

## 原子模型的历史变迁

作者：张天蓉

连小学生也知道，物质是由原子组成的。而原子呢，又是由原子核和电子构成的。原子核中有带正电的质子和不带电的中子，带着负电荷的电子绕着原子核层层旋转，永远不息，这是原子结构的经典模型。

事实上，原子结构的理论经过了数次历史的变迁。如同其它的物理理论一样，可以说，没有一个描述原子的模型是永远完美没有错误的。科学在不断的进步，本来被认为是正确的东西过一段时间就可能是谬误，原子模型也是如此。每一个模型在上一个模型的基础上发展起来，否定了它的前辈，然后，过不了多久，它自身又被另一个新的模型所替代、所否定。新的模型总是比上一个更迷人、更接近真理。这正是推动我们孜孜不倦地去进行科学研究的原动力。

最开始给原子建立科学模型的，是英国的道尔顿，他把原子描述成一个不可再分的、坚硬的实心小球。尽管这是一个错误的模型，但它首次将原子的研究从哲学引进到科学。历史地看，仍然功不可没。

约翰·道尔顿（John Dalton，1766年—1844年）是个很有特色，鞠躬尽瘁、死而不已，为科学献身的科学家。他年轻时从一个名叫高夫的盲人哲学家那里接受了自然科学知识。又由于道尔顿自己是个色盲，他从自身的体验中总结出色盲症的特症，给出了对色盲的最早描述，发表了第一篇研究色盲的论文。并且，道尔顿希望在他死后对他的眼睛进行检验，用科学的方法找出他色盲的原因。道尔顿的献身精神激励科学家们不断进行探索和研究，一直到1990年，在道尔顿去世后将近150年，科学家对其保存在皇家学会的一只眼睛进行了DNA检测，发现他的眼睛中缺少对绿色敏感的色素。

道尔顿只为科学理想而献身、别无它求。他终生未婚、安于穷困，即使是英国政府给予他的微薄的养老金，道尔顿也把它们积蓄起来，捐献给曼彻斯特大学的学生作为奖学金。道尔顿是个气象迷，他从1787年21岁开始，连续观测和记录当地的气象，几十年如一日，从不间断，一直到78岁临终前几小时，还为他近20万字的气象日记，颤抖地写下了最后一页，给后人留下了宝贵的观测资料。

1803年，道尔顿基于实验的基础上，将古希腊哲学家德谟克利特等的原子猜想引入到化学中，建立了原子的实心小球模型<sup>[1]</sup>。道尔顿认为所有物质都由原子组成，同种物质的所有原子都相同，而不同的物质有不同的原子。此外，道尔顿认为原子是不可再分的，他还最先从事了测定原子量的工作，提出用相对比较的办法求取各元素的原子量，并发表了第一张原子量表。

继道尔顿的实心小球原子模型后，英国物理学家汤姆森（Sir Joseph Thomson，1856—1940），在用真空阴极射线管做电学实验时发现：从原子中射出了体积极小的、带负电的电子，从而打破了‘原子不可分’的神话。汤姆森并因此发现而获得了1906年的诺贝尔

物理奖。根据原子中存在电子的事实，汤姆森 1904 年提出原子的葡萄干蛋糕模型（或称为西瓜模型）。他将原子想象成好似一块均匀带正电荷的“蛋糕”，带负电荷的电子则像葡萄干一样镶嵌在蛋糕里面<sup>[2]</sup>。

