

科学教育丛书

主编：郭永 赵仁

TANSUOYUANZINEIBUDEAOMI

探索原子内部的奥秘



编著：郭永

兵器工业出版社

科学教育丛书

探索原子内部的奥秘

郭 永 编著



兵器工业出版社

内容简介

本书以说明原子核为中心,从电子的发现谈到原子的核式结构;从玻尔的原子模型谈到 X 射线的发现,最后两章分别阐述了核的组成、结构模型、基本粒子的种类、性质等。语言通俗流畅,适合科技人员、哲学社会科学工作者及具有中学以上文化程度的一般读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

探索原子内部的奥秘/郭永编著. —北京:兵器工业出版社,2000.8

(科学教育丛书/郭永,赵仁主编)

ISBN 7-80132-845-0

I. 探… I. 郭… III. 原子物理学—普及读物

N. O562-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 69199 号

出版发行:兵器工业出版社

责任编辑:李翠兰 宁培毅

社 址:100089 北京市海淀区车道沟 10 号

经 销:各地新华书店

印 刷:华北工学院印刷厂印刷

版 次:2000 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

印 数:1—1000 册

封面设计:李 晖

责任校对:郭 永

责任印制:王京华

开 本:850/1168 1/32

印 张:22.75

字 数:582 千字

定 价:36.00 元(全四册)

目 录

导言	(1)
第一章 原子结构的理论	(3)
第一节 电子的发现	(3)
第二节 原子模型的历史演变	(8)
第三节 卢瑟福的核式结构模型	(13)
第二章 玻尔的原子理论	(20)
第一节 玻尔的原子理论	(20)
第二节 斯特恩—盖拉赫实验和电子自旋	(32)
第三章 量子力学简介	(37)
第四章 原子中的电子排布	(41)
第一节 原子结构概况	(41)
第二节 原子内的电子排布	(43)
第三节 元素周期系	(48)
第四节 原子结构和元素的性质	(55)
第五章 X 射线	(62)
第一节 X 射线的发现过程	(62)
第二节 X 射线的产生	(66)
第三节 X 射线在晶体中的衍射	(67)
第六章 原子核	(72)
第一节 核的组成	(72)
第二节 核性质	(76)
第三节 核结构模型	(86)
第四节 原子核的发射性	(106)

第七章 基本粒子·····	(125)
第一节 基本粒子和粒子的相互作用·····	(125)
第二节 中微子·····	(128)
第三节 正电子的发现·····	(137)
第四节 汤川关于介子的预见·····	(144)
第五节 夸克幽灵·····	(158)
第六节 颜色与胶子·····	(161)
参考文献·····	(166)

导 言

古代哲学家对物质的结构有过许多设想,其中,以古希腊物理学家德谟克利特为代表提出了“原子”这一概念,意思是“不可分割”的,即把“原子”当作是物质结构的最小单元。但是,差不多同时代的亚里士多德等人却反对这种观点,他们认为物质是连续的,可以无限地分割下去。但是随着科学技术的发展,建立在科学基础上的原子学说则是近二三百年内才发展起来的。

值得一提的是,我国古代,以战国时期公孙龙为代表,他说过一句名言:“一尺之棰,日取其半,万世不竭。”近几百年的物理学一直在考验这句话的正确性,公孙龙在两千年前的臆想,正在不断地得到现代科学的支持。

物理学发展到 19 世纪 80 年代,积累了大量的实验事实。如:1885 年巴耳末发现了氢光谱线系的规律;1887 年赫兹发现了光电效应;1895 年伦琴发现了 X 射线;1896 年贝克勒耳发现了放射性;1897 年汤姆逊发现了电子;1900 年普朗克进一步研究黑体辐射的实验结果,提出了量子论;1911 年卢瑟福证实了原子的核式结构;在此基础上,1913 年,玻尔发表了著名的“玻尔理论”。此后几年中,原子物理学发展得很快,到 1925 年,一个关于微观体系的新理论——量子力学——建立起来了,这个理论对物理学的进一步发展起了巨大作用。

人们对原子核的研究始于 1911 年,到 1932 年,就已认识到原子核是由质子和中子(统称为核子)组成。与此同时,加速器问世,人们对原子核的研究飞速发展起来了。迄今为止,人们对原子核还不能有一幅全面明确的图画,但先后提出了各种模型,对原子核作近似的描

