

# 论原子物理学形成历史的特色

曾 景 春

(应用物理系)

## 摘 要

原子物理学形成历史有两个特色：一是以光谱学为理论综合的契机和主线；二是经历了半经典半量子的理论过渡。这两个特色反映了科学认识的两个规律：(1) 具有丰富而精密的信息，并形成经验定律的某种经验材料，在一门学科的形成中具有“催化”的作用；(2) 新学科的建成往往要经历一个过渡阶段，因而相应的产生过渡性的理论形式。

原子物理学是研究原子是由什么组成的，以及其组成物运动和相互作用的规律的学科。它的形成创立过程，同历史上其它学科比较起来，有其独自的特色，这些特色显示了人类科学认识的一些特殊规律。

原子物理学，按研究原子构成物这个涵义而言，它的发端应该从J.J.汤姆逊于1903年提出的原子模型算起，而它的完成则以1926年量子力学的创立为标志，其间仅仅用了二十三年。它的发展速度是物理学其它分支不可比拟的。这样神速的发展是有它的历史背景的。第一，经典物理学到十九世纪末，已成为严密的科学，为物理学进一步的发展提供了一整套以数学和实验为工具的研究方法和规范。而十九世纪末、二十世纪初关于电子、 $\alpha$ 射线、放射性的发现，打开了物理学进入物质结构领域的帷幕，黑体辐射、固体比热、光电效应等问题的探索，向物理学提出新的挑战；第二，二十世纪初，特别是二十年代前后，物理研究已开始从私人研究时代进入“工业科学”的时期。欧洲各国名牌大学的物理学家如卢瑟福、洛伦兹、索末菲、普朗克、朗之万、玻恩，吸引着成批不同国籍的研究生，探讨物理学的前沿问题，群雄竞争而又友好交流；一些国际性的物理刊物，如《哲学杂志》(英)、《物理学纪事》(德)、《物理评论》(美)，成为各国物理学家发表和交流新成果的阵地，国际性的学术讨论开始兴起。有名的“索尔维”会议，就是比利时豪富E. 索尔维在物理学家能斯特说服下，赞助支持的一个国际性物理学术会议；第三，经历第一次世界大战的劫后创伤，物理学家们以更强烈的超脱态度投身于基础研究，以寻找一种通向理性至上的境界，原子物理学就是在这种历史背景下，作为国际性探索和新时代的结晶奉献给人间的。

原子物理学在它的形成历史上有什么特色呢？最突出的有下面两点。

## 一、光谱实验是形成原子物理学的契机，是原子物理学发展的主线

原子是构成一切宏观物的基石，它展现出丰富多采的自然过程：化学的反应，物质的磁性、电性、放射性，以至发光。上述这些现象在十九世纪就被认为是属于原子的过程了。但在这众多的经验事实面前，促成原子理论建立具有决定性的则是光谱经验材料，可由以下说明：

(1) J·J·汤姆逊1903年提出原子模型时，他的注意力是电子如何在阳电球中排列，才能保持原子结构的稳定性，并由原子中电子做稳定排列的形式，说明元素化学性质同其原子量之间的关系。1906年，他也试图用他的原子模型去解释线光谱的规律，他设想电子受扰动而作简谐振动并向外辐射光，光频率可由电子振动的基频和泛频而求得。但这个设想后来经瑞利进行计算，结果与巴尔麦关于氢光谱的公式不相符，由此得出结论：要通过分析光谱线来研究原子结构，相当于生物学分析蝴蝶翅膀上的颜色一样复杂而艰难。卢瑟福于1911年在《哲学杂志》的文章中提到：“假定金原子有一个 $100e$ 的中心电荷，则可以说明大于 $90^\circ$ 的散射”，即后来人们说的他所提出的有核原子模型的原意。卢瑟福提出这个模型也仅仅是用来解释 $\alpha$ 粒子散射的规律，当时他手下的许多人并不十分关注这个模型。1912年玻尔到曼彻斯特时，卢瑟福交给玻尔的研究任务也仅是有核原子的稳定性问题。1912年8月，玻尔给卢瑟福的备忘录中谈到，用经典的力学是不能处理有核原子的稳定性问题，除非引入他提议的非力学的稳定条件： $E = k\nu$ ，才有可能取得结果，当时他还没有任何关于辐射光谱、轨道跃迁这些观念。而使玻尔选准研究的方向，修正其原子概念的则是两个新的因素：第一是英国天体物理学家J.W.Nicholson(尼克尔逊)发表关于原子构造与光谱线关系的一系列文章；第二是玻尔注意到氢光谱的巴尔麦公式，并引入他的研究之中。