葡萄干蛋糕模型的好景不长，很快就被汤姆森的得意门生卢瑟福否定了。

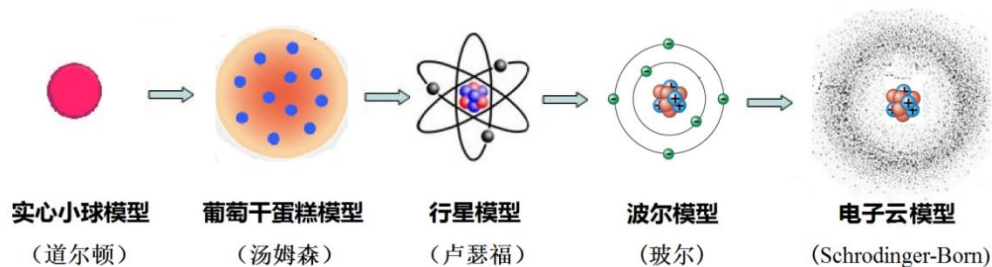


图 1. 原子模型，从经典的实心球到量子力学的几率波

纽西兰物理学家卢瑟福（Ernest Rutherford, 1871—1937）对铀盐、钍盐及居里夫人所发现的镭所放出的射线，进行了广泛深入的研究，从而发现了  $\alpha$  粒子。通过观察  $\alpha$  粒子在电场和磁场中的表现，卢瑟福弄清楚了这种粒子的性质。由于研究  $\alpha$  衰变对原子研究作出的重要贡献，卢瑟福被授予 1908 年的诺贝尔化学奖。

卢瑟福发现  $\alpha$  粒子带正电荷，数值是电子电荷数量的两倍。既然  $\alpha$  粒子是从原子中跑出来的带正电荷的东西，卢瑟福自然地联想到了老师的原子模型： $\alpha$  粒子是不是从那个模型中分裂出来的一小块‘蛋糕’呢？看来又不像，因为  $\alpha$  粒子的质量比电子质量大得多，大约是电子质量的 7300 多倍。均匀分布着正电荷的‘蛋糕’，不可能有如此大的质量密度。

但是，蛋糕模型只是老师提出的假说，对错与否还需要实验的验证。于是，卢瑟福产生了一个新奇的想法，何不利用这种高速而又质量颇大的粒子，来探测原子的内部结构呢。也就是说，把  $\alpha$  粒子当作一个特务，打进原子去进行间谍活动，看看原子内部到底是怎么回事？

卢瑟福和他的助手汉斯·盖革博士，立即开始了实验。他们利用镭所发射的  $\alpha$  粒子束，轰击一片非常薄的金箔，经过金箔散射后的  $\alpha$  粒子间谍，各自带着在金箔原子中探测到的情报，被设置于各个方向的荧光屏记录下来。

这些  $\alpha$  粒子间谍的能量很大，跑得极快，速度约为光速的十二分之一！从原子旁边只能一晃而过，要想让它们像真正的特务那样，‘潜伏’在原子内部是不可能的。不过，卢瑟福和盖革进行实验的优越条件是能够以多取胜，他们做了一次又一次的实验，每次都派出了大批大批的奸细，结果，他们发现：

1. 大部分的间谍都能毫无阻碍地通过金箔，沿着原来的方向到达荧光屏；
2. 一小部分间谍穿过金箔到达荧光屏时，稍微受了点儿干扰，方向偏转了一个小角度；

3. 个别的间谍就惨了，好像挨了当头一棒，找不着北啦，方向被偏离了一个很大的角度，甚至有时被直接向后反弹回去。

从这些  $\alpha$  粒子间谍提供的大量情报，卢瑟福脑海中构造出了一个与老师的葡萄干蛋糕或西瓜图景不太一样的原子模型（行星模型）<sup>[3]</sup>。

因为大部分的间谍都能通过金箔而到达荧光屏，这说明什么呢？说明原子中的大部分地方是空的。此外，少数间谍产生折射，甚至有个别间谍被打回入射方向，这又说明了什么呢？卢瑟福对间谍返回的情形最感兴趣，幽默地比喻说：海军用巨炮射击一张纸，却发现有的炮弹被弹射回来打中了自己！

根据上述实验结果中能将  $\alpha$  粒子弹射返回的事实，卢瑟福提出：原子的中心一定有一个很小很重的带正电荷的实体，姑且称它为‘原子核’吧。正是原子核将  $\alpha$  粒子弹射回来的！那么，那些带负电的、比原子核小得多轻得多的电子，一定是在原子的其余空间中绕核运动，就像行星绕着太阳转一样。

不过，卢瑟福的行星模型，很快就遭遇到经典电磁场理论的当头一棒。电子毕竟不同于行星，行星在引力场中的运动受到的是万有引力，行星的椭圆轨道被庞加莱等人证明是稳定的。而当电子绕核运动时，受到的是电磁力。根据麦克斯韦理论，如果电子是在绕着原子核不停地转圈的话，这个运动电荷应该不停地发射出携带能量的电磁波。根据能量守恒定律，电子也就会连续不停地损失能量，其轨道半径将连续地变小又变小，最后，所有电子将会全部奔向原子核。如此一来，哪里还有什么行星模型呢？换言之，原子的行星模型不稳定！

