

专题：玻尔原子模型诞生100周年

# “思想领域中最高的音乐神韵”

纪念玻尔原子模型诞生 100 周年

方在庆 朱慧涓

**摘要** 在玻尔原子模型诞生一百周年之际，本文通过考察尼耳斯·玻尔在1913年之前的思想发展，以及他提出原子模型的过程，试图回答如下问题：玻尔为什么从金属电子论的研究突然转向了原子模型的研究？他是如何在原子结构与光谱线之间建立不可分割关系的？他的原子模型在哪些方面突破了经典物理学？更进一步，科学家如何解决一个公认的科学理论所遇到的问题？一个人如何才能从学术边缘走向学术中心？通过梳理对玻尔建立原子模型过程的不同解读，本文试图对上述问题给出初步答案。

**关键词** 尼耳斯·玻尔 原子模型 卢瑟福 汤姆孙

## 一 引言

1913年，意气风发，获得博士学位才两年的玻尔(Niels Bohr, 1885-1962)在英国著名科学期刊《哲学杂志》(*Philosophical Magazine*)上分三期(7月、9月、11月)发表了《论原子构造与分子构造》(*On the Constitution of Atoms and*

---

编者按：今年是丹麦科学家尼耳斯·玻尔提出原子模型100周年。玻尔被普遍认为是“20世纪仅次于爱因斯坦的最伟大的科学家”[Weizsäcker 1999]。他的名字与量子力学、“哥本哈根解释”、“玻尔学派”等永远地联系在一起。如果追根溯源，玻尔真正被国际物理学界所注意，是从他提出原子模型的1913年开始的。玻尔的原子模型，是建立在卢瑟福(E. Rutherford, 1871-1937)的有核模型的基础之上，在保留了经典力学的一些概念的同时，引入了普朗克(Max Planck, 1858-1947)的量子概念，很好地解释了氢原子光谱和元素周期律，开创了“半经典的”量子时代。它是一个承前启后的过渡理论，是从旧量子理论攀登到新量子理论必要的脚手架。如今，玻尔的理论虽然过时了，但玻尔的研究方法和探索精神对于我们仍有巨大的启发意义。

作者简介：方在庆，中国科学院自然科学史研究所研究员，朱慧涓，中国科学院自然科学史研究所博士研究生。

*Molecules*)的杰作(史称“伟大的三部曲”[Trilogy])玻尔的原子模型由此诞生,一场波澜壮阔的量子革命的前期小高潮开始了。当爱因斯坦(A. Einstein, 1879-1955)在67岁回顾自己的科学生涯时,还非常惊讶玻尔当时的洞察能力。“就像是一个奇迹——而且即使在今天,在我看来仍然像是一个奇迹。这是思想领域中最高的音乐神韵(Musikalität)。”[爱因斯坦2009,页23]

也许今天的人们已经无法想象玻尔原子模型带给他同时代的人的那种震撼,一种如爱因斯坦所描述的“奇迹”感。要评价玻尔的原子模型在科学史中的地位,首先必须详细地考察当时已出现的物理学思想,包括科学家们所认识的物理世界、公认的理论以及背后的世界图景。在此基础上,再分析玻尔所使用的概念和方法及其独特性。具体而言,我们应该了解玻尔之前的各种原子模型及其特点,以及所面临的困难,弄清玻尔介入原子结构问题的时间点,以及在这个过程中可能受到的启示和帮助。寻找玻尔接受卢瑟福有明显缺陷的“有核模型”的理由,探索玻尔跳出经典电动力学的一些框架,从量子论中寻找答案的动机,了解玻尔突然转向原子辐射问题,即原子光谱线问题的原因。同时,也要弄清玻尔的原子模型所存在的困难及其不容忽视的优势。为什么是玻尔,一个来自北欧小国,相比于英法德而言,没有多少物理学传统的丹麦的27岁的小伙子,而不是其他任何人,在历史的关键时刻做出了自己独特的贡献?回答这些问题都离不开首先谈论玻尔的智力成长环境。

## 二 1913年前的玻尔

玻尔1885年10月7日出生于丹麦首都哥本哈根,父亲克里斯蒂安·玻尔(Christian Bohr, 1855-1911)是哥本哈根大学的生理学教授,母亲艾伦(Ellen, 娘家姓阿德勒[Adler])来自于一个富有的犹太家庭。玻尔和他的弟弟哈拉尔德·玻尔(Harald Bohr, 1887-1951)在“一个最有助于其天才成长的气氛中”长大。父亲经常邀请同事来家里讨论学术问题,兄弟俩就是在这种氛围中培养出了对自然科学的强烈兴趣,同时也造就了开阔的学术视野。1903年中学毕业后,玻尔进入哥本哈根大学,跟随



图1. 哈弗丁

当时大学里唯一的物理学家克里斯蒂安森(C. Christiansen, 1843-1917)学习物理,在蒂勒教授(T. Thiele, 1838-1910)指导下学习天文学和数学;也听了哈弗丁教授(H. Høffding, 1843-1931)的哲学课。哈弗丁是他父亲的好朋友,常到玻尔家里参加聚会。后来与玻尔结成忘年交。哈弗丁在年轻的时候受到丹麦哲学家克尔凯郭尔(S. Kierkegaard, 1813-1855)的强烈影响,但他后来成为实证主义者,这一点也感染了玻尔。在玻尔学习物理的时候,他的弟弟哈拉尔德学习数学,后来成为著名的数学教授。兄弟们喜欢足球,哈拉尔德曾代表丹麦国家足球队参加了1908年夏季奥林匹克运动会足球比赛,并闯入决赛,获得亚军。玻尔则是个出色的守门员。