尼克尔逊在卢瑟福之前就提出电子绕带正电的核转的太阳系式原子。他认为用普朗克的辐射理论，借这种模型可以计算原子谱线的波长。他认为一个光谱线系的那些谱线不是从同一个原子辐射出来的，而是由具有不同状态的原子发射出来的。1912年，他连续发表两篇星云光谱的文章，用他的原子假设解释所观测的星云光谱线，而提出星云中存在不同于地面上已知的原子。例如一种叫Coronium，含有两个电子组成的环；一种叫“氢”，但不同于地面上的氢，有三个电子组成的环；还有由五个电子组成环的“Protofluorine”。它的电子环的能量与频率之比，接近 $25h$ （ $h$ 是普朗克常数），它的一次、二次电离态的能量频率比分别为 $22h$ 、 $18h$ ，他认为这是原子系统具有分立角动量的佐证。这些文章引起玻尔的重视。玻尔在1912年12月给Harald的圣诞贺片中写道：“我相信尼克尔逊的理论是不矛盾的，因为经过计算原子的经典状态是有确实根据的。同时，尼克尔逊把原子和它们辐射关系联系起来，也即电子在到达其最终位置前将散失能量而发出光的辐射，这辐射是间歇的。当然尼克尔逊还必须计算原子何以具有如此巨大的能量，可以发射出从可见光直到紫外光这么宽大的能带”。由此可见玻尔接受了尼克尔逊关于原子具有分立的状态；光谱线是具有不同状态的原子降到同一种状态时产生的；辐射是间歇的。这些思想玻尔后来在1913年的论文中都有所介绍和阐述。特别是1913年2月，A.M.Hanson向玻尔解释氢光谱线可以纳入一个简单的公式，即巴尔麦

公式时,玻尔立即从J.J.Stark写的《原子力学原理》一书中找到巴尔麦公式。这个公式使他关于普朗克辐射能量公式、原子稳定性、尼克尔逊星云光谱等各个思想片断一下子搭接起来了。他说:“一旦我看到了巴尔麦公式,我立刻弄清了整个问题”。关于这一点,从玻尔1913年7月的论文中就可以看到他的思想脉络:卢瑟福原子被视为有心力作用下的系统,电子绕核做圆周运动,他假定经典电动力学在这种系统中并不适用,即电子的圆周运动不向外辐射能量。因而可以单纯的按经典力学计算出系统的能量,电子的运转频率以及电子的轨道半径。玻尔认为电子在这种系统中,可以运转于一些不连续的轨道上,这些轨道称为稳定轨道。而当电子是从无穷远处被核俘获到某一个稳定轨道时,或者是电子从一个轨道降落到另一个轨道时,才向外辐射能量。这时系统的能量变化遵从普朗克的辐射公式:  $E = nh\nu$ 。在这里,玻尔接受尼克尔逊关于原子有各种分立状态的观念,但做了重大的修正,那就是区分了电子在轨道上的绕转频率和原子从一个状态到另一个状态过渡所决定的发光频率这两个概念。尼克尔逊只有前一个概念,因而得不到与巴尔麦公式一致的结论。而玻尔有了后一个概念,他就可以藉氢原子的能量公式,导出与巴尔麦公式一致的结果, 
$$\nu = \frac{2\pi^2 me^4}{h^3} \left( \frac{1}{\tau_2^2} - \frac{1}{\tau_1^2} \right)$$

並由此得到用微测量表述的黎德堡常数值。这正是玻尔在理论上的突破点。玻尔的原子物理就是依靠“定态”、“跃迁”这些概念,在阐述原子状态与光谱辐射的关系中建立起来的。也可以说是以解释光谱经验规律为契机建立起来的。

