,广为人们所接受。因此,玻尔被誉为现代微观物理学的前驱者。

但是,玻尔理论的局限性在于:对于复杂原子光谱和能级的计算不能给出正确的结论,理论值与实验结果相差很大;不能计算谱线的强度和宽度;没有解决微观客体的运动规律等;理论本身不能自洽,一面把电子、原子核视为经典力学中的质点而运用经典规律;另一面又假定电子处于定态时,不辐射也不吸收能量,这本身就是个矛盾。

尽管如此,玻尔理论在原子物理学中乃至近代物理学中发挥着承前启后的作用,正如有人形象地比喻那样:“玻尔理论好象一座桥,它的一端架在经典概念的基础上,另一端却把人们引向量子世界”。

量子力学关于原子模型的统计观点

1924年,德布罗意(de Broglie)依据光的二象性,提出一切实物粒子也都具有波动性的概念,并得到了大量实验验证。从1925—1928年,海森堡(Heisenberg)、玻恩(Born)、薛定谔(Schrödinger)和狄拉克(Dirac)等人经过几年的努力建立了量子力学,它是描述微观客体运动规律的基本理论,与相对论一起形成了近代物理学的两大理论支柱,可谓本世纪物理学发展史上带有革命性的理论。

按照量子力学的观点,由于微观客体具有波粒二象性,他们的行为不同于经典概念下的粒子。对于一个宏观粒子来说,它的运动状态是用位置坐标和动量来描述的。根据经典力学的规律,这两个力学量可同时被准确地确定。但对于一个微观粒子而言,经典力学的方法就不完全适用了。具有波动性的客体,要同时准确地确定它的位置和动量是困难的。也就是说,当粒子的位置完全被确定时,那么粒子相应动量的数值就完全不确定;反过来,当粒子的动量有完全确定的数值时,则它的位置就完全不确定,这是海森堡于1927年首先提出来的,称为不确定关系,它反映了微观粒子运动的基本规律。对于原子中的核外电子,由于这种不确定关系的制约,它的位置和动量就无法同时被准确地确定。这样,运用玻尔轨道的概念来描述核外电子的运动状态也就失去了意义。

具有波动性的核外电子的运动状态不再受经典力学规律的支配,不再遵从“决定论”或“严格的因果律”,只服从一种统计的规律。描述电子的运动状态也与经典方式不同,而是运用波函数来描述,符号为 $\psi(\mathbf{r}, t)$ 。玻恩对波函数物理意义赋予了统计解释: $\psi(\mathbf{r}, t)$ 用来描写微观粒子的运动状态,波函数模的平方 $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2$ 表示电子在原子空间内的一种几率分布。只要波函数 $\psi(\mathbf{r}, t)$ 的具体形式给定了,那么在任一时刻 t ,电子在空间各处的几率分布就完全确定下来了。按照量子力学的观点,核外电子的运动不再受轨道的限制,而呈现一种几率分布。在与玻尔轨道相应的位置上,电子的几率密度最大,其它区域电子的几率分布有起伏,但并不为零,这截然不同于玻尔原子模型的思想。因此,量子力学的建立使人们对原子微观结构的认识又一次飞跃,也更符合于微观客体的实际。这是迄今为止人们对原子模型最完美的一种表述,是无数科学工作者长期以来努力探索、辛勤工作的结晶。当然,这仅仅限于核外部分,整个原子内部结构的研究和探讨还没有完成,还有大量的、艰苦的工作要做。随着时间的推移,人们对客观世界的认识将会不断深入,永远不会停止在一个水平上。