述。一个模型可能代表原子核的某些性质,但不能说明另外一些性质,把这些模型所表述的一些原子核的情况综合起来,就会获得比较全面的一幅原子核的图画。

1932年,中子被发现后,进一步认识到构成原子核的是质子和中子。这以后,人们把质子、中子和电子认为是物质结构的基本单元,把这些粒子再加上光子,看作是“基本粒子”。但不久在 β 衰变中发现了中微子和阳电子,后来在宇宙射线中又发现了 μ 介子, π 介子、K介子等。到现在,所谓的基本粒子已经那么多,而且进一步证实强子(包括介子和重子)还有内部结构,它们是由更深一层的层子(也叫夸克)构成的。强子的层子结构模型只是根据强子的一些性质进行的理论推断,其研究还在迅速发展。

本书旨在介绍原子的组成、结构,原子核的结构模型和性质,基本粒子的探索等问题,起引路入门之用。想在某方面深入研究的读者,还必须阅读有关方面的专著和文献。

第一章 原子结构理论

第一节 电子的发现

阴极射线是低压气体放电过程中所发生的一种现象。早在 1836 年,法拉第在观察真空放电时,就已记录了观察到的这种现象,其中最著名的是发现了阴极周围的辉光区域和紫色的阳极光柱之间存在黑暗部分,即法拉第暗区。对真空放电进行系统研究是由德国物理学家普吕克尔(Julius Plucker 1801—1868)开始的。1855 年与他一起工作的科学器械制造家盖斯勒(Johann Hendrich Wilhelm Geissler, 1814—1879)根据他的意图制造了水银泵,使放电管的真空度大为提高,从而创造了研究真空放电的良好条件。普吕克尔在实验中看到了正对阴极的玻璃管壁会发出绿色的荧光,可以用磁铁来改变发出荧光的位置。继普吕克尔之后,另一位德国物理学家戈德斯坦(Eugen Goldstein, 1850—1930)对气体放电进行了更细致的研究。他在阴极和发荧光的玻璃壁之间置以各种形状的物体,发现在玻璃壁上出现了该物体的阴影。他还用不同形状、不同大小和不同材料的阴极做了系统实验。他的结论是:从玻璃壁上看到的荧光现象是从阴极发出的一种平行的射线,与阴极的材料无关,它能引起化学反应。1876 年,他把这种射线称之为阴极射线。

阴极射线究竟是什么性质的射线,在早期有两种观点。普吕克尔根据这种射线会引起化学反应这一性质,最早提出阴极射线是一种类似于紫外线的以太波。这一观点后来得到了赫兹等人的支持。赫兹在 1887 年曾发现电磁波,他把阴极射线先看成是电磁辐射,实际上和戈德斯坦的主张是一样的,这样就形成了以太说。赞成以太说的

大多是德国人。

1871年英国物理学家瓦尔利(Cromwell Fleetwood Varley, 1828—1883)从阴极射线在磁场中受到偏转的事实,提出这一射线是由带负电的物质微粒组成的设想。他的主张得到他的同胞克鲁克斯(William Crookes, 1832—1919)和舒斯特(Arthur Schuster, 1851—1934)的赞同。于是在19世纪的后30年,形成了两种对立的观点:德国学派主张以太说,英国学派主张带电微粒说,双方争持不下,谁也说服不了谁。为了找到有利于自己观点的证据,双方都做了许多实验。克鲁克斯证实阴极射线不但能传递能量,还能传递动量。他认为阴极射线是由于残余气体分子撞到阴极,因而带上了负电,形成了“分子流”。以太论者不同意这一说法,用实验予以驳斥。戈德斯坦做了一个很精确的光谱实验,他用了一根特制的L型放电管,将电极安装在管子的两端,可以轮流充当阴极。他的理由是:如果阴极射线是带电分子流,则它发出的光应产生多普勒效应,光的频率应与观察方向有关。可是,不管是哪一端发出阴极射线,谱线的波长都没有改变,这就证明分子流的说法靠不住。以太论者认为这是对以太学说的一个支持。

舒斯特则将带电微粒解释成气体分子自然分解的碎片,带正电的部分被阴极俘获,电极间只留下带负电的部分,因而形成阴极射线。1890年,他根据磁偏转的半径和电极间的电位差估算带电微粒的荷质比,得到的结果在 $5 \times 10^6 \text{C/kg} \sim 1 \times 10^{10} \text{C/kg}$ 之间,与电解所得的氢离子的荷质比 10^6C/kg 相比,数量级相近。

