

赫兹对经典电磁场理论发展的贡献及其影响*

钱长炎[†] 胡化凯

(中国科学技术大学科技史与科技考古系 合肥 230026)

摘要 文章根据赫兹的日记、书信和论文集,对赫兹在电磁场理论研究方面的主要论著进行了深入分析,对他在经典电磁场理论发展过程中所起到的重要作用和历史地位给予了更为客观的评价。文章指出,赫兹所发表的电磁学理论研究论文不仅促进了麦克斯韦理论在德国的传播和认同,而且对麦克斯韦方程组的理论基础进行了合理的重建和拓展,并给予更为清晰的逻辑论证,从而对经典电磁场理论的发展和最终完善起到了重要作用。文章还指出,赫兹在电磁场理论研究方面的成就对洛伦兹电子论的建立起到了一定的启发作用,对爱因斯坦早期物理学研究也产生了直接的影响。

关键词 赫兹,麦克斯韦,电磁场,理论研究

Hertz's contributions to the development of classical electromagnetism and his influence

QIAN Chang-Yan[†] HU Hua-Kai

(Department of Scientific History and Archaeometry, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract Based on Hertz's diary, letters and collected works we analyse his major works on the theory of the classical electromagnetic field. We attempt to clarify some misunderstandings about his achievements in this field, giving his role in the development of classical electromagnetism a more objective evaluation. His theoretical research from 1884 to the early 1890's has important significance in the history of physics. Not only did Hertz promote Maxwell's theory throughout Germany, but also reconstructed and expanded the theoretical foundation of Maxwell's equations. Furthermore, from analysis of Lorentz's works on electromagnetism and Einstein's work in the earlier days of his life, we show that Hertz's achievements also had a significant influence on Lorentz's electronics and Einstein's early physics studies.

Key words Heinrich Rudolph Hertz, James Clerk Maxwell, electromagnetic field, theoretical researches

赫兹(Hertz H R, 1857—1894)因实验发现电磁波而永载物理学史册,但他对电磁学理论发展所作出的重要贡献长期未引起人们足够的重视。人们通常仅将他视为用实验方法证明电磁波存在的一位实验物理学家,而对他在电磁学理论方面的研究工作知之甚少,从而在他对电磁场理论发展所作出的贡献及影响方面存在模糊的认识。因此,本文拟根据赫兹的日记、书信和论文集及相关文献,对他在电磁学理论研究过程中所发表的主要著作进行更加深入的分析 and 考察,以期对他在电磁学理论研究方面所取得的成就的历史地位和价值给予客观的评价。

1 将麦克斯韦方程组简化为对称形式,进一步促进了麦克斯韦理论在德国的传播

1884年5月,赫兹在基尔大学对电磁学理论进行了第一次系统的研究。到1884年6月28日^[1],他完成了《论麦克斯韦电磁学基本方程组与其相对立的电磁学基本方程组之间的关系》一文^[2]。在这篇

* 2002-07-11 收到初稿,2002-08-19 修回

† 通讯联系人, E-mail: zhyqian@ustc.edu

文章中,赫兹试图运用麦克斯韦理论和当时德国电动力学中普遍使用的一些“基本原理”,重新推导电磁场的基本方程组,从而消除这些并行理论之间的矛盾,建立统一的电磁学理论。他说道:“一方面,作为基本前提,我们利用两个原理,它们可以称为电力的统一性原理和磁力的统一性原理。即使不是不证自明的,它们也可以看作是被普遍接受的。另一方面,我们利用能量守恒原理、闭合电路系统之间的作用与反作用原理和电磁作用的叠加原理以及众所周知的闭合电路和磁体的磁作用和电动作用定律。”(见文献 2]第 274 页)随后,就是根据这些基本原理,赫兹对当时已有的电磁学和电动力学理论进行了修正,从而推导出真空情形下的麦克斯韦方程组的对称形式(见文献 2]第 287 页)。

