

19—20 世纪之交电磁学的发展和影响 (I)*

宋佰谦

(广西社会科学院数量经济研究所 南宁 530022)

摘要 主要围绕电磁学的“两论两发现”讨论了上一世纪之交电磁学的发展和影响。“两论”是指洛伦兹电子论和爱因斯坦相对论电磁学,“两发现”是指 X 射线的发现和电子的发现。第一部分着重分析了洛伦兹电子论如何从综合超距电动力学和“无源”电磁场理论中产生的历史背景及其地位、作用和历史局限。第二部分重点讨论了爱因斯坦对经典电磁学的革命性变革、光量子假说、相对论电磁学和质能关系的意义及影响。第三和第四部分,则主要讨论 X 射线和电子的发现,及其发现后的电磁学的一些重要实验和电子论对一些重要电磁学问题的解释,强调了波粒二象性论争及其积极作用,并阐述了电子论对物质磁性的经典分析。文章的时间范围主要是从洛伦兹电子论到量子力学诞生之前的二三十年,尚未涉及量子电动力学的内容。

关键词 洛伦兹电子论,爱因斯坦相对论电磁学,X 射线,电子,波粒二象性,物质磁性

ON THE DEVELOPMENT AND INFLUENCE OF ELECTROMAGNETISM AT THE BEGINNING OF THE 20th CENTURY

SONG Bai Qian

(The Econometrics Institute of the Academy of Social Sciences of Guangxi, Nanning 530022, China)

Abstract The development and impact of electromagnetism at the beginning of the 20th century are discussed from the angle of the “two theories and two discoveries”. The “two theories” refer to the electron theory of Lorentz and the electromagnetism theory of Einstein’s relativity, the so-called “two discoveries” are the discovery of the electron and the discovery of X-rays. The background, historical role and limitations of Lorentz’ electron theory are first analyzed. Einstein’s revolutionary reform of classical electromagnetism is then discussed as well as several issues explained by electron theory. Some important experiments following the discovery of electron, and X-rays are also mentioned.

Key words electron theory of Lorentz, electromagnetism of Einstein’s relativity, electron, X-ray, wave-particle duality, material magnetism

电磁学是 1820 年丹麦物理学家奥斯特(H. C. Oersted)发现电流磁效应后诞生的,是一门相对年轻的科学。在经过超距电动力学和法拉第-麦克斯韦电磁场理论前后两个稍有重叠的发展阶段后,在 19 世纪末产生了洛伦兹电子论。20 世纪初,爱因斯坦(A. Einstein)对麦克斯韦-赫兹-洛伦兹电磁学进行革命性变革,将力学粒子概念引进电磁学,提出光量子假说,并将相对论力学引进电磁场理论,铲除了长期强加给物理学的人为参考框架——以太,为现代电磁学发展铺平了道路。在电磁学实验方面,19 世纪末的三大实验发现(X 射线、电子和放射性)中就有两项属于电磁学,即 X 射线和电子的发现。这

两个重要发现的科学影响可以概括为:促进了电子论对物质的深层次研究,并使得电磁学变成一门高度交叉的科学。

1 洛伦兹电子论的产生:背景及影响

洛伦兹电子论始创于 1892 年,成形于 1904 年,是荷兰物理学家洛伦兹(H. A. Lorentz)科学综合超距电动力学和法拉第-麦克斯韦-赫兹“无源”电磁场理论的产物。为了深刻了解洛伦兹电子论的历史

* 2000-06-09 收到初稿,2000-07-14 修回

意义,先让我们对该理论产生前的电磁学作一综述.