赫兹和他的学生勒纳(Philipp Lenard, 1862—1947)也做了许多实验来证明自己的以太说。赫兹做的真空管中电流分布的实验,“证明”阴极射线的走向与真空管中电流的分布无关。他还在阴极射线管中加上垂直于阴极射线的磁场,却没有看到阴极射线受到任何偏转。这两个实验不成功的原因是因为当时不了解低压状态下气体导电机理的复杂性。

遗憾的是,赫兹以此作为阴极射线不带电的证据,更加坚持以太说。他的另一实验则是成功的。1891年,赫兹注意到阴极射线可以像透过透明物质一样穿透某些金属薄片。1894年,勒纳发表了更精细的结果,他在阴极射线管的末端嵌上厚度为 $2.65\mu\text{m}$ 的铝箔作为窗口,发现从铝箔窗口会逸出射线,在空气中穿越约 1cm 的行程。他们认为这又是以太说的一个有力证据,因为只有波才能穿越实物。

微粒说者也不示弱。1895年法国物理学家佩兰(Jean Baptiste Perrin, 1870—1942)将圆桶电极装在阴极射线管中用静电计测圆桶接收到的电荷,结果确定是负电。他坚持带电微粒说,发表论文表示了自己的观点。但是他的实验无法作出判决性的结论。因为反对者会反驳说:佩兰测到的不一定是阴极射线带的电荷。

对阴极射线的本性作出正确答案的是英国剑桥大学卡文迪许实验室教授汤姆逊。他从1890年起,就带领自己的学生研究阴极射线。克鲁克斯和舒斯特的思想对他很有影响,他认为带电微粒说符合实际,决心用实验进行周密考察,以取得确凿的证据。为此,他进行了以下几方面的实验:

(1) 直接测阴极射线

携带的电荷。汤姆逊将佩兰实验作了一些改进,他把联到静电计的电荷接收器(法拉第桶)安装在真空管的一侧,如图1.1。平时没有电荷

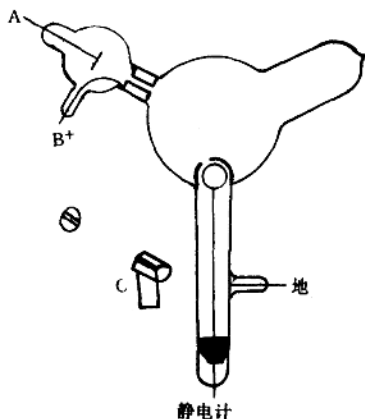


图 1.1 汤姆逊实验之一

A—阴极, B—阳极, C—金属插塞

进入接收器。用磁场使射线偏转,当磁场达到一定大小时,接收器接收到的电荷猛增,说明电荷确实来自阴极射线;

(2)使阴极射线受静电场偏转。汤姆逊重复了赫兹的静电场偏转实验,起初也得不到任何偏转。后来经仔细观察,注意到在刚加上电压的瞬间,射线束轻微地晃动了一下。他马上领悟到,这是由于残余气体分子在电场作用下发生了电离,正负离子把电极上的电压抵消掉了,显然是由于真空度不够高的原因。于是,他在实验室技师的协助下努力改善真空条件,并减小极间电压,终于获得了稳定的静电偏转。这样,汤姆逊就获得了驳斥以太说的重要证据;

(3)用不同的方法测阴极射线的荷质比。在图 1.2 的管子两侧,各加一个通电线圈,使阴极射线在磁场中偏转。然后根据电场和磁场分别造成的偏转,计算出阴极射线的荷质比 e/m 和速度。

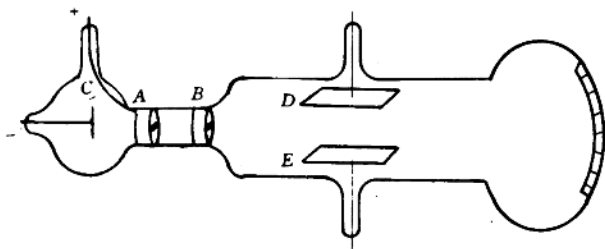


图 1.2 汤姆逊的阴极射线管

另一种方法是测量阳极的温升。因为阴极射线撞击到阳极,会引起阳极的温度升高。汤姆逊把热电偶接到阳极,测量它的温度变化。根据温升和阳极的热容量可以计算出离子的动能,再从阴极射线在磁场中偏转的曲率半径,推算出阴极射线的荷质比和速度。