1911年春,在克里斯蒂安森教授的指导下,玻尔以《金属电子论探讨》(*Studier over Metallernes Elektrontheori*)一文获得了博士学位。在这篇论文中,他对汤姆孙(J. J. Thomson, 1856-1940)、洛伦兹(H. Lorentz, 1853-1928)的金属电子论作了系统的评述,并清楚地揭示出了电子论所遇到的困难。他还第一次涉及到了普朗克的量子概念。还在读大学期间,玻尔就参与了丹麦皇家科学院1905年度物理学问题征文(1906年10月30日提交),并获得金奖。论文经过修改和翻译,以《用水注振动法测定水的表面张力》(*Determination of the Surface-Tension of Water by the Method of Jet Vibration*)为题1909年发表在英国皇家学会的《哲学会刊》(*Philosophical Transactions of the Royal Society*)上。玻尔第一次发表的这篇论文受到学界的关注。英国皇家学会的秘书、以《以太与物质》(*Aether and Matter*, 1900)一书著名的英国物理学家拉莫尔(J. Larmor, 1857-1942)曾误把当时才23岁的玻尔当成“教授”。

1911年获得哲学博士学位后,玻尔得到丹麦嘉士伯基金会(The Carlsberg Foundation)的资助,出国深造一年。与他的弟弟选择到德国格丁根留学不同,他首选英国剑桥。对于希望从事物理学研究的人来说,剑桥是像麦加一样的圣地。那里有1906年诺贝尔物理学奖得主,55岁处于事业顶峰的汤姆孙。玻尔希望在其指导下,继续从事金属电子论研究。他于那年9月到达剑桥,但与汤姆孙之间的互动却不太令人满意。在剑桥没有取得任何成果,玻尔决定转到曼彻斯特,跟随1908年度诺贝尔化学奖得主卢瑟福继续研究。初到曼彻斯特时,玻尔还继续金属电子论研究,后来他才转向原子结构问题。正是在曼彻斯特短短四个月的研究工作,为玻尔随后的爆发打下了基础。卢瑟福与他情同父子,演绎了一段物理

---

尽管哈弗丁在国际上并没有产生多少影响,但他在自己的祖国丹麦却非常受尊敬。

学史的千古佳话。

1912年7月底,玻尔离开英国,回到丹麦与心爱的恋人玛格丽特·诺伦德(Margrethe Nørlund, 1890-1984)结婚。9月起在哥本哈根大学任教,1913年春正式成为该校讲师。

1913年2月4日前后的某一天,比玻尔差不多小一岁的同事汉森(H. Hansen, 1886-1956)拜访他,提到了1885年瑞士一所女子中学的数学教师巴耳末(J. Balmer, 1825-1898)的工作,玻尔顿时受到启发。

### 三 玻尔模型之前的原子模型

19世纪末,随着元素的放射性和电子的发现,人们开始研究原子的内部结构。但在玻尔模型1913年出现以前,大部分原子理论是猜测性的,没有坚固的实验支撑,有些甚至是纯粹的哲学思考,而不是科学理论。原子理论只是物理学的一个极小的研究领域,没有受到应有的重视。1900年在巴黎举办的第一届也是唯一一届国际物理学大会(International Congress of Physics)上,在被接受的92篇论文中,只有汤姆孙的论文是明确讨论原子结构的。汤姆孙提出原子模型的主要目的也不是为了弄清原子的真实图景,



图2. 玻尔和玛格丽特

而是为了有助于理解原子物理学的其他方面。[Kragh 2012, p. 1]

在玻尔原子模型之前,汤姆孙1904年提出来的“葡萄干布丁模型”(plum pudding model)最为有名。他认为数目不多的电子就像蛋糕里的一颗颗葡萄干一样,镶嵌在一大团弥漫分布的正电荷里面,正电荷的质量无足轻重。[Thomason 1904]

同一年,坚信东方人也同样能在科学上做出贡献的日本物理学家长冈半太郎(Nagaoka Hantaro, 1865-1950),提出了著名的“土星模型”。原子中心是一个带

---

玛格丽特的哥哥尼耳斯·埃里克(Niels Erik Nørlund, 1885-1981)是玻尔的同学,后来成为数学家。

正电荷的球体，在它外面有许多个电子聚集在一个像土星光环那样的圆环上，做围绕中心球体的运动。用长冈自己的话来说就是，“大量相同质量的以等角度间隔排在圆周内的粒子，这些粒子之间的斥力与它们之间距离的平方成反比”，以及“以相同平方反比定律吸引着周围其他粒子的一个大质量粒子”。长冈的模型虽然有名，但他并没有从这个模型得出积极的具体推论。长冈的论文 1904 年发表在英国《哲学杂志》上。7 年后在同一期刊上，卢瑟福公布了他的原子模型，其特征与长冈的极为相似。但卢瑟福早期并未注意到长冈模型，他在 1911 年才首次提及了长冈的工作。长冈的论文在长达 7 年的时间里没有获得应有的重视。实际上，此模型在 1908 年之后就逐渐无人谈论，一个很可能的原因就是此模型存在诸多缺陷。早在 1904 年就有文章分析了长冈土星模型的困难，例如假设并不自洽，与实验结果不一致等等 [Kragh 2010, pp. 38-39]。而另一个可能的解释在于：当时学界还没有认识到“有核的”原子模型的重要性，长冈的论文问世太早。

1909 年，卢瑟福为了检验汤姆孙模型是否正确，指导他的助手盖革 (H. Geiger, 1882-1945) 和马斯登 (E. Marsden, 1889-1970) 做了一个用  $\alpha$  粒子轰击金箔的实验，结果发现，约有万分之一的  $\alpha$  粒子发生了大角度散射，这与汤姆孙的电子均匀分布在正电荷球体中的设想是矛盾的，表明原子是有核的，而且整个原子的质量应集中在一个较之原子大小而言线度极其微小的核内。这是玻尔模型问世前原子结构理论的最大成就。[Trenn 1974]

