



# 原子结构的研究历史与启示

张欣 杨波 毕会英

(北京科技大学天津学院 天津 301830)

(收稿日期:2023-12-15)

**摘要:**总结了原子结构的早期假设和发现历史,以及这些研究对物质世界理解、化学反应认识和新材料发展的启示.研究指出早期对原子结构的假设主要包括行星结构原子模型、中性原子模型、实心带电球原子模型和葡萄干蛋糕原子模型.通过此类假设和后续实验,科学家们逐步揭示了原子结构的真实面貌,包括发现电子和原子核,提出玻尔氢原子理论和微观粒子的波粒二象性,以及进行弗兰克赫兹实验等.这些研究不仅为深入理解物质世界提供了基础,还为化学反应认识和新材料发展带来了重要启示,包括预测和解释化学反应过程、设计催化剂和特定功能材料,以及调整材料性能等方面.因此,原子结构的研究成果对于推动科学技术领域形成了深远影响.

**关键词:**原子结构;研究历史;启示

原子结构的研究是一个不断探索和发现的过程.从早期的经典物理学到现代的量子力学,科学家们逐渐揭示了原子的奥秘.原子是由核心和围绕核心的电子组成的,而电子的分布和运动规律决定了原子的性质和行为.通过对原子结构的研究,不仅可以了解物质的本质,也为化学、材料科学等领域的发展提供了重要的理论基础.原子结构的研究启示我们,科学的发展是一个不断探索和发现的过程,需要不断地挑战和突破传统的观念.同时,科学的发展也离不开合作和交流,只有通过合作和交流,才能更好地推动科学的进步和发展.

## 1 原子结构的早期假设

自从英国化学家和物理学家道尔顿(1766—1844)提出“原子学说”以来,人们长期将原子视为不可分割的实心球体.1869年,德国科学家希托夫首次发现阴极射线,随后克鲁克斯、赫兹、勒纳德、汤姆孙等学者对阴极射线进行了深入研究.历时20余年,汤姆孙最终发现了电子的存在<sup>[1]</sup>.这就启发人们:由于一个原子能够释放约 $\frac{1}{1700}$ 个带有正负电荷的电子,这意味着原子内部可能存在某种结构.换

句话说,原子内部可能存在带有正电荷的实体,它与带有负电荷的电子相互抵消,那么,原子内部除了电子之外,还有什么其他物质?又是如何让电子留在原子中的呢?什么样的物质在原子中带有正电荷?正电荷是如何分布的?带负电荷的电子与带电的物体之间会产生怎样的相互作用?这一系列新的问题等待着科学家们去解决,根据科学实践和当时的实验观测结果,物理学家发挥了丰富的想象力,提出了各种不同的原子模型,具体如下.

### 1.1 行星结构原子模型

早期对原子结构的假设之一是行星结构原子模型,也被称为玻尔模型.这个模型由法国著名物理学家佩兰(Jean Baptiste Perrin, 1870—1942)提出,受到了兰姆特·拉塞福先前工作的启发.在这一模型中,原子被想象成一个中心带正电的核心——类似太阳,周围有电子——类似行星,围绕核心旋转,电子与原子核的相互作用通过电子轨道来描述.虽然玻尔模型在解释氢原子的光谱数据方面取得了成功,但这个模型并不能很好地适用于更复杂的多电子原子,并且它忽略了电子的波动性,这是后来量子力学补充的部分.

## 1.2 中性原子模型

1902年德国物理学家勒纳德(Philipp Edward Anton Lenard, 1862—1947)提出了中性微粒动力学模型,勒纳德早期的观察表明,原子由带正电的原子核和绕核旋转的带负电的电子组成.这些电子以一种特定的、量子化的轨道存在,以保持原子整体的电中性.这一模型的基本假设是一个原子中的电子数量等于其原子核中质子的数量,从而保证了原子的电中性.中性原子模型在描绘化学元素如何参与化学反应和如何形成化合物方面具有重要的意义.

## 1.3 实心带电球原子模型

在约瑟夫·约翰·汤姆孙(Joseph John Thomson, 1856—1940)提出的“葡萄干蛋糕”模型前,人们曾用实心带电球原子模型来表示原子.这个模型认为原子是一个均匀的、密实的、带有正电荷的球体,其中并未明确说明电子的存在.这个设想与后来的科学发现不符,因为它未能解释原子的复杂结构和化学属性.尽管这个模型在构想上非常简单,但汤姆孙没有考虑电子的存在和原子中质子和中子的发现,也未能解释原子光谱中观察到的离散线条.