关于这种对称形式的方程组,赫兹论述道:“这些方程中电力和磁力是麦克斯韦给出的,他是将以太看作一种介质而引出它们的,介质的极化随时间的变化与传导电流产生同样的效应。我们是借助其他的假设推导出这些方程的,这些假设即便是麦克斯韦——法拉第观点的反对者也普遍接受。”(见文献 2]第 288 页)由此可见,他对用不同的方法也能推导出麦克斯韦方程组感到满意。但是,在这篇文章的最后,赫兹说道:“上面我是试图从基本原理出发来显示麦克斯韦方程组的正确性,这些基本原理在与之对立的电磁学理论中也被普遍承认,推导过程中所利用的一些假设也是与之对立理论中所常见的。因此,在推导过程中我所利用的是后者的概念。但是,除了这种关系之外,所作的推导绝对不能看作是对麦克斯韦理论体系惟一可能的一种严格的证明。从我们的基本原理出发,似乎不可能推导出这种证明。正确的结论可以从不正确的前提推导出来,正如从已知的观点可以推导出最合适的结论一样,但绝不是必须的。”(见文献 2]第 289 页)由此我们可以清楚地看出,赫兹并不认为他在文章一开始提出基本原理完全与麦克斯韦理论相一致,他推导麦克斯韦方程组的出发点是即使“在与之相对立的理论中也普遍承认的一些假设”。在赫兹看来,运用这种方法获得电磁场各个量之间的关系不能视为对它们的严格证明,因为他在推导过程开始所用的各个量之间的关系未必都是正确的。所以,即便赫兹从基本原理出发推导出了麦克斯韦方程组,但他十分明确地认识到距离真正消除电磁场理论之间的矛盾和建立统一的电磁场理论还很遥远。此外,在这篇文章中,赫兹的推导过程中也存在一些问题。一方面,隐

含在他所用的基本原理之中的一些物理假设与已有电磁学理论之间不完全一致性,譬如牛顿第三定律与麦克斯韦理论的不相容、电力的统一性原理与亥姆霍兹和韦伯的理论之间的矛盾^[3],赫兹自己对这些矛盾有所认识,但没有明确地加以解释;另一方面,赫兹所推导出的结果只反映了麦克斯韦理论的一部分,它只适用于驻波而不能用于描述电磁辐射的行波^[4]。正因为在这篇文章中存在着各种矛盾、缺陷甚至错误,所以他当时对涉及到电磁学理论基础的一些问题仍然感到十分迷茫。

赫兹 1884 年发表的这篇文章仅说明他对麦克斯韦电磁场理论有了进一步的理解,并认识到与德国当时的电动力学相比,麦克斯韦理论在对电磁现象的解释方面具有优越性。而就总体而言,赫兹这篇文章仅能看作是他试图从基本原理出发调和已有电磁学理论之间的矛盾从而建立统一的电磁学理论的一种初步的尝试。这种尝试虽然使他自己对麦克斯韦理论有所偏向,但它仍然不能促使德国物理学家放弃他们所长期信奉的建立在超距作用基础上的电动力学理论。然而,应该肯定的是,这种尝试对赫兹在物理学理论研究方法方面的训练是有积极意义的,并且对赫兹后来对电磁学理论进行深入的研究也具有一定的启发作用。

我们还注意到,赫兹的这篇文章发表之后立即在当时德国物理学界引起了激烈的争论,激发了当时德国许多物理学家对电磁学理论研究的热情。从 1884 年末到 1887 年初,德国权威性物理学杂志《维德曼年鉴》发表了围绕赫兹这篇文章的一系列争论性文章^[5]。在著名物理学家玻尔兹曼(Boltzmann, 1844—1906)的指导下,他的学生奥林谔(Aulinger E)还以赫兹这篇文章所讨论的问题作为学位论文主题,对电磁学的理论作更加深入的研究,产生了一定的影响(见文献 5]第 203—205 页)。这些可以说,赫兹 1884 年发表的这篇文章进一步促进了麦克斯韦理论在德国的传播。

2 重新推导和论证电磁学基本方程组,加速了经典电磁场理论的发展和完善

从 1886 年 10 月到 1888 年 1 月,赫兹主要从事电磁学实验研究,并作出了众所周知的重大发现。在此期间,他的日记、书信和发表的实验研究报告都未

见对电磁学理论作专门讨论.只是在他完成一系列重要实验研究工作之后,为了对所观察到的电磁现象提供一种系统的、严密的理论解释,他才再次回到对电磁学理论进行深度研究的课题之上.