1911 年，英国数学家尼科耳孙 (J. Nicholson, 1881-1955) 以长冈的“土星模型”为基础，设想电子在带正电荷的中心球体外面的“光环”上做环绕运动。原子结构和太阳结构类似，它们都能放射出能量脉冲。这种脉冲相当于普朗克的量子，于是就形成了线状光谱 [McCormack 1966]。后面我们会详细讨论尼科耳孙对玻尔的影响。

此外，还有荷兰物理学家洛伦兹的弹性束缚电子模型 (1896)、德国物理学家莱纳德 (P. Lenard, 1862-1947) 的动力子模型 (1902)，以及瑞士物理学家和数学家里茨 (W. Ritz, 1878-1909) 的磁原子模型 (1908) 等等 [Hameka 2004, p. 124, 6, 8]。所有这些模型都在某些方面成功地说明了原子的某些性质，而在另外一些方面又遇到了困难。绝大多数物理学家对它们都持怀疑态度。有许多更重要的问题没有得到圆满的解决，无人能看出这些问题之间的联系。原子的构成，元素的放射性质与化学性质之间的关系，巴耳末经验公式背后的物理意义等等，像一团迷雾一样，高悬于物理学大厦的大堂之中。

## 四 玻尔对原子模型的关注

玻尔是从何时开始关注原子结构的？按照玻尔全集的第一任主编，玻尔的得意门生 玻尔思想的最佳诠释者罗森菲尔德(L. Rosenfeld, 1904-1974)的说法：“在哥本哈根结束了学业之后，玻尔去了剑桥，希望在汤姆孙的指导下继续进行他在电子论方面的工作。但是，当他于1911年10月初旬到了那里时，他很快就发现汤姆孙已对这一课题失去了兴趣，而且也不肯担任审阅学位论文的工作，那篇论文已由玻尔很费劲地译成了英文。他的发表那篇译文的努力同样没有成功。这种可悲的失望并没有阻止这位好学的青年在剑桥尽量学习。”[玻尔2012a, 页24]

玻尔与汤姆孙之间的交流不顺畅，部分原因是他糟糕的英文。玻尔能够说明他发现的错误，但是不能够十分完整地解释他的论据。汤姆孙很难设想，站在他面前的这个腼腆的、刚毕业的学生会是一个饱学之士。他也未能意识到他与这位不同寻常的学生的谈话所能得到的回报，远超过了这其中消耗在语言上的精力。实际上，即使语言和兴趣因素都抛开不谈，玻尔和汤姆孙也不太可能会发展出更为融洽的交流。因为这两人在研究风格和方法上都大相径庭。[Heilbron & Kuhn 1969, pp. 225-226]

玻尔离开剑桥，转到了曼彻斯特的卢瑟福实验室，而他在那里的几个月（1912年3月—7月）“奠定了他在物理学方面最伟大成就（即原子构造理论）的基础”。玻尔与卢瑟福的“这种初期接触却不但在科学中开辟了一个新的时代，而且在二人之间开始了一种罕见的终生友谊；……卢瑟福以其机敏的知人之明确实很快就发现了这位羞怯的、谦逊的‘男孩子’的天才……”。[玻尔2012a, 页25]

事实上，玻尔并非是带着对原子模型的兴趣去卢瑟福那里的。根据玻尔的回忆，他与卢瑟福在曼彻斯特的初次见面，只表示愿意去卢瑟福的实验室工作，并了解放射性的研究，其中并没有涉及原子模型的话题[派斯2001, 页181]。在曼彻斯特期间，玻尔并没有立即投入到卢瑟福的原子模型的研究当中[Heilbron & Kuhn 1969, p. 253]。相反，直到5月底，玻尔关注的焦点仍然是他那篇博士论文。他告诉弟弟哈拉尔德，他对于自己在卢瑟福实验室里有关放射性实验的工作不抱什么希望：“我还不能肯定卢瑟福交给我的任务会有多大的结果。”不过，他近来对于电子论有了新的发现，而他期望，这一发现能够“排除对于我已经处

---

在剑桥的时候，玻尔就寻求能够在英国的期刊上发表他的博士论文，但由于论文的篇幅以及英文措词的问题，一直没有能够发表。

理过的这样一种电子论的一切可能提出的（和近来已经提出的）主要反对见解”。  
[玻尔 2012a, 页 330-331]

从玻尔 1912 年 6 月 12 日写给哈拉尔德的一封信中，找到了玻尔思考原子结构问题的最早证据，“……于是我就搞出关于这一问题的一种小小的理论，这种理论或许会在原子结构有关的某些问题上带来某些光明，即使带来的不是很多……”那么，从 5 月底到 6 月 12 号的两周时间里，玻尔的目光和思绪怎么从金属电子论问题转移到了原子结构的问题上了呢？玻尔这封信有一个很好的提示，那就是达尔文（C. G. Darwin, 1887-1962）的一篇关于  $\alpha$  射线的吸引理论的论文。玻尔不久前读了这篇论文，发现不仅数学处理上有错误之处，而且“基本观念上也不十分令人满意。”[玻尔 2012a, 页 332]。

这位达尔文是进化论奠基者查尔斯·达尔文（Charles Darwin, 1809-1882）的孙子。他也是卢瑟福实验室里的一员，他那篇论文的主要目标就是运用卢瑟福的原子模型来计算  $\alpha$  粒子在空气或薄的金属片中穿行损失的速度。他做出的吸收曲线的形状与实验符合得很好，而且他计算出每个原子所拥有的电子数与卢瑟福理论要求的值甚为接近。不过，达尔文在计算时引入了两条假设。1.  $\alpha$  粒子不会遇到阻拦，除非它穿过了原子 2. 在飞速行进的  $\alpha$  粒子与原子内部作用力短暂的接触时间内，原子内部作用力是可以忽略的。玻尔对这两个假设持怀疑的态度。他不同意达尔文的这一看法，即电子在与  $\alpha$  粒子碰撞时不受任何约束。促使他做出此批评的灵感，据说是来源于他对于汤姆孙近来的一篇关于电离的论文的了解 [Heilbron & Kuhn 1969, pp. 239-240]。