(2) 玻尔理论得到学术界首肯的也是在光谱方面。早在1896年,美国天文学家 E.C. Pickering从船尾座 $\zeta$ 星云中发现一组线光谱,黎德堡把它们分成两个线系,并从它们具有与氢光谱同样的收敛数而认定它是天体中存在的氢的光谱,但用巴尔麦公式  $\nu = R(1/n^2 - 1/m^2)$  去套算,其中的  $n$ 、 $m$  都不是整数,而是半整数。对于这个歧离,玻尔用他的原子理论计算出,发射这种光谱的元素是电离子的氢,而不是氢,它不久被英国的光谱学家福勒的实验所证实。本来,爱因斯坦对玻尔的理论并不在意,当有人向爱因斯坦说起玻尔理论可以很好地解释Pickering线的时候,爱因斯坦表示极大的兴趣与惊奇。随后,福勒、帕邢等人用玻尔的理论解释了电离的镁、电离的铝、电离的硅的光谱,精确测定了光谱中的黎德堡常数,验证了玻尔的理论值。特别是1916年,索末菲等人又用推广了的玻尔理论解释了光谱线在电场中分裂的Stark效应和光谱线在磁场中分裂的Zeeman效应。玻尔理论的真实性也由于光谱实验同理论的相印证而得到广泛的承认。

(3) 光谱研究是原子物理学展开的主线。玻尔对原子物理学的贡献,最重要的是提供一种方法,即在光谱数据和物理诠释之间相互比较相互弥合的过程中,推进理论,而不在乎理论推导的严密性。从1913年以后,依靠光谱学家和原子物理学家双边的努力,从玻尔提出第一个主量子数  $n$  开始,1915年,索末菲为描述电子椭圆轨道而引入角量子数  $n_\phi$ , 1916年为解释Zeeman效应引入描述空间量子化的磁量子数  $m$ , 1920年为描述光谱双线而引入内量子数  $j$ , 1925年,乌仑贝克和高斯米特引入的电子自旋量子数  $S$ , 使原子壳层结构的定量描述趋于完善,也只是在这个基础上,加上泡里提出的“不相容原理”,才使原子物理学家在本世纪初试求首先解开的元素周期律之谜得到解决。

光谱术为什么能在原子物理学的形成中起这么大的作用呢?光谱分析技术从十九世纪中叶基尔霍夫、本生创建以来,到十九世纪末的半个世纪中,已把当时所知的元素光谱分析无

遗。据统计到1916年发表的论文将近六万篇,光谱仪器和测试方法也已规范化,测量精度和其它物理测试相比居于遥遥领先的地位。例如早在1868年,光谱线波长的测量,精度已可达到十万分之几,1896年更达到百万分之几。正是有这么丰富而精确的测量数据,才有可能出现像巴尔麦公式这样试金石式的经验定律,正是有这么精密的测量技术,才有可能为不断揭示原子结构,提供精微的探针。

原子物理学所依据的经验材料是光谱现象及其规律,所以从这个基础上概括抽象起来的概念,如那不发生辐射的定态轨道,那跃迁的概念,都明显的打着光谱学的印记。尽管玻尔原先提出的轨道、角动量这些力学概念最终被抛弃了,但是用量子数描述的定态,和有选择的跃迁却成为描述原子组态与变化的内容而保留下来,並已成为近代亚原子物理学中有生命力的概念。难怪索末菲在他的巨著《原子结构与线光谱》一书的序言里写道:“只要了解光谱语言,物理学家就能够解决原子的有关问题”。“自然界用它的神秘喉舌,唱出光谱的音乐,这音乐是按照原子的结构规律规定它的节奏的。”

## 二、从经典理论到量子理论的过渡

原子物理学发展经历了三个阶段。第一是汤姆逊和卢瑟福经典理论阶段;第二是玻尔的半经典半量子论的过渡阶段;第三是量子力学的建立而标志原子物理新理论的完成。整个历史过程中最突出的特色之一,恰恰在于它经历了一段曲折而又生动的理论过渡期。

那么,原子物理学是怎样完成这个理论过渡的呢?

### 1. 经典理论和量子论的凑合和衔接

玻尔1913年的论文采用卢瑟福的经典模型,采纳索尔维会议的精神,把普朗克的量子概念纳入原子过程之中。他允许原子中的电子做开普勒的运动,但又把它们限制在不辐射能量的轨道上;他允许电子按经典的电动力学辐射光波,但又规定辐射的能量是不连续的。他采用“有心力作用的力学系统”、“轨道”、“角动量”这些经典概念,又创立了同光谱过程相适配的“定态”、“跃迁”、“选择定则”这些量子的概念,用它们熔铸成一尊人面狮身的新学说。尽管后来人们发现它在逻辑上不尽自洽,处理问题有局限性,但它却是一个有用的过渡,是一把打开原子世界的入门钥匙。随后,索末菲、施瓦兹希耳德等人,从理论上探讨斯塔克和塞曼效应时,也是用经典的哈密顿方程求附加能量,加上非经典的量子条件进行处理,也取得满意的结果。他们的工作显示出经典和量子理论的凑合可奏奇效,这使年青物理学家深受鼓舞。P.A.M.狄拉克在《物理学的方向》中回忆说,我第一次听到玻尔理论时,感到非常惊奇,我们加上一定条件后,就能把牛顿定律用于描述原子之中的电子运动,它居然获得了成功的结果。