## 1.4 葡萄干蛋糕原子模型

“葡萄干蛋糕”原子模型由在约瑟夫·约翰·汤姆孙提出,这一模型假定原子是一个带正电的球体,其中分布着若干带负电的微粒——电子,就如同葡萄干嵌入蛋糕中一样<sup>[2]</sup>.这一模型试图解释电子如何分布在原子内部,并认为电子的存在使原子呈现出更复杂的内部结构.尽管这个模型在提出时是革命性的,为人们提供了电子存在和分布在原子中的最初图景,但最终被更加精确的量子力学模型所替代.“葡萄干蛋糕”模型在解释早期的原子实验现象方面发挥了作用,但未能完整解释原子内复杂的电磁特性和后续实验发现.

## 2 原子的发现历史

### 2.1 发现电子

电子作为基本粒子的发现和特性测定是物理学史上的重要里程碑,其中布置了重大的实验和理论工作,例如,早在1897年,约瑟夫·约翰·汤姆孙(J. J. Thomson)在剑桥大学的卡文迪什实验室进行了一系列实验,这些实验涉及所谓的阴极射线,即在真空管内高电压下从阴极发射出的粒子流.综合前人

的实验结果,汤姆孙使用电场和磁场作用于这些射线,测量它们偏转的程度.汤姆孙推断出这些粒子,即电子具有负电荷,并计算出了电子的荷质比 $\frac{e}{m}$ ,即电荷与质量的比值.这是对电子这一基本粒子属性的首次确凿指认,开辟了亚原子粒子物理学的新纪元.1907年,罗伯特·密立根(Robert Millikan)通过油滴实验,精确地测量了电子的电荷量 $e$ .在此实验中,汤姆孙观察了带电油滴在重力和均匀电场之间的平衡点.通过精密的测量和计算,能够确定单个电子的电荷量.结合汤姆孙之前的工作,这让科学家们得以计算出电子的绝对质量 $m$ <sup>[3]</sup>.

### 2.2 发现原子核

1897年,汤姆孙提出了一个原子的早期模型,时常被称作“葡萄干布丁”模型.在这个模型中,汤姆孙认为原子是一个带正电的“布丁”,里面镶嵌着负电的“葡萄干”(即电子).尽管这个模型并不能准确描述原子内部的结构,但其是对原子结构理解的一次重要尝试,并为日后模型的发展提供了基础.1911年,欧内斯特·卢瑟福(Ernest Rutherford)通过 $\alpha$ 粒子散射实验震撼了物理学界,颠覆了针对原子内部结构的汤姆孙模型.卢瑟福不仅使用放射性源发射的 $\alpha$ 粒子(氦原子核,拥有两个质子和两个中子,带有 $+2e$ 的正电荷)轰击金箔,还观测了这些粒子被金箔原子散射的情况.实验结果显示,大多数 $\alpha$ 粒子直接通过金箔,而一小部分却被大角度甚至几乎 $180^\circ$ 反弹.这说明大部分原子是空的,且有一个很小但非常密集的正电中心,这就是原子核.这个原子核模型彻底改变了人们对原子结构的认识,并为现代物理学奠定了基础<sup>[4]</sup>.

### 2.3 玻尔氢原子理论——基于氢原子光谱规律

玻尔(1913)基于普朗克和爱因斯坦的理论,提出了氢原子的结构模型,该模型基于以下几个假设.

#### 2.3.1 定态假设

核外电子只能沿特定的半径( $r$ )和特定的能量( $E$ )围绕原子核运动,并由此得出离心力和静电作用力之间的方程式

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

式中 $K$ 为静电力恒量.据此方程,可以获知轨道半径和运动速度的关系,即

$$r = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m v^2} \quad (1)$$

### 2.3.2 角动量量子化

在上述特定轨道运动时,角动量  $L = n \frac{h}{2\pi}$  也是量子化的,而角动量又定义为  $L = mvr$ , 联立求解得到轨道半径,运动速度  $v = 2.187 \times 10^6 \times \frac{1}{n}$  m/s 后,设电子总能量  $E_t$  等于其动能与位能的和,联立上述各式,可得到每个电子的能量

$$E_t = -B \frac{1}{n^2}$$

其中

$$B = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = 13.6e^{-1} \text{ eV} \quad (2)$$

### 2.3.3 光子的吸收与辐射

根据爱因斯坦的理论,假设当电子在不同轨道之间跃迁时,原子会吸收或辐射出光子,其能量大小取决于前后两个轨道的能量差.即

$$\Delta E = E_2 - E_1 = E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (3)$$

将角动量量子化中的式(2)代入式(3)中,最终得到符合氢原子光谱规律的公式.