玻尔在前述的信中接着提到了卢瑟福的原子模型，并给予高度的评价：“卢瑟福教授……已经建立了一种原子结构理论，这种理论似乎比我们以前的任何理论都具有更加坚实得多的基础。”[玻尔 2012a, 页 332] 然而，卢瑟福的新原子模型并不出名。与汤姆孙的原子模型相比，卢瑟福的原子模型有其固有的困难，它在力学上是不稳定的 [Heilbron & Kuhn 1969, p. 241]。卢瑟福本人也对自己的原子模型持保留态度。在 1911 年召开的第一届索尔维会议上，他并未提及他的模型。他在一年后发表的长篇论著中也仅用了极少的篇幅介绍  $\alpha$  粒子的散射。玻尔的回忆也说明了卢瑟福原子模型遭遇的冷落：“卢瑟福模型还根本没被人们认真对待。在任何地方都没有人提到过它。”[派斯 2001, 页 183] 玻尔的说法也不太准确，至少我们可以指出，卢瑟福实验室成员对此原子模型还是有所关注的。

那么在两周甚至可能更短的时间内，玻尔是如何认识到卢瑟福的原子模型比

以前的任何理论都具有“更加坚实的基础”呢？

两个人对玻尔的影响是无疑的，除了前述的“真正的达尔文的孙子”外，还有同在卢瑟福实验室的德海韦西（G. de Hevesy, 1885-1966）。德海韦西来自匈牙利的一个地位显赫、富裕的犹太家庭，与玻尔同庚，但长两个月，是一位物理化学家。他非常风趣，对生活充满热忱。后来因为“利用同位素作为示踪物研究化学过程”而获得1943年度的诺贝尔化学奖。



图3. 德海韦西

当玻尔在卢瑟福实验室工作的时候，他从德海韦西那里了解了不少关于元素周期表中放射性元素的知识。玻尔回忆到，当他听了德海韦西的一些介绍后，他立即得到了一种想法，即若干化学上等同，但是原子质量数却不同的物质（后在1913年被命名为同位素）很可能具有相同的核电荷数。他还曾把这一想法告诉了卢瑟福：“我对他说，这可能会成为他的原子的最终证明……我觉得这在不多几年之内就会被看成卢瑟福原子的基础……你有一些元素，它们的所有性质都相同，而它们又按有规律的方式发生变化……。”[派斯2001，页184-185]

另有一份40页的题为“ $\alpha$ 射线的散射和吸收”的玻尔手稿值得引起我们的注意，其中是玻尔处理电子稳定性问题的记录。尽管这些稿件没有标记日期，但从内容上看，这似乎是他第一次处理这一类问题，因为它们展现的研究进路，与他8月份在曼彻斯特提交的一份论文的研究进路十分类似。手稿被分成三个部分，前两部分处理的是简单情况，即单电子原子。而第三部分考虑的是一个电子环里有多个电子的情况。但是第三部分的计算却进行不下去，因为原子结构不稳定，整个计算都不成立。[Heilbron & Kuhn 1969, p. 242]

这份没有日期的稿件究竟是何时完成的，现在已经无法考证。这份稿件使我们注意到玻尔对原子结构的稳定性问题的思考，而这种思考的结果很可能导致了玻尔对于卢瑟福模型更深入的认识，及由此建立的对卢瑟福原子结构的信心。这一信心在一周后（1912年6月19日）玻尔给哈拉尔德的信中体现无疑：“我或

第一部分处理单电子原子，其中电子围绕一个固定点旋转，并且受到与距离的平方成反比的力的作用；第二部分处理电子受到任意力的作用的情况。

虽然没有更多的证据支持，但库恩和海耳布朗认为，玻尔很可能在6月12日或者更早就完成了手稿中的计算。



许已经在原子的结构方面有所发现……也许有一点点真实性。”[玻尔 2012a, 页 334] 尽管我们不能确定玻尔具体何时接受卢瑟福模型并认识到了它的深远含意, 但是对于他为什么接受卢瑟福原子模型, 我们至少可以说出下述两点原因: 玻尔对卢瑟福原子结构的稳定性以及原子结构与元素周期系之间的关系的思考。然而, 这一切的进展都有赖于他对于经典力学在原子内部必然瓦解的信念, 以及他寻找解决这些问题的方法: 量子论。

## 五 玻尔的新线索: 量子化及光谱线

玻尔在原子结构方面的早期思考集中反映在了他于 1912 年 7 月 6 日寄给卢瑟福的一份文件中。这份被科学史界称为“卢瑟福备忘录”(Rutherford Memorandum) 的文件论述了他对于原子结构和原子稳定性的一些初步想法。在卢瑟福备忘录中, 值得人们注意的有两个地方:

首先, 玻尔列出了卢瑟福原子结构遭遇的困难。“在这样一个原子中, 不可能存在电子并不运动的任何平衡位形。”若考虑包括  $n$  个电子的一个环绕着核运动的情况, 则这样的环“并不具备普通力学意义下的任何稳定性。”而这种力学不稳定性在汤姆孙的原子模型中并不存在。但是玻尔证明, 一个环上的电子数只能小于或等于 7, 大于这个数目的多余电子就能够脱离原子, 而同时, 卢瑟福的原子模型中较内电子环对其他环的稳定性只有很小的影响。正是基于这两点, 玻尔得出一个似乎不可避免的结论: 即卢瑟福的原子模型对各元素化学性质的周期律可以作出可能的解释, 而汤姆孙的原子模型要做出这一解释是不可能的。[玻尔 2012b, 页 112-113]