1.1 对洛伦兹以前的电磁学的综述^[1-4]

超距电动力学系由法国物理学家安培(A. M. Ampere)在1827年始创,由毕奥(J. B. Biot)、萨伐尔(F. Savart)和德国物理学家韦伯(W. Weber)等人补充而形成的.超距电动力学把牛顿的超距力学框架演绎到电磁学,规定电磁相互作用在真空沿直线传递,无需占用时间,且必须有两个电磁源同时出现.由于这个理论符合拉普拉斯将一切物理现象简约到粒子层次进行分析的简约纲领要求,在数学上具有较强的美学特征,它对电磁学发展产生过很大的影响.除了这个以电磁力为研究对象的电动力学外,还有一个以电磁势(矢势)和标势为研究对象的超距电动力学分支,德国物理学家诺埃曼(F. E. Neumann)和克劳修斯(K. Clausius)是这一分支的创始人.他们都忽视空间的物理性质,把它当作纯粹的几何空间.如果说超距势理论相对于超距力理论有所进步的话,那就是这一分支的克希霍夫(G. R. Kirchhoff)在研究环路时对标势和矢势的传递时间作了必要的考虑,黎曼(G. F. B. Riemann)和丹麦的洛伦茨(L. Lorenz)还提出了推迟势的概念.

法拉第(M. Faraday)到来后,人们逐步看到电磁世界还有另一面.法拉第在1831年发现电磁感应定律,1837—1838年间对静电学的研究和1846—1847年间对物质磁性的研究,采取了完全不同于超距电动力学的方法,不是从质点状的电磁源而是从空间的力即场的方面出发去把握电磁现象.他提出空间存在一种“电致紧张态”(electrotonic state),布满着磁力线,电磁作用通过“电致紧张态”变化而产生,通过磁力线来传递.他取消了“空虚”空间,恢复了空间的物理性质,使物理空间成为电磁学认识世界的第一实在.从1855年起,麦克斯韦(J. C. Maxwell)致力于用数学总结法拉第电磁学,发展起法拉第-麦克斯韦电磁场理论,即“无源”电磁场论.他突破了超距论者认为电流只能存在于金属导体中的局限,指出无论在有重介质中还是在无重介质——以太中,都可以产生一种电流——位移电流;他宣布法拉第的“电致紧张态”就是电磁场动量,它对时间的一阶微商等于电场强度.他预言存在电磁波,电磁波就是光波,并预言了光压.位移电流是维系电磁空间场力的重要一环,它是否存在关系着麦克斯韦的光的电磁理论是否成立.1876年,美国物理学家罗兰(R. A. Rowland)通过电场中的介质旋转实验证明存在位移电流.据此,亥姆霍兹(H. von

Helmholtz)在1879年以柏林科学院奖悬奖证明电磁力与介质极化的一般关系.他的学生赫兹(H. Hertz)不负重望,在1888年超出悬奖要求,不仅通过实验发现了电磁波,而且通过实验证明了电磁波与光波的同源性.此举把麦克斯韦电磁场论推到了至高无上的地位,以致一时间连这个理论的缺陷也被掩盖了.

1.2 把经典电磁学推到最后高度的洛伦兹电子论

麦克斯韦电磁场论的主要缺陷:一是如同其他电动力学一样,仍把以太作为绝对参考系;二是缺乏必要的力学粒子概念,麦克斯韦电磁场方程组中的强度量(E 和 H)与通量(D 和 B)均是状态量,如同热力学的压力、体积和温度那样,难以表示成电磁作用元的函数,因而必然解释不了光是从哪里产生的和光的色散等问题,甚至出现介质的折射率是波长的函数而极化率又与波长无关的矛盾;三是由于缺乏对电粒子的考虑,它必然要求电磁波连续通过不同介质的界面,因而解释不了光的折射和反射.

鉴于此种情况,洛伦兹决心在麦克斯韦场论基础上纳入超距电动力学的积极内容,对两大理论体系进行一次综合.他按照亥姆霍兹关于分离以太与有重物质的做法,规定以太只是场的载体,而极化只能在介质中产生,结果发现在介质的界面上电场和磁场强度(E 和 H)只有切线分量是连续的,而磁感应强度 B 和电位移 D 只有法线分量的连续.在此基础上,他推导出菲涅耳的光的折射和反射定律.根据同一做法,他又把麦克斯韦的电位移矢量 D 区分为只在真空中存在的电场强度 E 和发生在介质内部的极化强度 P 两部分,得到 $D = E + 4\pi P$.介质的极化是介质中的电粒子受到电磁场照射发生位移而产生的,而电粒子的反复振动又会产生光.这样,洛伦兹既解释了电磁波即光的来源,又解释了光的色散问题,并建立起介质折射率和极化率与介质中可以发生振动的电粒子数及入射光频率之间的定量关系.就这样,洛伦兹电子论从分离以太和有重物质的过程中萌发出来了.