### 2. 在同经典物理的类比中,推进新理论

玻尔的氢原子是电子绕核做圆形轨道的运动,因此只需用一个主量子数 $n$ 。索末菲类比经典力学中,系统做开普勒运动更一般的形式是椭圆轨道。而把玻尔的圆形轨道原子扩大为椭圆形轨道,並相应的引进对应于两个自由度的量子条件。从而推广了玻尔的原子理论。他还类比于天文学中水星运动的相对论效应,引进原子中电子做相对论性运动而发生的轨道进动,以解释光谱线的精细结构。尽管后来发现这种相对论性效应还不足以完全解决光谱线的

精细结构,但在当时他所推导的理论值,竟同实验测定很吻合,使物理学家们惊叹不已。

当时不少物理学家热切地寻找令人困惑的量子条件是从什么基本原理导出的。埃伦菲斯特首先提出“绝热假设”,他把单摆这种周期运动系统的绝热变化同原子这一周期运动系统的绝热变化进行类比,找到它们具有共同的绝热不变量 $E/\nu = \text{常数}$ 的特征,为量子条件提供理论的依据。

### 3. 从经典方法与量子方法的交汇点,发现旧理论对新理论的渐近性,为新理论的建立开拓道路

玻尔1913年的论文中,分两步吸取和改造尼克尔逊的原子发光机制。第一步使电子从无穷远处落到原子的某个轨道上,用这轨道运转频率的一半表示电子从无穷远到达此轨道所辐射的光的频率;第二步转而研究从某个轨道到另一个轨道过渡的发光。利用两个轨道能量差来决定发光的频率。玻尔为了从第一步推演到第二步,就必须分析按经典理论计算的电子在轨道上的运转频率,同按量子论计算电子在轨道间过渡决定发光频率,这两种频率之间的关系。他用电子在大轨道范围内由于相邻轨道间距很小,能级间跃迁所发的光频率几乎等于电子轨道运转的频率。在这里,他第一次揭示了原子行为在大量子数范围(大轨道段域)经典理论和量子论可以得出相同的结果。量子论在这里可以过渡到经典的理论,也就是说新旧理论在这里有共同适用的交汇点。这时玻尔实际上已有对应原理的思想,但还没有明确的确立为一个原理。后来,为了弥补他的理论不能解决光谱线的强度以及光谱的选择定则的缺陷,有鉴于经典电动力学在这两个问题上已有很成熟的成果,特别是受埃伦菲斯特提出的“绝热假设”的启发,他进一步从大量子数范围这个经典与量子理论的交汇点,发掘经典理论到量子论过渡的方法。他设想,电子在大轨道上运转时,可用经典理论描述:即用傅里叶展开式来表示,变成具有不同振幅和频率的多重振动的叠加。那些振幅较大的频率成分相当于较大的跃迁几率,这种频率的谱线就较强。对于傅里叶展开式中失缺的项,则出现这项所表征的谱线是被禁阻的,这就解释了光谱线强度和选择定则了。由于取得上述成功,玻尔于1918年正式把上述思想提升为基本原理,叫对应原理。1920年,玻尔在向德国物理学家的致词中提到:“虽然一般力学不能描述定态间的跃迁,然而却有可能发展一种理论,即关于定态之间各种跃迁和各种运动谐振成分之间的深刻对应。这种对应使现有的光谱理论在某些方面是普遍辐射理论的合理的概括”。经典理论将为更高的量子理论所概括,经典理论是新理论的粗界近似,它们之间存在的关联与对应,表明它们可以交汇与过渡。这些观点对于后继的青年物理学家,具有很大的启发和吸引力。