玻尔当时认识到, 比起汤姆孙的模型, 卢瑟福的模型有一些优势。在解释元素周期表中处于同一列的元素有相似的性质时, 汤姆孙给予的解释是基于他们的内层电子环的相同构造, 而在玻尔对卢瑟福模型的说明中, 相似性是由最外层电子数相等造成的。而且玻尔对于卢瑟福原子模型的构造更符合卢瑟福大度散射所要求的核电荷数 [Heilbron & Kuhn 1969, p. 247]。这些优势无疑为玻尔选择卢瑟福原子模型增添了信心。

卢瑟福的原子模型在力学上的不稳定性似乎并没有令玻尔感到为难。相反, 玻尔并不打算再纠缠力学问题, “不再试图给出力学基础”。他指出, 力学上并不存在任何东西可以对电子环的半径和旋转时间做出判别。因此, 他引入了一个假

设,那就是“对于任何稳定的环(任何出现在自然原子中的环),环上电子的动能将和转动时间成确定的比例。”这一假设在玻尔看来是能够为全部实验结果提供解释的“唯一假设”[玻尔 2012b, 页 113]。一方面,它可以为原子内部的电子运动提供计算基础,而另一方面,普朗克和爱因斯坦提出的那些关于辐射机制的概念正在为实验结果所证实。

实际上,除了上述原因,经典力学不适用于原子内部的信念早就已经出现在玻尔的想法之中。他曾在博士论文中提到:“[力学的力的]假设并不是先验地不言自明的,因为人们必须假设,自然界中存在一种在种类上完全不同于力学性质的力的力……各物体的许多性质,它们是无法解释的,如果人们假设在分子内部起作用的力……也是力学性质的话。”[派斯 2001, 页 201]

卢瑟福备忘录反映出玻尔对于卢瑟福原子模型的信心,正是来源于他所认识到的“化学性质被假设为依赖于最外的电子环的稳定性”以及他长久抱有的经典力学不适用于原子内部的信念。我们亦能指出,卢瑟福模型在一些方面亦有先天不足,例如力学稳定性问题。但是对玻尔而言,他利用这些假设所构造的逻辑有着令他不可抗拒的魅力。

在7月下旬离开曼彻斯特,回到丹麦之后,玻尔一直希望能够将他近来对原子结构问题的思考写成论文发表,但这一工作一拖再拖。到了1912年11月,他写信给卢瑟福说:“我还没有能够完成我关于原子的论文并把它寄给你,甚感抱歉。但是我一直有那么多的讲课工作和实验室工作要做,以致我剩下的时间很少了……我希望能够在少数几个星期内完成这篇论文。”但是,玻尔对这一估计稍显乐观,因为到了1913年1月31日,他仍告诉卢瑟福,希望很快就能寄去关于原子的论文。玻尔在3月6日才最终把这篇论文的第一部分寄给卢瑟福。[玻尔 2012b, 页 406、407、409]

这篇论文比玻尔原先预计花的时间长得多的原因,除了上述的工作繁忙,还有他对光谱线问题的思考。在1913年3月6日给卢瑟福的信中,他说:“正如你将看到的,第一章主要处理的是线光谱的发射问题,这是从我在上次写给你的信中概述了的那种观点来考虑的。”[玻尔 2012b, 页 410]然而,玻尔原先并没有考虑在他对原子结构的构造中加入光谱线问题的讨论,这一点从卢瑟福备忘录中可以清楚地看到。实际上,直到1913年2月7日,在玻尔给德海韦西的信中,在

备忘录中并没有详细地说明这一假设与普朗克的量子之间的关系。一般都认为这里的关系式是  $E = K\nu$ , 其中  $E$  是一个环上运动着的单个电子的动能,  $\nu$  是它的转动频率, 而  $K$  是与普朗克常量有关的常量。

描述作为他计算基础的概念时，他只字未提光谱线问题。[玻尔 2012b, 页 380]

究竟是什么原因促使玻尔对光谱线问题产生了兴趣？玻尔 1913 年 1 月 31 日给卢瑟福的信让我们注意到了尼科耳孙的论文。玻尔在信中谈到了尼科耳孙的理论与他的理论的不同，起初他认为这两者之间必有一方是错误的，但后来他改变了想法。他发现，他俩研究的体系都是以卢瑟福的原子模型为基础，也都借助了普朗克的辐射理论。令他们的理论获得不同结果的原因之一是玻尔处理的是较为稳定的原子态，而尼科耳孙处理的是稳定性较小的原子态。在这种态中，光谱线的能量辐射问题就会显现。玻尔就此指出，他“完全没有处理和可见光谱中各谱线相对应的频率的计算问题”。[玻尔 2012b, 页 407-408]

类似的观点在玻尔 1912 年 12 月 23 日给哈拉尔德的信中也出现过 [玻尔 2012a, 页 336]。玻尔在剑桥的时候就已经了解了尼科耳孙在金属电子论方面的工作，但是他并不欣赏。而这一次尼科耳孙的原子和光谱理论却让他不得不重视，因为尼科耳孙的这一理论与他的理论在形式上十分相似 [玻尔 2012b, 页 86]。然而，玻尔不同意尼科耳孙理论中对于电子环的半径、频率所采用的计算 [Heilbron & Kuhn 1969, p. 260]。尽管它在解释谱线方面十分成功，玻尔认为自己理论的优势在于解释卢瑟福的散射理论。虽然玻尔没有立即对光谱线问题做任何处理，但尼科耳孙的理论对玻尔的影响无疑是存在的。