两种不同的方法得到的结果相近,荷质比都是 $e/m \approx 10 \times 10^{10}$ C/kg;

(4)证明电子存在的普遍性。汤姆逊还用不同的阴极和不同的气

体做实验,结果荷质比也都是同一个数量级,证明各种条件下得到的都是同样的带电微粒,与电极材料和气体成分无关。

1897年4月30日,汤姆逊向英国皇家研究所报告了自己的工作,随即又以《阴极射线》为题发表了论文。他写道:“阴极射线的载荷子比起电解的氢离子的值小的多。小的原因可能是小,也可能是大,或两者兼而有之。我想,阴极射线的载荷子要比普通分子小,这可从勒纳的结果看出。”

这里指的就是勒纳的薄窗实验,只有把阴极射线的载荷子看成比普通分子小的多,才能作出解释。

接着,汤姆逊和他的学生们用多种方法单独测他所谓的“载荷子”的电量,证明果然和氢离子的电荷一样。1899年,汤姆逊采用斯托尼(George Johnstone Stoney, 1826—1911)的“电子”一词来表示他的“载荷子”。“电子”原来是斯托尼在1891年用于表示电的自然单位的。

就这样,电子被发现了。但是,汤姆逊并不以此为满足,他进一步研究了许多和电子有关的新发现,如光电效应,热电子发射等,以证明电子存在的普遍性。

光电效应是1887年赫兹发现的,但时隔10几年,光电流的本质仍未搞清。1899年,汤姆逊用一巧妙的实验方法,利用磁场使光电流偏折,测出使光电流减小到零的磁场强度,然后根据电压、极间距离和磁场大小计算出荷质比值。他得到的结果跟阴极射线相近,证明光电流也是由电子组成的。

热电发射效应是1884年爱迪生(Thomas Alva Edison, 1847—1931)发现的。爱迪生当时正在研究白炽灯泡,发现灯泡里的白炽碳丝加热后有负电逸出。1899年汤姆逊同样用磁场截止法测其荷质比,证明这一负电荷也是由电子组成。不久,贝克勒尔用磁场和电场偏转法测到了射线的荷质比和速度,证明射线是高速电子流。

汤姆逊以大量实验事实和数据资料证明,不论是阴极射线、 β 射

线,还是光电流,都是由电子组成;不论是由于强电场的离解、正离子的轰击、紫外光的照射、金属受灼热,还是放射性物质的自发辐射,都发射出同样的带电粒子——电子。这种带电粒子的质量不到原子的千分之一。由此可见,电子是原子的组成部分,是物质的更基本的单元。这是一个非常重要的结果,因为它打破了原子不可分的传统观念。

第二节 原子模型的历史演变

电子的发现,证明原子内含有确定数目的电子,而光谱的发射似乎与电子的行为有密切关系。这个问题的澄清有极为重要的意义。在这以前,人们对原子的内部状态一无所知,只能把原子看成是一个不可分的整体,顶多假设它是一个谐振子在作机械运动或是一个赫兹振子在作电磁振荡。从这些假设出发,虽然也可进行数学计算,但对物质结构的了解,却无济于事。而在发现电子、确证原子可分之后,才有可能真正建立原子结构的模型,探索原子结构的理论,从而对光谱的发射和其他原子现象作正确的解释。

所谓原子结构模型(以下我们简称为原子模型),实际上也就是针对下列问题给出答案:

原子内部有带负电的电子,但原子是中性的,所以必定还有带正电的部分,这些正电荷具有什么性质?是如何分布的?正、负电荷之间如何相互作用?原子内究竟有多少电子?电子的数目如何确定?如何才能保持原子的稳定状态?如何解释元素的周期性?如何解释线光谱?如何解释放射性?等等。

