

# 坡印亭和他的科学工作\*

孟醒 倪牟翠<sup>†</sup>

(吉林大学物理学院 长春 130012)

2023-07-28收到

<sup>†</sup> email: nime@jlu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20231009

坡印亭定理和坡印亭矢量是反映电磁波传播特性的重要概念。尤其是坡印亭矢量，几乎出现在近现代的每一本讨论电磁学的著作中<sup>[1, 2]</sup>。不过，和这两个名词出现的频繁程度相反，有关坡印亭本人的介绍却不多见。在传统的物理学史书籍中，几乎没有关于这位物理学家的专门介绍<sup>[3-6]</sup>。本文主要依据剑桥大学在1920年出版的坡印亭论文集<sup>[7]</sup>，对这位物理学家的生平和他的科学工作进行介绍，希望能对大学物理教学及中文物理学史内容提供有价值的补充资料。

## 1 生平

约翰·亨利·坡印亭于1852年9月9日出生于英格兰曼彻斯特附近的蒙顿，他的父亲是一位牧师，也开办启蒙学校，因此坡印亭在父亲的学校里接受了良好的初级教育。1867年他进入曼彻斯特欧文学院，即现在的曼彻斯特大学，学习了数学、科学、文学和逻辑学等课程。1869年坡印亭考入伦敦大学，1872

年获得理学学士学位。同年他获得奖学金进入剑桥大学三一学院，1876年以当年第三名的成绩获得了剑桥大学的荣誉学士学位。之后，坡印亭回到欧文学院，在B.斯图尔特教授的物理实验室进行实验演示工作。这期间他认识了当时还是学生的J. J. 汤姆孙，二人结成了一生的挚友。1878年，坡印亭回到剑桥大学，在麦克斯韦主持的卡文迪什实验室工作。1880年伯明翰梅森学院成立，坡印亭被任命为学院的首批物理学教授之一。他在这一年结婚，此后一直在伯明翰工作。1887年坡印亭获得剑桥大学理学博士学位。1900年，梅森学院发展成为现在的伯明翰大学，坡印亭当选为理学院院长。

坡印亭为人正直谦逊，工作能力出色，深受同事和朋友们的爱戴。他一面主持梅森学院实验室的运转并筹建新的物理实验室，一面进行研究，还要不时准备讲座，甚至承担协助市政工作的研究课题。他始终都孜孜不倦、有条不紊地高效工作，因其在许多领域的杰出研究和公共活动而获得了广泛的认可。1888年坡印亭被选为英国皇家学会会员，1893年获得了剑桥大学的亚当斯奖，1903年获得

剑桥哲学学会的霍普金斯奖，1905年坡印亭获得了英国皇家学会的奖章，以“表彰他在物理科学方面的研究，特别是在引力常数、电动力学和辐射理论方面的研究”。1909年坡印亭担任皇家学会理事会成员，1910年起担任副会长。他是1899年在多佛召开的英国科学促进会A分会的主席，他还于1909年至1911年担任英国物理学会主席。图1是悬挂在伯明翰大学图书馆里的坡印亭肖像，图2是位于伯明翰大学校园里的坡印亭物理楼，在红砖外墙上的蓝色圆形铭牌上的文字是：John Henry Poynting, first professor of Physics determined the mass of the earth in Birmingham in 1890 (约翰·亨利·坡印亭，物理学院首位教授，他于1890年在伯明翰确定了地球的质量)。

坡印亭对运动和自然总是保持着热情。他对自然史、哲学和心理学都有兴趣，还抽出时间担任和平协会主席、伯明翰园艺协会主席和英国皇家学会气体安全委员会成员等社会职务。1914年春季，由于流感导致的严重的糖尿病发作，坡印亭于这年的3月30日去世。伯明翰大学成立了包括J. J. 汤姆孙和J. 拉莫等物理学家在内的纪念委员会，搜集整理了坡印亭科学工作文集，于1920年由剑桥大学出版社出版<sup>[7]</sup>。国际天文学联合会还将火星上的一个大型陨石坑以坡印亭的名字命名<sup>[8]</sup>。