玻尔在回忆自己为什么会转向光谱的研究时，常用的一句话就是：“当我一看到巴耳末公式的时候，我一下子就全都明白了。”在此之前，玻尔并没有注意到这个公式。他是通过他的同事汉森才了解到此公式的。为此，他还翻阅了斯塔克 (J. Stark, 1874-1957) 的书。[玻尔 2012b, 页 88]

巴耳末公式 究竟给玻尔带来了什么？为何他一看到巴耳末公式就什么都明白了？

按照罗森菲尔德的说法，这个公式让玻尔找到了他所寻求的使“量子以正确的途径引入原子体系”所缺少的线索。玻尔日后也回忆到，此公式所提供的线索十分清楚，以致它“唯一地引导了他所提议的辐射过程的量子描述” [玻尔 2012a, 页 30]。可以这么说，玻尔领悟到了巴耳末公式所蕴涵的某种与普朗克辐射量子的联系，而他一直在构思的单电子氢原子模型也似乎有望通过巴耳末公式

有些资料称其为里德堡公式，参见玻尔 2012a, 页 29。实际上，巴耳末公式和里德堡公式的区别不大，前者由巴耳末于 1884 年提出，后者由瑞典物理学家里德堡 (J. Rydberg, 1854-1919) 于 1890 年独立发现。里德堡公式是通过对多种元素的光谱进行整理后得到的，比巴耳末公式更普遍一些，见郭奕玲 1990, 页 51。

包括稳定性问题，元素周期系，放射性问题以及原子的结合过程等等。

得到解决。

利用巴耳末公式，玻尔还可以很好地反驳尼科耳孙的理论。玻尔在《论原子构造与分子构造》第一部分中提到：“除了这样一些——可能只是纯形式上的——反驳以外还必须指出，在所给的形式下，[尼科耳孙的]理论似乎并不能说明众所周知的联系着普通元素的线光谱各谱线频率的巴耳末定律和里德堡定律。”[玻尔 2012b, 页 134]

玻尔无疑感到用量子描述原子模型和辐射过程的必要性，而巴耳末公式与他所寻求的解决方案之间存在某种呼之欲出的关系。然而摆在玻尔面前的现实难题是，他如何才能构造一种量子化的原子理论，它能推导出巴耳末公式。

实际上，对于玻尔而言，这一难题并不是能够轻易解决的。从玻尔的论文《论原子构造与分子构造》的第一部分中，我们可以看到，在处理巴耳末公式的时候，他有些犹豫不决。论文中包含了巴耳末公式的两种推导，分别建立在不同的假说上。第一个假说是不同的定态对应于不同数目的能量子的发射。玻尔在给完推导后得到结论说“当考虑频率是能量的函数的某种体系时，这一假设就会被看成不太可能的”。而他采用的第二个假说则考虑到了对于不同的定态来说，所发射的总能量与电子的绕转频率之间的关系，需要利用态的某种函数来说明。[玻尔 2012b, 页 138]

综合看来，尼科耳孙的理论以及巴耳末公式对玻尔转向光谱线问题的研究起到了决定性的作用。玻尔首先注意到了尼科耳孙的理论在解释光谱线问题上的成功，但却不同意尼科耳孙在其它方面的一些处理方法。而当他看到巴耳末公式的时候，他豁然开朗，发现了巴耳末公式能够为他的理论提供他所需要的量子化道路。然而，尼科耳孙的理论在这方面却没有优势。对氢元素光谱的说明是玻尔利用这一新的方法来处理的一个极为成功的例子。

## 六 玻尔模型的突破及其内在困难

玻尔《论原子构造与分子构造》分三次发表于《哲学杂志》1913年的7月号、9月号和11月号上。第一部分除简短的“导言”外，是探讨“正核对电子的束缚”(Binding of Electrons by Positive Nuclei)，主要处理单电子体系及其光谱问题，同时给出了理论基础，第二部分“单原子核体系”(Systems Containing Only a

---

玻尔采用过三种推导巴耳末公式的方法，参见 Heilbron & Kuhn 1969, p. 266-277。

Single Nucleus )描述了原子和周期体系的理论 ;第三部分“多原子核体系 ( Systems Containing Several Nuclei ) 则描述了分子构造理论。

在论文的第一部分中,玻尔提供了两个假设 :一、体系在定态中的动力学平衡可以借助于普通的力学来加以讨论,而体系在不同定态之间的过渡则不能在这样的基础上进行处理 ;二、后一种过程是由单频辐射的发射所伴随的,对于这种辐射来说,频率和所发射的能量之间的关系式就是由普朗克理论给出的那一关系式 [玻尔 2012b, 页 134]。后来他对此两条假设的改进版本更为人所熟知,即定态和跃迁。

在收到了玻尔 3 月 6 日的论文之后,卢瑟福对此做出了评价,这也许可以最为恰当地说明人们对这个半经典理论的态度:“普朗克概念和旧力学的混合却使人很难对什么是它的基础形成一个物理概念。在我看来,你的假说中有一个严重的困难……那就是当电子从一个定态过渡到另一个定态时,它怎么决定将以什么频率来振动呢?在我看来,你似乎必须假设电子事先就知道它将在什么地方停下来。” [玻尔 2012b, 页 411]

具体说来,按照经典电动力学,绕核旋转的电子会辐射能量。在玻尔的原子模型中,不同态之间的电子通过辐射能量来跃迁。然而最靠近原子核的电子要怎么办呢?它若不断辐射能量,最后会以螺线方式掉入原子核中。玻尔解决这一问题的方法就是直接假设处于这一态的电子是稳定的:“我们在这儿就被引导着假设存在一系列稳定组态……已经发射出最大能量的那个组态,就是  $\tau = 1$  的组态。我们假设这个组态就是体系的持久态。” [玻尔 2012b, 页 145] 这是“物理学中见过的最大胆的公设之一”。 [派斯 2001, 页 215]