1892年,洛伦兹发表了“麦克斯韦电磁学理论及其对运动物体的应用”,提出了电子论^[5].他列出了5个方程,其中4个是经过赫兹简化的麦克斯韦方程,即现在教科书上所列的麦克斯韦方程组,另一个是他的独创,即后来所说的洛伦兹公式:

$$F = eE + (e/c)(V \times H),$$

式中 e 和 c 分别表示电子电量和光速, V 是电子在磁场中运动的速度, E 和 H 分别表示电场和磁场强

物理

度, F 是电子所受的力, 即洛伦兹力. 他之所以要加入这个方程, 是因为他认为虽然赫兹简化麦克斯韦方程时将其静电势消除是合理的, 但简化后更显得电磁场是一个“无源”场, 连电子的蛛丝马迹也没有了. 值得说明的是, 洛伦兹公式中电子的电量, 一是指自由电子的电量, 由它产生的电流是“对流电流”, 二是指介质中或金属中的电子电量. 就前一情况来看, 洛伦兹公式反映出这样一层关系: 以太与物质间的电磁联系是通过电子的运动来实现的. 但是, 二者的力学联系则是不可能的, 因为在洛伦兹理论中无重物质与有重物质仍然是相互独立的. 另外, 洛伦兹电子论中的场强或力与电粒子的运动速度有关, 虽然这是对超距力或超距势理论的突破, 但由于电子的速度是以以太为绝对参照系的, 这就不可能彻底铲除经典电磁学理论的踪迹. 看来洛伦兹只能解决麦克斯韦遗留的上述三个问题中的后面两个, 第一个问题却留给了后人, 他就是爱因斯坦.

1896 年, 荷兰物理学家塞曼 (P. Zeeman) 发现在强磁场中钠火焰的 D 光谱线变宽. 第二年春, 洛伦兹与他共同研究时发现增宽的谱线实为三条较细的谱线. 他们因这项研究获得了 1902 年诺贝尔物理学奖. 1897 年, 爱尔兰物理学家拉莫尔 (J. Larmor) 运用洛伦兹公式分析塞曼效应, 建立起电子位移对时间的二阶微分方程, 求解后得到电子振动的三个圆频率. 拉莫尔认为, 这是电子在磁场作用下其振动频率一分为三的结果, 一个是在磁场方向的振动频率, 另外两个是绕磁场方向的转动频率, 是上述振动频率加上 $\pm eH/2mc$, 正负号视电子旋转方向而定^[6]. 所叠加的频率因子后来被称为拉莫尔进动频率. 可见, 洛伦兹电子论首先在光谱结构分析方面得到应用. 另外, 建立在洛伦兹电子论基础上的“塞曼公式”, 第一次给出了电子荷质比与电子受磁力而发生振动的周期和受迫周期的关系, 为后人测定电子荷质比及电量提供了理论工具.

洛伦兹是跨世纪的人, 他的电子论也是跨世纪的理论. 进入 20 世纪后, 他不断受到新思想的挑战, 他总是勇敢地迎上去, 但因他未能彻底超出自牛顿以来形成的结构性理论的框架, 结果往往陷入难以解脱的困境^[7].

2 爱因斯坦对经典电磁学理论的革命性突破

爱因斯坦改造经典电磁学是从麦克斯韦 - 赫兹

- 洛伦兹电磁学理论入手的, 他的目标是统一电磁学理论和力学理论, 实现对物理世界的统一解释^[8], 而他所提出的光量子假说、狭义相对论和质能关系, 标志着他成功地迈出了第一步. 这三项发现都出现在 1905 年.