另外，麦克斯韦的理论加上卢瑟福的模型，也难以解释实验得到的氢原子光谱为什么不是连续的，而是一条一条分离的、线状的光谱。

在原子行星模型诞生的同时期，诞生了量子力学。1904年，卢瑟福提出行星模型时，量子理论的思想正处于‘小荷才露尖尖角’的萌芽状态。普朗克和爱因斯坦催生了这颗小芽，但他们俩人却都不怎么喜欢它，都转弯抹角地想把它埋进泥土里。

不过，玻尔来了，这个年轻人喜欢‘量子’这个新鲜玩意儿，他带领一伙青年，兴致勃勃地迎接这一革命的新理论，物理学家们对此趋之若鹜，研究成果层出不穷。

并且，玻尔立刻看出了：在原子模型的尺度上，应该用量子理论来替代经典的电磁理论，用量子的概念来改造卢瑟福的行星模型。

所谓‘量子’的概念就是说，能量的吸收和发射，不是连续的，而是一份一份‘量子化’了的。从以上对卢瑟福模型的叙述我们也可以看出，行星模型碰到的困难都和‘连续’有关。第一个困难是：经典的电磁理论预言，原子将‘连续’发射电磁波而塌缩；第二个困

难：则是氢原子的光谱不‘连续’这个事实。这不正好吗，量子理论的中心思想就是不‘连续’，它就是专门用来对付这些因‘连续’而产生的困难的。

于是，玻尔使用‘量子’的思想改进了卢瑟福的行星模型，1913年，经由卢瑟福推荐，玻尔接连刊载了三篇论文<sup>[4]</sup>，建立了玻尔的原子理论，被称为玻尔模型的“三部曲”。玻尔保留了卢瑟福模型中的电子轨道，但这些轨道不是任意的、连续的，而是量子化的。这些电子遵循泡利不相容原理，各自霸占着一条一条分离而特别的轨道。电子也不能随便任意地发射或吸收电磁波，而是当且仅当它从一个轨道跃迁到另一个可能的轨道时，才会‘一份一份的、不连续的’辐射或吸收能量。

无论卢瑟福模型还是玻尔模型，原子的结构总是原子核加电子。如果我们缩小到微观去观察一个原子的话，发现它有点像个大家庭，原子核比较重，体积大，好比一栋大房子。父母和女人们留在了家里。电子呢，有的处于束缚态，在家园附近劳动，有的是自由的，出外打天下，比如在金属或掺杂的半导体中，人们将这些外出的电子叫做‘自由电子’。这些自由电子可以四处游荡，不仅跑到附近别的原子核边上，到邻居家里作客，还有可能漂流到千里之外，创造出丰功伟绩。

玻尔量子化的原子模型成功地克服了卢瑟福经典模型的两个困难。不过，玻尔虽然对‘量子’情有独钟，当时却对它的行为还了解不深。所以，玻尔模型还不是彻底的量子力学。原子模型的真正量子力学描述，是在薛定谔建立了他的波动方程之后，被物理界所公认的电子云模型<sup>[5]</sup>。

根据量子力学中最令人迷惑的测不准原理和波动解释，原子的电子云模型摒弃了行星模型的轨道概念，认为电子并无固定的轨道，而是绕核运动形成一个带负电荷的云团，故称之为‘电子云’。原子的电子云模型一直沿用至今。

在电子扫描隧道显微镜发明之前，原子是‘看不见’的。这种种原子模型，都是物理学家们根据间接的实验数据，进行逻辑推论及发挥超常想象的结果。不过，大多数人仍然信奉“眼见为实”，既然无法看见，你怎么知道就一定是你说的那个样子呢？

在1981年，苏黎世（Zurich）的IBM实验室的科学家盖尔德·宾尼（Gerd Bining）和海因里希·罗雷尔（Heinrich Rohrer）发明了电子扫描隧道显微镜，他们为此赢得了1986年度的诺贝尔物理奖。