关于他对电磁学理论的重新思考的结果,赫兹于1889年9月20日在德国自然科学和医学促进会的第62届年会上所作的《论光与电之间的关系》的报告中作了阐述.在这篇报告中,赫兹全面总结了从1886年到1889年在卡尔鲁斯厄工业大学所完成的一系列实验结果,指出电磁波具有光的所有属性这一麦克斯韦理论的重要结论.在这篇重要的演讲中,赫兹明确指出:“所有这些实验就其本身来说是很简单的,但是所导出的结论是极其重要的.它们对所有建立在超距作用观念上的理论是一个致命的打击,从而标志着麦克斯韦理论取得辉煌得胜利.”(见文献[2]第324页)

这时,赫兹重新树立了对麦克斯韦理论具有明显优越性的信念.但是,从他1889年发表的《电振荡的作用力:按麦克斯韦理论进行解释》^[6]的文章中我们可以看出,一方面,他对麦克斯韦理论与实验结果的一致性给予了肯定;另一方面,他又认识到要使所观察到的现象都得到满意的解释就必须对麦克斯韦理论进行必要的修正和改造.继之,在1890年发表的两篇重要的理论研究文章,赫兹不仅对麦克斯韦方程组进行了重新推导和论证,而且对整个经典电磁场理论的发展和完善作出了重要贡献.

2.1 消除麦克斯韦理论中基本概念的混乱,重新推导和论证了静止物体电磁学基本方程组

在1890年发表的《论静止物体电磁学基本方程》(见文献[6]第195—240页)一文中,赫兹剔除了麦克斯韦理论中的在他看来是次要的成分,从而简化了概念和推导过程,将麦克斯韦理论用简明而完整的数学形式重新表述出来.在文章一开始,他写道:“麦克斯韦描述电磁现象的概念和方程组所构成的理论体系可以发展成为比其他任何一种电磁学理论体系内容更丰富、更易于理解的理论体系.一个体系在内容上是完备的,在形式上又能达到尽可能的完美,这样的理论体系肯定是令人满意的.为了建立这种完备的理论体系,我们就必须使它的逻辑基础简明易懂,消除所有次要的概念,并以最简单的形式表述其中重要概念之间的关系.麦克斯韦自己的表述中存在概念和逻辑上的混乱,因此他的理论并未达到这些要求.”(见文献[6]第195页)在赫兹看

来,麦克斯韦在建立理论过程中存在两个主要问题:其一:“麦克斯韦从直接的超距作用的假设开始,再根据在这种力的作用下介质以太所假设的极化会发生变化,从而推导出各种定律,可是在最后他又认为这种极化确实发生变化,但并不是由于这种力引起的.这种推演过程就不能令人满意,它表明要么结论是错误的,要么这种推导方法存在问题.”(见文献[6]第195页)其二:“这种推演所得到的方程中保留了不少多余的、但在一定意义上又是基本的概念,这些概念仅在以往的直接超距作用理论中才具有它们合适的意义.在这些基本概念中,我认为,具有物理意义的是自由以太中的电介质的位移,但必须将它与产生它的电力和描述这两者之间关系的以太感应系数区分开来.只要我们从空间将以以太消除而允许力的存在,这种区分就有意义.对此,从麦克斯韦推导理论的出发点上可以看出,但在他的推导过程中我们就难以看出.作为具有数学意义的一个基本概念就是在基本方程组中处于优越地位的矢势.在新理论的建立过程中,矢势仅起到一种脚手架的作用……在我看来,在基本方程中引入矢势并未带来任何便利;此外,我们可以从这些方程中发现实际观测到的物理量之间的关系,而不是仅通过计算所得到的数量之间的关系.”(见文献[6]第195—196页)