### 2.4 微观粒子的波粒二象性 不确定性关系

1924年,法国青年物理学家路易·德布罗意(Louis de Broglie)在受到光的波粒二象性启发后,提出电子等实物粒子也具有波粒二象性的观点.根据爱因斯坦相对论质能关系定律,光的动量  $p$  与其波长  $\lambda$  成反比.有

$$E = mc^2 = h\nu$$

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (4)$$

因此,德布罗意提出一个假设:波以某种形式伴随着具有一定能量和一定动量  $p$  的电子等微观粒子,并提出了著名的德布罗意关系式,从中预言了电子的波长

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (5)$$

在该理论提出后的3年,电子衍射实验证实了其波动性.这一实验类似于1911年卢瑟福进行的阿尔法粒子散射实验,只不过在这次实验中,观察到电子流(包括 $\alpha$ 粒子、中子、原子、分子等)穿过金属晶体薄片后呈现出的衍射图案.

### 2.5 薛定谔方程

直角坐标系下的薛定谔方程为

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \Psi = 0 \quad (6)$$

当将上述单电子体系的薛定谔方程从直角坐标系换算成球坐标系  $(r, \theta, \phi)$  时,可以参考玻尔氢原子理论中的公式来将类氢原子的原子轨道能量进行改写.具体而言,类氢原子的原子轨道能量可表达为

$$E_n = -13.6 \frac{z^2}{n^2} \quad (n=1, 2, 3) \quad (7)$$

上式中,  $n$  表示为主量子数,  $z$  表示为角量子数,

但由于波函数的径向变量和角度变量相互独立,因此波函数可写成径向波函数  $R_{n,l}(r)$  与角度波函数  $Y_{l,m}(\theta, \phi)$  的乘积,也称为变量分离,即

$$\Psi_{n,l,m}(r, \theta, \phi) = R_{n,l}(r) Y_{l,m}(\theta, \phi) \quad (8)$$

上式中,一般将  $l=0, 1, 2, 3, \dots$  对应的波函数称为  $s, p, d, f, \dots$  态或轨道.

### 2.6 弗兰克-赫兹实验

弗兰克-赫兹实验利用精密的电压调节来研究原子能级的发现.在这个实验中,研究人员通过调整灯丝电压、控制网格到阴极的电压 ( $U_{G1K}$ )、加速电压 ( $U_{G2K}$ ) 和拒斥电压 ( $U_{G2A}$ ) 4个关键电压参数来追踪电子与氩原子之间的相互作用,如图1所示.

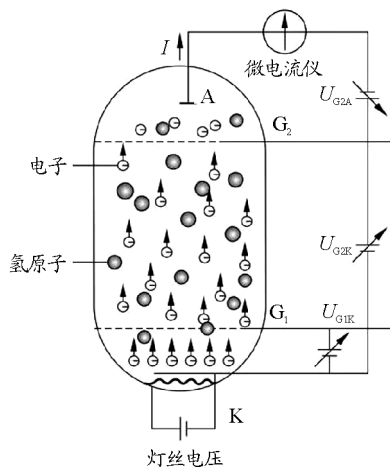


图1 弗兰克-赫兹实验原理图

具体来说,电子首先从阴极K发射,并随后被控制电压  $U_{G1K}$  引导至网格  $G_1$ . 电子接着在加速电压  $U_{G2K}$  的作用下加速,朝向第二网格  $G_2$  移动. 在飞行过程中,电子可能与氩原子产生两种类型的碰撞:弹性碰撞和非弹性碰撞. 如果电子的能量不足以达到氩原子的第一激发能,即  $\epsilon_{U_1}$ , 则只会发生弹性碰撞,导致的能量损失微乎其微或根本没有能量损失.

然而,一旦加速电压  $U_{G2K}$  调整到足够使电子激发氩原子的水平时,在网格  $G_1$  和  $G_2$  之间的区域内,电子会与氩原子发生非弹性碰撞,从而导致氩原子从基态跳跃到第一激发态.