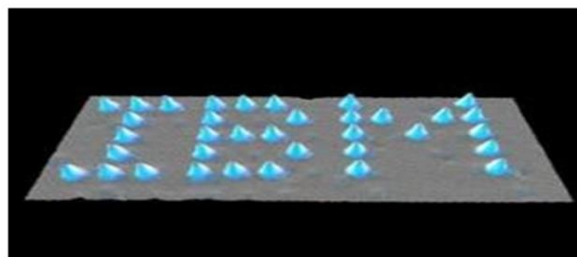


图 2：用扫描隧道显微镜排列和观察原子

1990年，IBM公司的科学家用扫描隧道显微镜排列和观察原子，他们的结果让全世界为之惊叹。如图2所示，那是在金属镍表面用35个惰性气体氙原子组成的“IBM”三个英文字母。

通过扫描隧道电子显微镜，我们不仅看到了原子，还能操控原子，只不过，上图中的原子内部结构，显示结果还不是那么清晰。

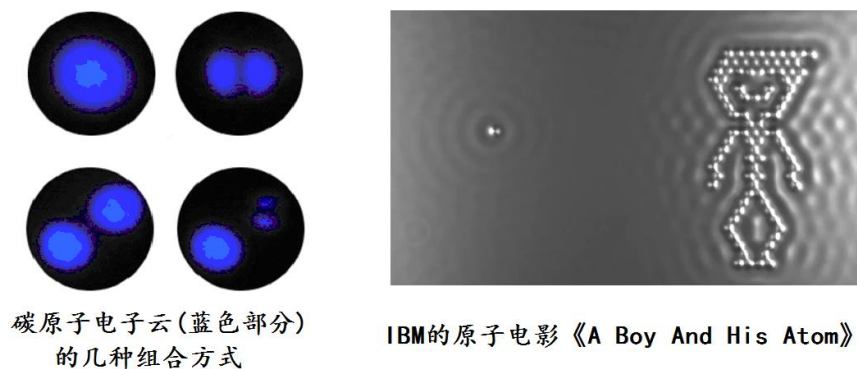


图3：由扫描隧道显微镜拍摄的电子云和原子电影

近年来实验技术的发展，到了堪称神奇的地步。科学家们使用扫描隧道显微镜技术，不仅直接观察到了原子和电子云（见图3左图）<sup>【6】</sup>，还能操纵和控制原子。2013年5月，IBM利用坩冰冻一氧化碳，将环境冷到摄氏零下260度。然后，用5000个原子，拍摄了一个世界上最小的电影：《一个男孩和他的原子》（A Boy And His Atom）。大家从中可以领略到现代实验技术的神奇<sup>【7】</sup>。

这些实验结果，一次又一次地证明了原子电子云模型的正确性，也证明了量子理论的正确性。尽管对如何诠释量子理论，物理学界一直是众说纷纭，但是，事实表明，量子理论至今仍然有其强大的生命力，电子云模型也仍然是迄今为止最精确的原子模型。

科学探索无止境，原子的电子云模型，甚至量子理论本身，都一定不会是永远完美无缺的。人们对原子结构的探索不会停止。事实上，对电子电荷及自旋的本质的研究，对原子核内部将质子和中子结合在一起的强相互作用的研究，以及相关的弱相互作用、引力作用等基本粒子的研究，一直都在积极进行中。近二十年来凝聚态物理研究的发展，纳米技术中奇特性质的新材料的不断涌现，成果斐然，令人鼓舞。这些研究结果都必将影响对原子结构理论的更深入探索。物理研究的大门始终敞开着，等待年轻有志者的到来。

参考资料：

【1】Dalton, John (1808). A new system of chemical philosophy. ISBN 1-153-05671-2. Retrieved 8 July 2008.

【2】 Thomson, J. J. (1905). "On the emission of negative corpuscles by the alkali metals". Philosophical Magazine, Ser. 6 10 (59): 584–590.

【3】 Ernest Rutherford (1911). The scattering of alpha and beta particles by matter and the structure of the atom. Taylor & Francis. p. 688.

【4】 Niels Bohr. On the Constitution of Atoms and Molecules. Phil.Mag. 26(1913)1.;  
Niels Bohr. Systems Containing Only a Single Nucleus. Phil.Mag. 26(1913)476.;  
Niels Bohr. Systems Containing Several Nuclei. Phil.Mag. 26(1913)857.

【5】 Schrödinger, E. (1926). "An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules". Physical Review 28 (6): 1049–1070.

【6】 电子云: <http://en.dogeno.us/2009/09/first-captured-image-of-electron-clouds-inside-one-atom/>

【7】 原子电影: <http://www.youtube.com/watch?v=oSCX78-8-q0>