1925年,年青的海森堡就从这个对应原理出发,创立矩阵力学。他分析了玻尔的对应原理,认为在大量子数范围,电子轨道概念可以保留,但用来描述轨道的不是牛顿力学的位置、速度这些经典量,而应该是傅里叶展开后所包含的振幅和频率。振幅大小对应于某频率谱线的强度,也即电子在定态间跃迁的几率。他依据这种对应关系,借用矩阵数学运算法则,建立原子中电子运动的“运动学”和“力学”。于1925年发表了《运动学和力学关系的量子力学再解释》。薛定谔也于1926年创立另一种量子力学,即波动力学,它是以德布洛意的物质波概念为基础,借鉴哈密顿关于光学和力学类似的思想,从几何光学和波动光学的相互关系,而类推存在一门适用于原子世界以至宏观世界的更一般的“力学”,故称之为“波动力

学”。它和经典力学的关系，就像波动光学与几何光学的关系一样，后者是前者在极限情况下的近似。他用波的图象代替粒子，就像光波代替光线一样，他由此建立了有名的薛定谔波动方程，成为量子力学的基本方程。薛定谔和海森堡建立量子力学的途径尽管不同，但从认识论的角度看，却有共同之处。即把经典力学视为更一般理论在极限情况下的近似，经典理论和新理论存在对应的过渡，和玻尔的对应原理思想是一脉相通的，他们殊途同归建立了新的原子物理学。

与量子力学建立几乎同时，1925年泡里提出“不相容原理”，乌仑贝克和高斯米特提出电子自旋，从而解决了原子物理学悬而未决的反常塞曼效应、光谱线多重结构等现象，特别是完满地解开元素周期律的奥秘。至此，原子物理学经历了二十三年的过渡期，借助于过渡理论的揣摸、拼凑、修整而终于完成新的理论。

### 三、结 语

(1) 一门学科的理论是从许多相关的现象的经验材料抽象整理出来的，也正因为如此，这个理论才具有广阔的概括力。但在整理各类现象的经验材料时，往往可以发现，其中某一种现象的经验材料对于理论的建成起着决定性的作用。因为它经过比较长期的观测和积累，有较丰富、稳定而精密的数据，甚至已有可能建立了相应的经验规律。因此，在理论的形成过程中，它可以起到“触媒催化”或“凝结核心”的作用，撮合各种特殊现象的内在联系而综合成统一的理论。例如丰富的天文观测和开普勒关于行星运行的经验定律，使牛顿发现了万有引力定律，并以它为核心，建立经典力学的理论体系。大量的光谱观测数据特别是巴尔麦公式，则成了创立原子理论的契机。

(2) 物理学家进入新领域的探索中，在从经验到理论的提升阶段，往往要从模糊的状况开始，经过过渡、澄清而逐步达到清晰；在建构理论的时候，必须经由猜测、类比，假设这些非逻辑的步骤，在反复试探、反复检验，反复修正中而达到逻辑的理性的认识。在这些过程中，总是要借用他们比较熟悉的旧有的基本原理、基本概念和研究的方法，去理解新材料，去评估和解释新事实，去设计某种模型。这样，就使学科理论在建立时，必然要经历一个新旧交错、曲折前进的过渡阶段，相应的形成一种过渡的理论。而理论的过渡期的存在，则说明人类通往真理的道路不是笔直的，同时又说明人类认识新事物的活动中，具有何等生动活泼的能动性。

### 参 考 文 献

- [1] Bohr, N., On the Constitution of Atom and Molecules, *Phil.Mag.*, 26(1913), 1—25.
- [2] Cajori, F., *A History of Physics*, 龙门联合书局, (1933).
- [3] Mackinnon, E.M., *Scientific Explanation and Atom Physics*, The University of

Chicago press, (1982).

[4] 宋玉升等译, 诺贝尔奖获得者演讲集(物理学第二卷), 科学出版社, (1982).

[5] Sommerfeld, A., Atom Structure and Spectral Lines, publishers: E.P.Dutton and Company, INC, (1923).

[6] Whittaker, E., A History of the Theories of Aether and Electricity, Trinity College Cambridge Press, (1953).

[7] 阿尔明·赫尔曼, 量子论初期史, 商务印书馆, (1980).

## The Features Showing up in the Discipline Formation of Atomic Physics

Zeng Jingchun

### Abstract

There are two distinguishing features showing up in the discipline formation of atomic physics: it took spectroscopy as a red line for theorization, and it involved classical and quantum theoretical transition.

These two features reflect two regular patterns of scientific cognition: 1, certain empirical materials, including abundant and precise information, form empirical rules which stimulate the formation of a new branch of learning; 2, the formation of a new branch of learning usually goes through an interim stage in which an interim theoretical form emerge accordingly.