通过进一步提高  $U_{G2K}$ ,电子获得的能量将超出激发氩原子的第一能量状态的特定能量水平,此时电子与氩原子的碰撞再次转变为弹性碰撞,并且检测到的电流  $I_A$  会随之增大.随着加速电压  $U_{G2K}$  的继续升高,会在电流探测值上观察到周期性的波动,显示为一个周期性的曲线.这个曲线上连续两个峰值之间的电压差,就标志着氩原子的第一激发电势  $U_1$  [5].

### 3 原子结构研究的启示

#### 3.1 对物质世界的理解

原子结构的研究是物理学和化学领域的一个里程碑,它极大地加深了我们对物质世界的理解.由于原子是构成物质的基本单位,对其结构的深入了解有助于科学家揭示物质的本质.通过研究原子,我们得知它由带正电的核心(原子核)以及绕核旋转的带负电的电子构成.这个核心包含了质子和中子,而不同的原子携带不同数量的这些粒子,决定了它们的化学性质和行为.更进一步的理解包括电子云、轨道理论,以及量子力学在原子层面的应用等,这些概念不仅仅解释了原子内部的结构,也揭示了原子间是如何通过化学键结合以形成分子的.这种认识使我们能够从微观层面理解物质世界,为无数科学和工程领域带来革命性的进步.

#### 3.2 对化学反应的认识

原子结构的理解为我们揭示化学反应的本质奠定了基础.化学反应是原子之间的重新排列,形成新的物质.了解原子是如何通过电子来进行相互作用的,使得科学家们能够预测和解释化合物形成的过程.例如,通过原子轨道理论,我们能理解化学键(共价键、离子键等)的形成,这不仅涉及电子的转移,也包括电子对的共享.发现原子核外电子的排布规律(电子构型),进一步帮助理解各种化学反应,如氧化还原、酸碱中和、配位化学反应等.此外,反应动力学和反应机理的理解同样受益于原子结构的研究,使我们得以了解和控制化学反应的速率与路径,提高反应速率并设计出针对特定反应的催化剂.

#### 3.3 对新材料的发展

原子结构的研究不但提供了对已知材料性质的理解,也为设计和合成新型材料开辟了道路.现代材料科学中,通过操纵原子和分子的排列,可以设计出具有特定功能的新材料,例如超导材料、纳米材料、智能材料等.这种能力也使得在科学上可能制造出在传统概念上无法实现的材料,如具有超强力量或极端环境下稳定的材料.我们可以通过更改材料的内部结构,从原子层面上调整其机械性能、电学性能、热学性能或光学性能.此外,对分子之间相互作用的深入了解,还能够帮助科学家设计和合成具有高度选择性反应路径的催化材料,这一点在药物合成、污染物处理以及可再生能源领域尤为重要.总之,从原子结构研究中得到的启示是设计和发展新材料的基石.

### 4 结束语

本文回顾了原子结构研究的历史,阐述了研究原子结构的重要性,并讨论了这项研究如何对我们理解物质世界产生的深远影响.原子结构的研究成果不仅揭示了物质的本质,打开了微观世界的大门,为量子物理学的发展奠定了基础,还为化学反应和材料科学的发展提供了科学依据.随着科学的进步,我们期望继续进一步深入探索和研究原子结构,以进一步推动科学和技术的进步,为人类社会带来更多的福祉.

#### 参考文献

- [1] 黄建林. 模型建构与科学史深度融合的教学实践——以“原子结构的模型”为例[J]. 中学化学教学参考, 2021(13):4.
- [2] 王东,朱韶红. 利用化学史发展学生模型认知能力的实践研究——以“原子的结构”新授课为例[J]. 化学教与学, 2021(11):5.
- [3] 余志卫. 用物理学史培养学生科学精神的策略研究——以高中物理“原子结构与原子核”教学为例[J]. 新课程评论, 2021(9):34-38.
- [4] 郭琛琛,何万兵,安振东,等. 通过费米能区重离子碰撞产额分布来研究  $^{16}\text{O}$  原子核的团簇结构[J]. 原子核物理评论, 2021,38(1):8-16.
- [5] 李继良,于守丽,徐梅星. 基于史料和实验情境的证据推理与模型认知探究课——以探索原子结构为例[J]. 化学教与学, 2021(10):6.