2.1 提出光量子假说

按照洛伦兹电子论, 电磁场的能量来源于电子的振动, 因此, 场空间的整个电磁能应当等于所有电粒子产生的能量. 然而, 当爱因斯坦将普朗克 (M. Planck) 黑体辐射公式用于一个包含有电振子的空腔时, 他发现辐射能无限大而电振子却是有限的矛盾. 普朗克早在 1896—1899 年用热力学方法和电磁场理论研究具有电振子的空腔的黑体辐射时, 曾经得到与维恩辐射定律相似的辐射公式, 但这个公式只能解释短波长的辐射, 一旦用于波长较长的情况, 就出现与经验观察不相符合的结果. 不得已他从 1899 年末转向了玻尔兹曼统计力学, 借助于分子的微观分布规律提出了现在所说的普朗克黑体辐射理论, 克服了维恩不能统一解释各种波长辐射的困难. 成功的一环是他提出了“量子” (quanta) 概念, 指出辐射能量是按某些量子进行不连续分布的. 尽管普朗克借助了分子统计力学的方法, 尽管他已经形成量子的概念, 但他的量子也仅仅是一种广延于连续空间的能量不连续分布而已, 他没能发现辐射能量在空间分布的不连续性. 即是说, 这种量子并不是严格意义上的“粒子”性能量子. 爱因斯坦在 1905 年研究辐射现象时发现了普朗克黑体辐射理论的这一问题, 并把这一问题归因于粒子理论 (电子论) 和场论 (辐射场或电磁场理论) 的矛盾. 普朗克建立他的理论同时使用过电磁学、热力学和统计力学, 但爱因斯坦认为问题不在于热力学和统计力学, 而在于电磁学. 因为麦克斯韦电磁场理论规定电磁能是连续地、无限地占有整个空间, 而按照电子论电粒子的数目又是有限的, 这样必然导致上述矛盾. 他设想, “如果用光的能量在空间不是连续分布的这种假说来解释, 似乎就能更好理解.”¹⁾ 就是说, 电磁能在微观层次上不应当表示成连续空间的函数, 而应当以相互独立的能量包存在于电磁空间. 根据这一设想他提出了光量子假说, 并由热力学和统计力学类比推出^[9]:

$$\log W = (E/h\nu) \log(V'/V) = n \log(V'/V),$$

1) 引自《爱因斯坦文集》第二卷, 范岱年、赵中立、许良英译, 商务印书馆出版, 1977 年, 第 38 页

式中 w 表示辐射体积 V 中的能量收拢于子体积 V' 的几率, n 表示可以独立存在的能量点即光量子的数目, h 是普朗克常数, ν 是辐射光频率. 从这一式子便得到 $E = nh\nu$.

他于 1905 年发表在《德国物理学杂志》上的“关于光的产生和转化的一个启发性观点”一文中提出了光量子假说及理论计算^[10,11]. 他在这篇论文中还用光量子假说解释了勒纳 (P. Lenard) 在 1902 年用紫外线照射阴极射线管阴极产生电子发射的问题 (即光的强度影响电子发射数目而不影响电子速度), 给出了光电效应发生时的能量与照射光频率的关系, 得到电子发射的动能公式:

$$E = h\nu - \phi,$$

式中 E 和 ϕ 分别表示受能量为 $h\nu$ 的一个光量子照射而发出的一个电子的动能和这个电子逃逸金属表面时所消耗的功.

2.2 把相对论力学带进电磁学

如果说爱因斯坦在提出光量子假说过程中把力学中的粒子概念带进了光学的话, 那么他在创立狭义相对论时就把相对论力学带进了电磁学. 他认为, 经典力学和经典电磁学把本来就是统一的物质世界分成了有重物质和无重物质两个世界, 而且这两门学问又是如此不一致, 以至电磁学借助于力学方法建立的理论往往与现象有较大的出入. 例如, 在考察导体与磁体相对运动时, 按照麦克斯韦电磁场理论就出现了不对称: 当磁体运动而导体静止时, 在磁体附近出现具有能量的电场; 如果导体运动而磁体静止, 在磁体附近则不出现电场, 虽然在这两种情况下导体内都能产生感生电动势 (法拉第电磁感应定律). 他指出这是由于人为选择以太作为绝对参考系造成的, 而以太是完全不存在的.