通过消除这些多余的、矛盾的概念,赫兹以电力、磁力作为独立的概念,并以它们之间的对称关系为基础,推导出麦克斯韦方程组的更为一般对称形式(见文献[6]第211页).在推导出方程组之后,赫兹论说道:“这种表述不再出现任何依赖于特殊物体的物理量.这些方程在无限空间的任何一点都能成立,它们包含了所有的电磁学问题.”(见文献[6]第211页)赫兹认为正是他所建立的这些方程组明确表达了麦克斯韦理论的核心思想.在该文的第二部分,他就是从这些方程出发对所有已经观察到的电磁学和光学的实验现象给出了统一的、更为合理的解释.

诚然,赫兹此文对简化电磁场方程组和促进麦克斯韦理论更普遍地被接受所起到的重要作用是毫无疑问的.但是,他建立电磁场基本方程的基础仍然是以太学说,同样相信电磁场总是依附于以太或介质而存在.对于这些涉及到物理学基础的根本问题,赫兹也无法超越时代的局限性而作出更好的回答,只能有待于人们对物质微观结构等物理学基础问题的认识不断深化后才能得以逐步解决.

2.2 建立运动物体电磁学基本方程组,引伸和拓展了麦克斯韦电磁场理论

1890年,赫兹还发表了《论运动物体电磁学基本方程》一文(见文献[6]第241—268页)。在这篇文章中,他将静止物体的电磁场基本方程扩充成为包括运动物体的电磁现象在内的统一的电磁场基本方程,并对在19世纪80年代人们一直争论不休的关于以太在物理学中的地位以及它与电磁学概念之间关系的问题提出了自己的解决方案。

在文章中,赫兹将以太随着在其中运动的物体以相同的速度运动作为一种基本的假设来建立运动物体的电磁场基本方程。他在文章的开始就对此进行了说明:“我们可以断言在已经观察到的现象中,没有一种现象说明以太独立于它所依附的可称量物体而运动,这可以从观察到的一系列现象都未暗示有这种相对位移出现得以佐证。至少可以说,这一系列的电磁现象都与没有这种位移发生的观点相一致,并且说明了所假设的在可称量物体中存在的以太仅随物体运动。这种观点还包含了对仅存在一种介质的空间中的每一点进行考察的可能性,从而可以对这个问题作出肯定的回答。因此,在这篇文章中我们就采用这种观点。”(见文献[6]第242页)赫兹对以此为基础建立理论是很有信心的。

赫兹的推导过程是从物体运动对空间各点的电磁力分布的影响开始的,同时考虑到以太随物体运动所引起的电力、磁力的变化,从而拓展了静止物体的电磁学基本方程的适用范围。他论说道:“现在我们断言,在不考虑其他因素的影响情况下,仅就物体运动的本身而言,它也会导致力的磁线随其运动而发生变化。或者更准确地说,假设在任何确定的时刻,物质的磁状态用一簇力线的大小和方向来表示,那么,如果只考虑运动所产生的效应,一簇通过同样的物质各点的力线也就可以表示在其他任何时刻的物质各点的磁状态。与之相对应,由运动所导致的电极化的变化也可以用同样的方法加以说明。这些描述方法在对静止的物体的电磁场理论的建立中已经得以确证,因而它们足以扩充到运动物体的电磁场的理论之中。它们明显满足我们理论体系所要求的条件,并且将会显示能够包含所有已经观察到的事实。”(见文献[6]第244页)将这些思想用数学方法加以描述和推论,赫兹就导出了同样具有对称性的关于运动物体电磁学的基本方程组(见文献[6]第245—246页)。在这组方程中,所有包含介质中各点速度的项都是由于以太的存在和电磁场依附于以太