这一理论只是玻尔原子结构理论的雏形,而非一种十全十美的理论,这里面“还有许多相当严重的困难等待克服”。这主要体现为,玻尔模型不是从基本原理出发来提出公设,更多地是从实验成功而外推的。它与经典电动力学明显相悖。除了能很好地描述只有一个电子的氢原子和离子的行为外,对多电子系统无能为力。它无法解释稍微复杂一些的氦原子光谱以及更复杂的原子光谱。它也没有考虑相对论效应,尽管电子在氢原子的基态运转速度接近光速的 1%。它也无法理解化学键,不能解释磁场影响下的谱线分裂现象(反常塞曼效应)和斯塔克效应,无法解释为什么处于定态中的电子不发出电磁辐射,无法揭示氢原子光谱的强度和精细结构,对跃迁的过程描写也非常含糊,其中的量子条件是人为附加的,无法从逻辑上加以说明。 [戈革 1982, 页 18、20]。

最重要地是，玻尔使用的是经典概念，如轨道、位置、动量等，这也是他的模型被称为“半经典模型”的原因所在，它有与生俱来的弱点和矛盾。因此，玻尔在获1922年度诺贝尔物理学奖时说：“这一理论还处于很初级的阶段，许多基本问题还有待解决。”

尽管玻尔的理论存在种种困难，但它也有令人不容忽视的优势，而正是这些优势使得人们开始不得不认真对待这个新生儿。

由于能与一系列的实验相吻合，玻尔模型得到“合法地位”。而除了在实验领域的广泛成功之外，玻尔的原子模型在其它方面也有着特殊的贡献。它是第一个量子化的原子模型，第一次让人们确切认识到原子结构与元素周期表和化学性质存在的关系。在1925年之前，它在许多情况下都是用来对原子过程作定量描述的一个基础。1925年，海森伯(W. Heisenberg, 1901-1976)抛弃玻尔所采用的电子轨道、运行周期等经典概念，建立了全新的量子力学，玻尔模型才完成了其历史使命。

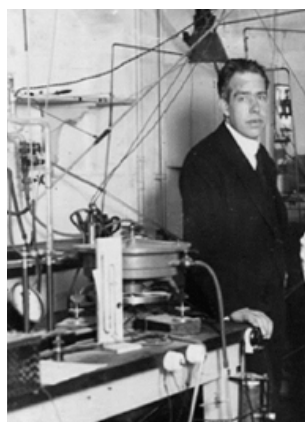


图4. 玻尔1922年在丹麦理论物理研究所

## 七 结语

本文通过对几个关键的问题的梳理，回顾了玻尔提出1913年原子结构的过程。这些问题亦有助于我们回答前面提到的那个问题：玻尔为什么能在1913年做出这样的发现？

我们可以看到，玻尔的发现大概经历了这样一个过程：首先，引起玻尔关注原子结构问题的事件，包括达尔文基于卢瑟福原子模型而提出的关于 $\alpha$ 粒子的散射理论以及玻尔从德海韦西那了解到的关于元素周期表的一些现象，在他的脑海中形成了对于元素周期表的一些新的看法；而后，在他思考原子结构的稳定性及其如何能够解释元素的化学性质时，他早期的信念发挥了作用，即经典力学不适用于原子内部。他希望借助普朗克提出的作用量子来说明原子结构，但明显遇到了障碍。在寻找解决方案的过程中，尼科耳孙的原子模型对他的思路起到了一定的启发作用。尼科耳孙的原子模型在解释原子光谱线上较为成功，这使他对于原

关于玻尔理论收获的一些反应，可见玻尔2012b，页99-105。

子结构能够解释光谱现象有了一定的心理预设。巴耳末公式给了玻尔所寻求的灵感。不过，在巴耳末公式的推导上，他花费了一番功夫。

玻尔能在 1913 年做出这样的发现，首先是他认识到经典力学的局限性，相信其在原子内部将受到一定的限制。这是他在研究金属中电子行为的过程中所打下的基础。这个基本条件一旦缺失，人们便无法跳出经典力学的框架去思索原子结构，那么玻尔的量子化原子结构就无从谈起了。

其次，当时对原子结构的探索并不是物理学家关心的重点，玻尔在这个过程中能洞察先机，也是他能首先做出发现的原因之一。“也许可以并非不公平地说，对当时的一般物理学家来说，关于原子结构的思索就像关于火星上的生命的思索一样——这在喜欢这一类东西的人们看来是有趣的，但是却没有多大希望得到有说服力的科学证据的支持，而且也科学思想及科学发展不怎么相干。”[派斯 2001，页 173] 在玻尔论文迟迟未能完成的时候，卢瑟福也在 1912 年 11 月信里安慰他说：“我认为你不必感到很迫切地要赶快发表你关于原子构造的第二篇论文，因为我并不认为有任何人可能正在做这方面的工作。”[玻尔 2012b，页 406]

再者，在探索原子结构的道路上，玻尔从众多地方获得了灵感。灵感对于科学发现是不可或缺的，但并不是每一个具备类似知识背景的人都有获得灵感的机会。而且，各种灵感在脑海中形成一个合理的物理图景，并非易事。