图1 坡印亭肖像 图2 伯明翰大学的坡印亭物理楼

\* 2021年吉林省高等教育教学改革研究课题(批准号: JLJY202125750520)资助项目

## 2 主要的科学工作

在坡印亭科学工作文集中，一共列出了他四个方面的工作：对万有引力常数的测量；研究电磁场能量流的特性并提出坡印亭矢量和坡印亭定理；对光压的开创性研究；对物态变化的研究。因其中最后一项更接近化学理论，因此本文仅对前面三个方面的工作进行了介绍。此外，坡印亭还与J. J. 汤姆孙合作出版了一套四卷本的物理学教科书，在英国的大学里广受欢迎，一直使用了数十年<sup>[9]</sup>。

### 2.1 对万有引力常数的测量

1877年坡印亭在欧文学院帮助B. 斯图尔特教授进行演示实验。他们发现，当使用精确度较高的天平称量物体时，物体在天平托盘上的放置方式会引起测量结果的变化。比如一个扁平的铅板，分别采用竖直或水平的方式放置在托盘上，测得的重量就会不同。他们认为产生这类现象的原因是位置的改变导致物体受到的引力发生了变化。根据牛顿的万有引力定律，任意两个物体之间都存在引力相互作用，引力的大小与两个物体质量乘积成正比、与二者之间距离的平方成反比，其比例系数被称为万有引力常数。尽管考虑到物体的大小和形状，实际计算引力会比较复杂，但是有一点是明确的，就是引力的大小与距离的平方有关，这就解释了位置改变对物体表现重量的影响。坡印亭由此想到，如果在天平平衡时，在其中一个托盘下方引入另一个大质量物体，则这一侧的引力将明显增加，天平会朝这边倾斜，这样，通过测量各个物体的质量及距离，就可以确定万有引力常数的量值了<sup>[10]</sup>。

在牛顿提出万有引力定律时并未给出引力常数的数值。1798年英国科学家H. 卡文迪什利用扭秤进行实验，首次确定了这个常数值。卡文迪什还由此计算出了地球的平均密度，因此他也被称为“第一个称量地球的人”。不过当时测量的精确度并不高，按照卡文迪什的表述，“地球密度是水密度的5.48倍”<sup>[11]</sup>。在坡印亭计划测量万有引力常数的实验中，所采用方法的新颖之处在于，他不是用专门制作的扭秤而是用普通的天平来进行这项实验。当然，在真正开始实验之后，他发现事情也没那么简单。因为引力本身就是一个很微小的效应，实验中足以影响测量结果的因素太多了！诸如移动物体所产生的气流、操作天平引起的不稳定性以及温度湿度变化对材料的影响，都是实验误差的来源。不过坡印亭并不气馁，他以特有的耐心逐个检查并克服这些误差源，在1877年发表了初步的结果。为了获得更好的实验条件和指导，他把实验结果提交给剑桥大学三一学院，作为申请研究生的论文。麦克斯韦当时是论文的评审人，他被坡印亭倾注在实验中的高度耐心和持续毅力所吸引，同时也略带幽默地感叹，“英雄实验的时代还没有过去！”显然麦克斯韦认为坡印亭是在延续卡文迪什的事业<sup>[10]</sup>。在麦克斯韦的支持下，坡印亭获得了奖学金，进入剑桥大学卡文迪什实验室。这个实验室是以前面提到的H. 卡文迪什的后代亲属W. 卡文迪什的名字命名的。麦克斯韦还帮助坡印亭从英国皇家学会获得了一笔资金，用于专门订制实验所需的天平。这个新天平的钢梁长度大约125 cm，坡印亭在接下来的11年中都使用它做实验。到1890年，经历了一系

列的改进后，坡印亭发表了他认为满意的结果，他确定的万有引力常数值是 $6.6984 \times 10^{-8} \text{ dyn}/(\text{cm}^2 \cdot \text{g}^2)$  (dyn, 达因, 力学单位)。与H. 卡文迪什的结果相对照，坡印亭计算出的地球平均密度数值是5.4934倍水的密度<sup>[7]</sup>。