或物质的思想观念所导致的结果。对于以太和电磁场作为独立实体存在的认识,是电磁场理论后续发展的重要课题。但是,这一问题涉及到物理学理论基础,在力学机械论框架下是无法解决的。爱因斯坦在1905年发表的《论动体的电动力学》这一标志狭义相对论建立的著名文章中,就是抛弃以太观念和力学机械论时空观,在相对论的时空观及其基本原理的框架下将当时德国物理学界称为麦克斯韦-赫兹方程变换成了完全的对称形式,从而彻底解决了关于运动物体电动力学的问题^[7]。

仅就赫兹这篇文章的推导过程来说,它是他1890年发表的上述文章的一种扩充。而他所提出的假设和赖以建立理论的基础则进一步表明,他坚信电磁场是以太或物质中各点运动的特殊状态。无论是在以太中,还是在其他介质中,电磁场总是依附于以太或物质(无论它们是运动的还是静止的)而存在。由此可见,从法拉第开始,直到19世纪90年代,对电磁场不能看作为脱离物质而独立存在的实体的认识还深深地扎根于物理学家的心目中。

在上述两篇理论文章发表之后,赫兹在1891年11月—12月为他的电磁学研究论文集《电波》一书撰写导言时,不仅对自己在电磁学实验和理论研究中思想发展过程作了全面的总结和反思,并且对当时电磁学理论和实验中存在的问题作了进一步的分析。

2.3 反思自己电磁学实验和理论研究的过程,对电磁学理论问题作进一步探讨

赫兹对自己从事电磁学理论研究的回顾是从回答麦克斯韦理论的实质究竟是什么的问题开始的。他认为,在当时所有认真阅读过麦克斯韦《电磁通论》的科学家都不能对这个问题作出满意的回答,他自己也不例外。因此,在赫兹开始从事电磁学的研究工作时,他的电磁学实验研究的直接指导思想是亥姆霍兹电动力学理论。正如他自己所说:“许多人抱着极大的热情去研究麦克斯韦的著作,即使他们没有因其罕见的数学困难而踌躇不前,但也不得不放弃努力使麦克斯韦的思想在自己的大脑里形成一个完整、一致的观念。我所经历的与他们毫无二致。尽管我对麦克斯韦的数学方法极为赞赏,但是在那时我还不能充分理解他所论述内容的确切的物理意义。所以,麦克斯韦的著作就不可能直接指导我的实验研究工作。实际上,正是亥姆霍兹的研究工作指导了我的实验研究工作,这一点从我已经完成的实验研究工作中可以清楚地看到。”(见文献[6]第20

页)这表明,赫兹在1886年10月到1888年3月从事围绕电磁波的发现的一系列实验研究的过程中,他的理论指导思想主要是亥姆霍兹电动力学.在1888年2月至3月间,他撰写的《论电磁波在空气中的传播及其反射》一文则表现出他对麦克斯韦理论有了明显的倾向性.随后,在1888年4月至10月间完成的《电振荡的作用力:按麦克斯韦理论进行解释》一文中,赫兹利用麦克斯韦理论系统地处理电振荡的问题.这进一步坚定了他对麦克斯韦理论的信念和对它进行改造的愿望.

在引言理论部分的其余内容中,赫兹就是围绕他的1890年发表的两篇理论文章说明自己对麦克斯韦理论的理解,以及他所建立的理论与麦克斯韦对自己理论的表述之间的差别.所讨论的重点就是关系到电磁学或电动力学中最基础的问题,这就是电荷、电流的本质和带电体之间的作用机制以及电介质的电学性质.从一定意义上说,这是对他1890年发表的两篇文章理论基础的补充.