事实上, 早在 1887 年迈克耳孙 (A. A. Michelson) 和莫雷 (E. W. Morley) 在做地球相对以太运动的“以太风”二级效应光干涉实验时, 未能观测到干涉条纹的移动, 这已表明以太是不存在的^[12]. 可是, 洛伦兹不这样认为. 他在 1895 年提出长度收缩假说和地方时的概念, 继而在 1899 年提出对应态定理, 结合他的长度收缩因子和伽利略变换形成了以以太为绝对参考系的变换 (彭加勒称之为“洛伦兹变换”, 直到现在人们一直这样称谓). 他用这个坐标变换和对应态定理来解释迈克耳孙 - 莫雷实验的否定结果. 按照他的理论, 静止在以太中的长度最长, 电子是圆的, 时钟走的最快; 而一旦相对以太运动起来, 长度会缩短, 电子被压成椭圆形, 时钟会变慢. 他指

出这正是迈克耳孙 - 莫雷实验中干涉条纹没有位移的原因. 这样一来, 似乎以太又是存在的了.

1905 年 9 月, 爱因斯坦在《德国物理学杂志》上发表了“论动体的电动力学”^[13], 首次提出狭义相对论. 他从定义时间的同时性、废除牛顿的绝对时间出发, 径直提出两个公设: 一是运动的相对性公设, 是指所有物理定律对于一切惯性系都是不变的, 意指不可能观察到绝对运动, 这一公设实际上否定了以太. 二是光速不变公设, 是指不论从哪个坐标系下观察, 光速都是一样的. 在此基础上, 他提出了一个在形式上与洛伦兹变换相同的坐标变换 (亦称为“洛伦兹变换”, 他不知道洛伦兹已经做了这项工作). 不过, 爱因斯坦的变换与洛伦兹的变换在本质上不同, 他的变换无须以以太作为基准, 因此是可倒易的; 洛伦兹的变换则必须以以太为基本参考物, 因而是不可倒易的. 爱因斯坦在将他的坐标变换运用于麦克斯韦 - 赫兹电磁场方程组中的两个旋度方程时发现, 无论它们处于哪个惯性坐标系, 形式都是相同的, 由此证明不存在导体与磁体相对运动时产生的不对称现象.

按照经典运动学, 如果一个物体相对于坐标系 K 以速度 ω 做匀速运动, 而 K 又相对于另一个坐标系 K' 做速度为 μ 的匀速运动, 那么这个物体相对 K' 的速度是 $\omega + \mu$. 而按爱因斯坦相对论, 速度合成应是:

$$U = (\omega + \mu) / [1 + (\omega\mu/c^2)],$$

式中 c 为光速. 爱因斯坦由此得到结论: “两个小于 c (光速, 爱因斯坦用 v) 的速度合成而得到的速度总是小于 c ”, 可见光速是一切物体运动速度的极限.

爱因斯坦用相对论解释了光行差和多普勒效应, 分析了缓慢加速的电子 (即不产生辐射的电子) 的动力学, 发现了三条定律: 第一个定律是说在电磁场中运动的电子的速度与光速的比值, 等于电子所受的磁偏力与电偏力的比值; 第二个定律揭示了电子加速运动中所经历的电势差与电子速度的关系; 第三个定律给出了磁力作用下的电子曲率半径的计算公式. 这些定律对于电子的精确测定具有重要价值, 后来被 J.J. 汤姆孙等人反复利用.

2.3 质能当量关系的发现

大家知道, 电磁场也是一种物质, 人们称之为“无重”物质 (又经常称为“无质”物质). 既然电磁场这种“无重”物质总是要与电子这样一类有重物质一同存在 (反映为场空间的总能量等于所有运动电子

的能量),并相互作用,那么场空间的能量必定如同物质粒子那样具有惯性和动量,亦即电磁场能量应当具有惯性质量.何以见得场也是一种具惯性的物质呢?这就是爱因斯坦完成相对论论文后要解决的问题.为此,爱因斯坦于1905年在《德国物理学杂志》上发表了“物体惯性同它的所含的能量有关吗?”一文.他证明,一个静止在 K 系中的光源发射辐射所损失的动能 ΔE ,相对于另一个惯性系数 K' 而言等于 $Lv^2/2c^2$,其中 L 是辐射损失的能量, v 是 K 系相对于 K' 系的速度.他认为,电磁场能量的损失正如一个质量为 m 的物体的动能的损失, $\Delta E_k = \Delta[(1/2)(mv^2)]$.由此得到: $\Delta E_k = \Delta mc^2$.