坡印亭的这个结果尽管比卡文迪什的精确度要高，但对于人们理解万有引力定律的帮助意义并不是很大。事实上，在坡印亭发表他的最终结果之前，人们已经发现了扭转性能更佳的石英纤维，极大地提高了卡文迪什扭秤的精确度，已远远超过了坡印亭使用的普通天平。尽管如此，坡印亭在引力常数测量方面所做的工作仍然是卓越的和富有魅力的，他这项研究的意义在于，使人们看到了在科学研究中数学能力、精确的实验技术和独创地开发机械功能的价值。

### 2.2 研究电磁场能量传输的特性

1884年，坡印亭根据麦克斯韦的电磁场理论，提出了这样的问题：电流的能量是如何从一点到另一点传输的？或者说，在一个电路中，能量从作为电能和磁能存在的部分，传输到它转变为热能或其他形式能量的部分，所通过的路径和遵循的规律是什么？这个问题是麦克斯韦不曾提及的。可能在坡印亭这篇论文发表之前，人们普遍认为电磁能量是沿着电路中的导线传输的，就好像水力通过管道传输一样。然而，当麦克斯韦建立了“位移电流”和“感应电场”这两个概念之后，表明在电路周围、没有导体的空间也存在电磁能量，尽管麦克斯韦给出了计算介质中某个区域的电磁能量密度的方法，但是他并未进一步讨论在包含了电路和介质

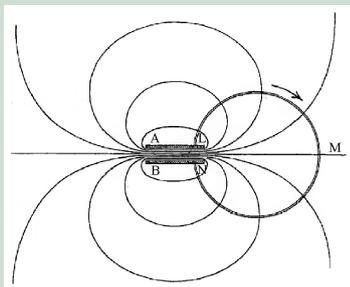


图3 坡印亭说明电容器放电过程能量传输路径的示意图

的空间中能量传输的特性。坡印亭敏锐地察觉到了这个问题，并就此做出了开创性的工作。

坡印亭在1884年的这篇论文题目为“关于电磁场中的能量传输”<sup>[7]</sup>。在开篇他就说明：“本文的目的是证明能量传输存在一个一般规律，根据该规律，任一点的能量传输方向垂直于由电力线和磁力线所构成的平面，并且每秒通过该平面单位面积的能量大小等于两个力的强度之积、再乘以它们夹角的正弦、除以 $4\pi$ ，能量的流动方向是，当从电动势的正方向转向磁场强度的正方向时右旋螺旋前进的方向。”接下来坡印亭从麦克斯韦对电场和磁场能量密度的定义出发，通过分析位移电流与电动势的变化关系以及电流产生热量的焦耳定律，得出这样的结论：“对于封闭表面内的空间，单位时间内电能的变化、磁能的变化与电路产生热量的总和，等于表面上由每点电场强度和磁强度的值所确定的量值的积分。”

这就是后来被称为坡印亭定理的最初表述。这实际上也是在包含电磁能量的能量传输过程中的能量守恒定律。坡印亭又从数学上证明，按照坡印亭定理，能量的传输规律确实如这篇论文开篇所提出的那样。为了显示能量的传输路径，坡印亭给出了这个理论在当时已知

的各类电磁现象中的应用，它们是：载流直导线的放热；电容器通过大电阻导体缓慢放电；含电池的电路；热电电路；带有电机的电路；感应电流；光的电磁理论。这些例子简洁明了，有效地展示了坡印亭定理和坡印亭矢量广泛的适应性。图3是坡印亭用来说明电容器放电过程能量传输路径的示意图。图中，由两个导体平板A和B组成的电容器通过一个电阻很大的导体线圈LMN缓慢放电，导线周围的细曲线代表能量的传输路径，它们都是垂直于导线的，按照坡印亭的说法，能量是从导线的侧面进入电路的，而非像人们之前普遍认为的那样从电荷储存处沿着导线传播。