面对这些问题,物理学家们根据自己的实践和见解从不同角度提出各种不同的模型。经过实践的检验,有的成功,有的失败。下面选取一些有代表性例子来说明原子模型的历史演变。

一、长岗的土星模型

长岗半太郎是日本东京大学教授,1903年他根据麦克斯韦的土星卫环理论推测了原子的结构,他的论文题目是:《用粒子系统的运动学阐明线光谱、带光谱和放射性》,发表于1904年《哲学杂志》。在论文中,长岗写道:“我要讨论的系统,是由很多质量相同的质点,联接成圆,间隔角度相等,互相间以与距离成平方反比的力相互排斥。在圆中心有一大质量的质点对其他质点以同样定律的力吸引。如果这些相互排斥的质点以几乎相同的速度绕吸引中心旋转,只要吸引力足够大,即使有小的干扰,这个系统一般将保持稳定。”

然后,长岗仿照麦克斯韦的理论计算,说明电子运动和光谱的关系。

虽然长岗的理论很不完善,但他实际上已经提出了原子核的观念,为后来卢瑟福的有核模型开辟了道路。

其实,核的观念并不是长岗首先提出来的。在他之前,斯坦尼讨论过这种可能性。1901年佩兰(Perrin)在论文中也曾假设过类似的模型,即原子有正核,外面围绕着负电子,电子沿轨道运行的频率是辐射的光谱频率。还有,洛奇也曾指出,麦克斯韦的土星系也许适用于电子系统。可见,原子的有核模型由来已久,只是未获充分的证据而已。然而,它的致命弱点是无法满足经典理论提出的稳定性要求,所以长岗的论文发表不久,就有人撰文驳斥。

二、勒纳德的中性微粒模型

1920年勒纳德已经接受了阴极射线是电子束的结论。这时他对赫兹和他自己发现的阴极射线穿透金属的现象作出新的解释。他认为这件事说明金属中的原子并非实心的弹性球,其中必有大量的空隙。他假设原子内的电子和相应的正电荷组成中性微粒,取名为“动力子”,无数动力子浮游在原子内部的空间。他的模型未获实验证实,因此影响不大。

三、里兹的磁原子模型

1908年里兹提出原子光谱的组合原理,同时也指出:从已知光

谱规律来看,这些规律仅仅涉及频率,而不涉及,可见电子所受作用力不是与其位移成正比,而是与其速度成正比。根据电磁理论,这种情况正好与电荷在电磁场中运动的情况相当。由此而来他提出一个假说,光谱线的频率决定于磁场作用力。

里兹进一步假设磁场是由分子磁棒产生的,磁分子的磁极强度为,磁极距离为,电荷处于沿磁棒轴线上最近的磁极为的某一点上,该点磁场为:

$$H = \mu \left[\frac{1}{r^2} - \frac{1}{(r+l)^2} \right]$$

在磁场作用下,电荷将在磁场垂直的平面内作螺旋运动,频率为 $eH/2\pi mc$ (c 为光速) 即:

$$\nu = \frac{eH}{2\pi mc} = \frac{\mu e}{2\pi mc} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{1}{(r+l)^2} \right]$$

这个方程与氢光谱的巴尔末公式完全对称。巴尔末公式为:

$$\nu = R \left[\frac{1}{a^2} - \frac{1}{(a+n)^2} \right]$$

里兹根据电磁理论,进一步推测分子磁棒是由圆柱性的电子沿轴旋转(有趣的是,他比乌伦贝克和高斯密特的自旋电子概念还早 17 年!)。里兹还推导出光谱的一些性质,与实验结果很符合。

四、哈斯将量子假说运用于原子模型的尝试

哈斯是奥地利的一位年轻物理学家,他在研究黑体辐射时很早就注意到了量子论。他读过汤姆逊专门讨论原子结构的书《电与物质》和维恩的文章。维恩在文章中提到:能量元也许“可以从原子性质中推导出来。”这些论著促使哈斯运用量子公式来阐明原子结构。

哈斯的论文发表于 1910 年。他在汤姆逊模型的基础上,设想电子在原子内部以振荡频率 ν 旋转,运用普通力学公式计算原子的能量。设原子的半径为 a , 电子的轨道半径为 r , 则电子受力为 $e^2 r/a^3$, 动能为 $e^2 r^2/2a^3$ 。他又大胆地作个近似,取 $r=a$, 则电子动能为 $e^2/2a$, 位能等于动能,所以总能量为 e^2/a 。