1907年,爱因斯坦在将动能损失与质量的关系推进到物质的全部“潜能”与惯性质量的方面时,发现了质能定律^[14]:

$$E = mc^2,$$

这里的 E 是能量.他建议用镭的放射衰变过程来证明这一关系.有意思的是,在爱因斯坦质能定律发现前,放射性研究也曾经历过类似过程.那就是在 α 射线和 β 射线在1898年被发现后好几年中,这两种能量物质仅被当作某种电磁波辐射产生的射线,只是经过卢瑟福(E. Rutherford)等人反复用电场和磁场偏转这两种射线,并分别测量出它们的质荷比后,它们才在1902年被最后确定为带电的、有能量的物质粒子,才被赋与了 α 粒子和 β 粒子的名称.这是一个为物质粒子“正名”的过程.而爱因斯坦质能当量关系的发现,则是从“无质”场与有重物质的关系出发所发现的一个普遍性定律的过程.在科学思想上,这二者的发现存在某种必然的联系,但爱因斯坦的发现具有更为深远的意义.由于篇幅限制,这一问题拟另文讨论.下面,本文将转向研究19—20世纪之交

电磁学的实验研究方面.

参 考 文 献

- [1] 宋德生,李国栋.电磁学发展史.第1版.南宁:广西人民出版社,1987.12,14,16—17,19—21章;第2版.1996.第21章[SONG De-Sheng, LI Guo-Dong. A History of Electromagnetism. 1st ed. Nanning: Guangxi People Publisher, 1987. 12, 14, 16—17, 19—21th Chapters; 2nd ed. 1996. 21th chapter(in Chinese)]
- [2] 宋佰谦.电学中的牛顿——安培.南宁:广西人民出版社,1992.第3—5章[SONG Bai-Qian. Ampere—Newton in Electricity. Nanning: Guangxi People Publisher, 1992. 3—5th chapters(in Chinese)]
- [3] 宋德生.物理,1985,14:184[SONG De-Sheng. Wuli (Physics), 1985, 14:184(in Chinese)]
- [4] 宋德生.自然杂志,1986,9(1):55[SONG De-Sheng, Nature Journal, 1986, 9(1):55(in Chinese)]
- [5] Lorentz H A. Collected Papers, Hague, 1937, 44:164
- [6] Larmor J. Phil. Mag., 1897, 44:506
- [7] 宋德生.自然辩证法通讯,1987,9(3):59[SONG De-Sheng. Journal of Dialectics of Nature, 1987, 9(3):59(in Chinese)]
- [8] Mc Cormmach R. Historical Studies in The Physical Sciences, 1970, 2:44
- [9] Dorling J. Brit. J. Phil. Sci., 1971, 22:2
- [10] Einstein A. Annalen der Physik, 1905, 17:132; American Journal of Physics, 1986, 33:367.
- [11] 爱因斯坦著.范岱年,赵中立,许良英译.爱因斯坦文集(第二卷).北京:商务印书馆,1977,2:37—53[Einstein A. ed. FAN Dai-Nian, ZHAO Zhong-Li, XU Liang-Ying trans. The Collect Papers of Albert Einstein(Vol. 2). Beijing: The Commercial Press, 1977, 2:37—53(in Chinese)]
- [12] 宋德生.物理,1987,16:757[SONG De-Sheng. Wuli (Physics), 1987, 16:757(in Chinese)]
- [13] Einstein A. Annalen der Physik, 1905, 17:891
- [14] Einstein A, Jahrbuch der Radio-aktivitat, 1907, 4:442.

(未完待续)

牛顿对热力学的贡献*

史 贵 全

(中国科学技术大学科技史与科技考古系 合肥 230026)

摘 要 针对学术界对牛顿热学成就的研究较为薄弱的状况,详细论述了牛顿在计温术和传热学上所取得的成果,并分析了其发现冷却定律的背景,指出该定律的发现与他长期从事冶金试验密切相关;探讨了牛顿对热的本质与若干热现象的见解及其历史价值.

关键词 牛顿,计温术,冷却定律,热的本质

* 2000-06-02收到初稿,2000-07-21修回