坡印亭矢量也称能流密度矢量或能量传播的功率密度。不过坡印亭本人并没有给出表示能流密度也即坡印亭矢量的符号。1885年，英国物理学家O.亥维赛将麦克斯韦方程组由20个分量方程的形式改写为4个矢量方程，就如我们现在教科书中出现的形式<sup>[12]</sup>。1890年电磁波的发现者、德国物理学家赫兹发表了形式更加对称的、用矢量微分表示的麦克斯韦方程组<sup>[13]</sup>。这些改写推动了麦克斯韦理论被当时物理学家们理解并接受的进程，人们逐渐开始用矢量符号来表达诸如电场强度和磁场强度这样的物理量。亥维赛本人用大写字母“W”表示坡印亭矢量，他还曾宣称自己独立地发现了坡印亭定理，仅比坡印亭的论文稍晚几个月。到1902年，荷兰著名物理学家洛伦兹首先在自己的论文中采用矢量符号“S”表示坡印亭矢量，这也是现代大多数电磁学教材或论文采用的符号<sup>[14]</sup>。

坡印亭定理已经广泛应用于电磁波传播的各类问题中。例如，利

用坡印亭定理计算天线的电磁增益和损耗情况，以便设计天线性能；在电力设备和电子器件中，可应用坡印亭定理计算并解决电磁干扰问题；在目前较热门的光存储研究中也有一定理的应用。应该说，坡印亭对麦克斯韦电磁理论所做的研究，推动了这一理论被广泛接受的进程，他在电磁波传播领域的工作的份量足以与赫兹、亥维赛和洛伦兹等人的相提并论。

### 2.3 对光压的开创性研究

光压指光照射到物体表面对物体产生的机械压力。无论是光的微粒说还是波动说理论都可推知光压的存在。1873年麦克斯韦出版《论电和磁》，其中有一节专门讨论了光的电磁理论，并由光的电磁波传播性质推断出光压的存在。麦克斯韦还估算了太阳光照射到地球表面所产生光压的大小，约为 $10^{-7}$ 磅每平方英尺，这是一个非常微弱的效应，远远小于太阳对地球的万有引力。

1903年坡印亭在英国《哲学汇刊》上发表了题为“太阳系中的辐射：对温度的影响和对小天体的压力”的论文，对麦克斯韦的光压理论做进一步研究<sup>[7]</sup>。这篇论文包含两个部分。在第一部分，坡印亭首先讨论了如何利用当时已知的辐射定律(斯特藩定律)确定行星表面由于太阳辐射而达到平衡时的温度，得出了一系列数值结果。接下来他计算了一个可作为黑体的太阳系内小天体，由于吸收太阳辐射而达到的温度与其到太阳距离的关系，并按照各个行星到太阳距离的形式给出了相应的结果。论文的第二部分，首先用电磁理论计算了太阳光对太阳系内小天体的光压。例如，他的结果表明，如果一个可作为黑

体的小天体与太阳的距离同地球到太阳距离相当,则它由于太阳照射而受到的压力是每平方厘米 $10^{-5}$  dyn。这与麦克斯韦的估算结果一致。

之后,坡印亭开始了一个崭新的探讨。他假定有两个球形的小天体,存在于太阳系内与太阳一定距离处,因此可以根据论文第一部分的结果计算出它们的表面温度。按照辐射的斯特藩定律,这两个小天体相互间也会发出和接收电磁辐射,这种辐射的效果与光压一致,因此在两个小天体之间产生相互排斥的作用力。根据它们的表面温度和相互距离可以计算这种斥力的大小。另一方面,在这两个小天体之间还存在万有引力的作用,因此可以比较引力和斥力之间的关系。坡印亭指出,万有引力和光压产生的斥力之间的关系受到天体半径的显著影响。因为引力由整个天体确定,与半径的立方成正比,而光压则由天体受到辐射的面积确定,因此大致与半径的平方成正比。这样,尽管对于较大的天体,光压产生的效应远远小于万有引力作用,但是对于较小的天体,则可能出现引力与斥力相当的情形。坡印亭作了初步的估算,结果表明,对于到太阳的距离与地球到太阳距离相当的两个小天体,如果它们的密度是水的密度,则当它们的半径小于19.6 cm时,它们之间由于(受到阳光照射)相互辐射而产生的斥力将大于它们之间的万有引力!如果这样的两个小天体的密度等于铅的密度,则相应的半径是1.78 cm。坡印亭又把这一方法应用到太阳系内可能存在的微小尘埃粒子上,计算这些尘埃受到太阳的万有引力和光压力,结果表明,半径为四万分之一厘米、密度与地球相当的尘埃粒