再从作用力求频率。设电子作简谐运动,则受力应为 $m \cdot 4\pi^2\nu^2 r$, 而

$$m \cdot 4\pi^2\nu^2 r = e^2 r / a^3,$$

所以

$$\nu = \frac{e}{2a\pi(am)^{1/2}} = \left[\frac{e}{4a^3\pi^2} \left(\frac{e}{m} \right) \right]^{1/2}$$

哈斯将 $a, e, \frac{e}{m}$ 和 h 的实验值代入上式,得 $\frac{e^2}{a}$ 与 $h\nu$ 的比值在 0.70~1.92 之间。于是,他得出近似结果,认为 $h\nu$ 与原子的总能量大概相等。

$$\text{再令 } h\nu = \frac{e^2}{a}, \text{ 得: } h = \frac{\frac{e^2}{a}}{\frac{e}{2a\pi(am)^{1/2}}}$$

所以

$$h = 2\pi e \sqrt{a \cdot m}$$

这个结果虽然十分粗略,但却是将量子假说运用于原子结构的最初尝试。

哈斯的文章受到了洛伦兹的注意,后来,洛伦兹曾把哈斯的工作介绍到 1911 年的第一届索尔威会议上,引起了与会者的兴趣,大家对这个问题的还进行了一番讨论。

五、尼科尔松的量子化原子模型

尼科尔松是英国颇有名气的数学和天文物理学家,擅长于星光光谱和日冕光谱的研究。于 1911~1912 年间,他发表了一系列关于天体光谱的论文,其中也讨论到原子模型。他认为恒星和太阳这样高温的物体,原子应具有特殊的状态,这时电子的能量会高到电子环的半径大于原子的半径。他认为对应这种状态时卢瑟福的有核模型和汤姆逊的实心带电球模型可看成是一致的。他假设天体中除了氢和氦以外,还有两种最简单的元素,它们的原子分别具有 $4e$ 和 $5e$ 的电子。这些电子组成环。他从力学原理计算系统的能量,发现能量与振动频率之间有一确定的比值,这使他想到可以把原子看成普朗克振子。他说:“由于这一类原子系统的能量的可变部分与 $mna^2\omega^2$ 成正比

(其中 m 是电子质量, n 是电子数, a 是电子半径, ω 是振动角频率), $E/\text{频率} = mna^2\omega^2$ 或 $mnav$ 即等于电子绕核旋转的总角动量。所以, 如果普朗克常数, 像索末菲所主张的那样, 有原子意义, 也就意味着当电子离开或返回时, 原子的角动量只能以一分立值来增减”。

这正是玻尔后来在原子理论中得到的一条重要结论, 玻尔在第一篇论文中还特地提到尼科尔松。

不过, 尼科尔松只是照搬普朗克的振子概念, 认为辐射的光频率就是振子的振动频率, 也就是说, 原子以什么频率振动, 就以什么频率发射, 于是不得不对光谱系的分立值武断地解释为: “一个谱系的各条谱线也许不是由同一个原子发出, ……而是由不同的原子, 其内在的角动量由于辐射或其它原因受到阻滞, 因此与标准值相差某些分立值。例如, 氢原子就可能有好几类, 这几类的化学性质甚至质量都相等, 只是内部运动不同而已。”

他这样解释分立的线光谱, 当然不可能成功。

六、汤姆逊的原子模型

无核模型。最早提出这种观点的是赫姆霍兹。他原来认为原子是以太中的旋涡, 汤姆逊发现电子以后, 他放弃了以太旋涡的看法, 提出了一种原子由带正电荷的均匀球体组成, 而负电荷则以一颗颗电子的形式分布在球内的粗糙想法。1903年, 汤姆逊在此基础上发展成著名的“葡萄干布丁”模型: 原子的正电荷像一块蛋糕, 电子则像一颗颗葡萄干嵌在里面。汤姆逊试图用电子的数目变化去解释元素周期表。为了得到稳定的原子, 他设想在正电荷环境中的电子, 就像在外磁场中一根浮置着的平行磁体一样, 并且可以在平衡位置迅速振动。通过研究, 还得到了一些可能与元素周期表相对应的电子“壳层”结构。汤姆逊还试图将电子的振动和原子的光谱联系起来, 但没有获得成功。在今天看来, 汤姆逊的原子模型虽然是错误的, 但他那些认真的研究无疑给后人带来不少有益的启示。

以上列举了几例在玻尔之前的原子模型, 这些模型虽然都失败