当然，科学发现不仅仅诉诸于灵感，玻尔的例子还告诉我们，在构造理论的过程中，有时为了保持理论的解释力，理论中的一些瑕疵是可以暂时保留的。玻尔显然知道，按照经典电磁学，电子的稳定性并不存在于他的原子结构中。为了规避这个难题，他直接假设在基态的电子处于稳定状态，却没有给出这种稳定状态的理由。另一方面，经典物理学观念与量子观念在他的理论中并存。这些缺陷并没有成为玻尔的羁绊。海耳布朗很好地总结了玻尔的这种研究方法，一种他称之为“分辨及利用理论的缺陷”的能力，具体来说，就是“他会收集许多缺陷的实例，分别细致审查，保留那些看上去相同的瑕疵。接着，他会发明一个假设来修正这一瑕疵，使得这个有瑕疵的理论，不仅可以解释它不仅它此前有效解释过的经验，还可以解释它或者那个与其相悖的新假设此前无法解释的现象……一个自洽的理论可能因此产生，而无需再借助那个有瑕疵的理论……以此方式工作的人需要的不仅仅是创造力上的天份，还需要能够同时容忍模糊性、不确定性和矛盾性。”[French & Kennedy 1985, p. 34]

诚如爱因斯坦所说的：“作为一位科学思想家，玻尔所以有那么惊人的吸引力，

在于他具有大胆和谨慎这两种品质的难得的融合,很少有谁对隐秘的事物具有这样一种直觉的理解力,同时又兼有这样强有力的批判能力。他不但具有关于细节的全部知识,而且还始终坚定地注视着基本原理。他无疑是我们时代科学领域中最伟大的发现者之一。”[爱因斯坦 2009, 页 23]这也许就是爱因斯坦所说的“思想领域中最高的音乐神韵”。

## 参考文献

- Aaserud, F., Heilbron, J. 2013. *Love, Literature and the Quantum Atom: Niels Bohr's 1913 trilogy revisited*. Oxford: Oxford University Press.
- 爱因斯坦 2009.《爱因斯坦文集》(第一卷).许良英等编译.北京:商务印书馆.
- 玻尔 2012a.《尼耳斯·玻尔集·第1卷·早期著作:1905-1911》.戈革译.上海:华东师范大学出版社.
- 玻尔 2012b.《尼耳斯·玻尔集·第2卷·关于原子物理学的著作:1912-1917》.戈革译.上海:华东师范大学出版社.
- 玻尔 2012c.《尼耳斯·玻尔集·第12卷·通俗化与人(1911-1962)》.戈革译.上海:华东师范大学出版社.
- French, A. P., Kennedy, P. 1985. *Niels Bohr: a centenary volume*. Harvard University Press.
- 戈革 1982.尼耳斯·玻尔和二十世纪物理学.《华东石油学院学报》.(S1).
- 戈革 1984.伟大的三部曲——为纪念 N. 玻尔《论原子构造和分子结构》一文发表七十年而作.华东石油学院学报(物理学史》.(S1).
- 戈革 1985.关于尼耳斯·玻尔思想的几点历史考察.《自然杂志》.(8).
- 戈革 2007.《尼耳斯·玻尔集》译后记.《科学文化评论》.(5).
- 郭奕玲 1990.里德伯常数的历史回顾和新进展.《物理》.19.(1).
- Hameka, H. F. 2004. *Quantum Mechanics: a conceptual approach*. John Wiley & Sons.
- Heilbron, J. L., and Kuhn, T. S. 1969. The Genesis of the Bohr Atom. *Historical Studies in the Physical Sciences*. (1): 211-90.
- Heilbron, J. L., and Kuhn, T. S. 1985. Bohr's First Theories of the Atom. In French 1985.
- 克劳 2009.《量子世代》.洪定国译.长沙:湖南科学技术出版社.
- Kragh, H. 1979. Niels Bohr's Second Atomic Theory. *Historical Studies in the Physical Sciences*. (10).
- Kragh, H. 2010. Before Bohr: theories of atomic structure 1850-1913. *RePoss: Research Publications on Science Studies*. (10).
- Kragh, H. 2011. Resisting the Bohr Atom: the early british opposition. *Physics in Perspective*. 13(1): 4-35.
- Kragh, H. 2012. *Niels Bohr and the Quantum Atom: the Bohr model of atomic structure 1913-1925*. Oxford University Press.
- McCormach, R. 1966. The Atomic Theory of John William Nicholson. *Archive for History of Exact Sciences*. 3(2).
- 派斯 2001.《尼耳斯·玻尔传》.戈革译.北京:商务印书馆.
- Thomson, J. J. 1904. On the Structure of the Atom: an investigation of the stability and



periods of oscillation of a number of Corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure. *Philosophical Magazine*. 7(39).

Trenn, T. J. 1974. The Geiger-Marsden Scattering Results and Rutherford's Atom, July 1912 to July 1913: the shifting significance of scientific evidence. *Isis*. 65.

von Weizsäcker, C. F. 1999. *Große Physiker. Von Aristoteles bis Werner Heisenberg*. Hanser. München.

## “The Highest Form of Musicality of the Sphere of Thought”

In commemoration of the 100<sup>th</sup> anniversary for Niels Bohr's Atom Model

FANG Zaiqing ZHU Huijuan

**Abstract:** This year is the 100th anniversary for Niels Bohr's Atom Model in 1913. This paper, with one purpose of celebrating this event, aims to review this part of history in retrospect. To be specific, this paper outlines the intellectual development of Bohr before 1913 and then elaborates the process with which he constructed the atom model. In the meantime, we try to address following questions: Why did Bohr suddenly turn his interest from the electron theory of metals to atom models? How did he establish the concrete relationship between the structure of atom and spectral lines? In which aspects does his atom model break through the classic physics? Other pertinent questions with the story of Bohr's first atom model are how did scientists deal with the difficulties challenging a recognized theory? and how could people from the periphery enter into the center of academic circle? This paper intends to give preliminary answers to the above questions by reviewing diverse interpretations with regard to the construction of Bohr's atom model.

**Keywords:** Niels Bohr; atom model; Ernst Rutherford; J.J.Thomson