子,受到的引力与斥力相等,它们既不会被太阳吸引也不会被太阳排斥。最后,坡印亭推测了在与太阳一定距离的轨道上绕行的小天体的行为,结果表明,如果粒子的尺度大于上述量值,例如半径1 cm的小天体,则它受到太阳的引力将大于斥力,并且在绕行运动中角动量逐渐减小,最终被吸入太阳;另一方面,对于更小的尘埃粒子,太阳的光压将它们越推越远,最终在太阳系的边缘形成巨大的尘埃环。

坡印亭关于光压的研究是开创性的。此后,随着光的量子论的诞生,光压的研究获得了丰富的进展。尽管如此,坡印亭在1903年和此后几年里所做的工作,仍然应该被认为是光辐射理论的奠基工作,他提出的思想方法大多经受住了时间的检验。坡印亭关于太阳系轨道中小天体行为的预测,后来由美国物理学家H. P. 罗伯逊修正,现在被称为坡印亭—罗伯逊效应。

### 3 评价和疑惑

坡印亭在物理学的多个领域做出了出色的工作,他的研究严谨细致,又富于创新,有很多成为了相应领域的奠基工作。坡印亭无疑是一位卓越的物理学家。有关坡印亭矢量和坡印亭定理的内容几乎出现在每一本电磁学著作中,与这一现象形成明显反差的是,在这些电磁学著作以及我们所看到的物理学史的专门教材中,都找不到关于坡印亭生平的介绍,这是令人困惑的。坡印亭和电子的发现者J. J. 汤姆孙是关系密切的好友,当坡印亭在曼彻斯特的欧文学院做物理实验助教时,汤姆孙还是这里的学生。后来,到1899年,人们在实验中获得电子单独存在的证据,这证实了汤姆

孙在1897年发现电子的理论。1899年英国科学促进协会的年会在英国的多佛召开,汤姆孙在A分会(数理分会)的会议上宣布了这个实验结果,当时坡印亭正在担任这个A分会的主席<sup>[7]</sup>。看起来似乎他并未远离英国科学界的中心,但是他又确实被此后的科学中心有意无意地忽略了。

### 参考文献

- [1] 赵凯华,陈熙谋. 电磁学(第2版). 北京:高等教育出版社,2006. pp. 416—423
- [2] 冯恩信. 电磁场与电磁波(第4版). 西安:西安交通大学出版社,2016. pp. 177—187
- [3] 弗·卡罗里(美)著,戴念祖译. 物理学史. 北京:中国人民大学出版社,2010. pp. 160—199
- [4] 李艳平,申先甲. 物理学史教程. 北京:科学出版社,2003. pp. 203—218
- [5] 郭奕玲,沈慧君. 物理学史(第2版). 北京:清华大学出版社,2005. pp. 115—126
- [6] 向义和. 物理学基本概念和基本定律溯源. 北京:高等教育出版社,1994. pp. 143—174
- [7] Shakespear G A, Barlow G (Eds.). Collected Scientific Papers of John Henry Poynting. Cambridge: Cambridge University Press, 1920. pp. 43—77, pp. 175—193, pp. 304—331, pp. ix—xiv
- [8] <https://wenamethestars.inkleby.com/feature/4816>
- [9] Stevens W. Science, 1899, 9(234): 872
- [10] Isobel Falconer. Meas. Sci. Technol., 1999, 10: 525
- [11] 威·弗·马吉(美),蔡宾牟译. 物理学原著选读. 北京:商务印书馆,1986. pp. 118—123
- [12] Bruce J H. Physics Today, 2012, 65 (11): 48
- [13] 郭奕玲,沈慧君. 物理学史(第2版). 北京:清华大学出版社,2005. pp. 125—126
- [14] Lorentz H A. Koninklijke Akademie van Wetenschappen te Amsterdam Proc., Section of Sciences, 1902, 5: 608