他清楚地说明了超距作用电动力学和麦克斯韦电磁场理论等学说对电的本质和带电体之间作用机制的不同理解,并附以图示,非常直观(见文献[6]第22—26页).他认为这些学说对这些问题的解释都存在这样或那样的缺陷甚至错误,即使麦克斯韦自己对他理论中的这些基础问题也没有说明清楚.他认为他对这些问题的看法才能反映麦克斯韦的本意,并明确指出麦克斯韦理论中存在一个最基本的问题就是对电本质的认识问题.他说道:“麦克斯韦最初是借助关于电的本质的一种明确而又特别的观念来建立理论的,他假设以太和所有的物体中的细孔都被一种稀薄的流体充满,从而在物体之间不会产生超距作用力.在导体中,这种流体自由运动,它的运动就形成了我们称为电流.在绝缘体中,这种流体由静电力限定在它的位置上,它的‘位移’被认为与电极化一致.这种流体的本身,由于是所有电现象产生的原因,麦克斯韦称其为‘电’.然而,在麦克斯韦撰写他的杰作《电磁通论》时,他发现这些早期形成的观念中的积累起来的假设不再适合他的思想,或许他发现了它们之间相互矛盾,因此就抛弃了它们.但是,他并没有将它们全部消除,在他的《电磁通论》中还遗留了大量的从他早期思想中推演出来的表述.因此,令人遗憾的是,在麦克斯韦著作中‘电’一词明显地具有两种含义.一方面,他用它来表示一个物理量(如我们认为的那样),它要么是正的,要么是负的,是产生超距力的起点(或看上去是

这样的);另一方面,它则表示一种假想的流体,通过它不能产生超距力,在任何条件下对于确定的空间来说,它的数量都是正的.如果阅读麦克斯韦的说明和总是以一种合适的方式来理解‘电’一词的含义,那么几乎所有在一开始令人吃惊的矛盾都可消除.”(见文献[6]第26—27页)由于这个原因,赫兹认为,要解决麦克斯韦理论基础中的如此相类似的矛盾,就必须重新考虑建立电磁学理论的基本前提和假设,这是他在1890年两篇理论文章的出发点.

在这两篇文章中,赫兹索性以独立的电力和磁力存在作为基本假设,电介质的极化是电介质中各点运动的结果,由此推演出麦克斯韦方程组.但是,尽管他消除了电位移的概念,并把理论建立在极化的基础之上,他也没有解决位移和电荷之间关系的问题.他认为极化是存在的,并能够用电力来表述,可是电的本质和极化的涵义仍然不清楚.但是,赫兹对自己的所采用的方法是充满信心的.赫兹认为,通过他对物理基本假设的重新设置,在他1890年发表的两篇文章中所建立的方程组就表达了麦克斯韦的思想的核心.正如他所说:“通过这种方法,而不是麦克斯韦的所采用的罕见的观念或方法,所建立的方程组,我才称其为‘麦克斯韦理论’.对‘什么是麦克斯韦理论?’的问题,我所知道的没有比下面更简洁或更确切的答案了:麦克斯韦理论就是麦克斯韦方程组.每一种能够导致同一组方程的理论,从而包含同一类的可能的现象,我将它都看作是麦克斯韦理论的一种形式或特例;每一种导致不同方程组的理论,从而就包含不同可能的现象,则它就是一种不同的理论.因此,在这种意义上,也仅在这种意义上,本文集中的两篇理论文章可以看作是对麦克斯韦理论的表述.”(见文献[6]第21页)

3 结论

综上所述,赫兹在电磁学理论方面的研究工作是19世纪下半叶经典电磁场理论发展的重要组成部分.虽然他所重建的电磁学理论无法消除“以太”这个物理学中的“幽灵”,但是他的这些成就对爱因斯坦等人产生了重要影响.1895年,爱因斯坦完成的第一篇科学论文《磁场中以太状态之考查》就是在阅读赫兹著作的基础上撰写的^[8].不仅如此,1899年爱因斯坦又是在对赫兹著作的进一步研究的基础上,开始对“以太”产生了怀疑(见文献[8]第204页).洛伦兹是在赫兹启发下从分子物理学转向对

电磁学的基本问题的研究之上^[9],在其名著《电子论》中他还直接引用了赫兹的观点和理论研究成果^[10].此外,赫兹关于电磁场的一系列的研究,无可争辩地否定了关于电磁现象的所有超距作用的理论,而这些超距作用的观点又是直接来源于万有引力超距作用的思想.正如劳厄(von Laue M, 1879—1960)曾经指出:“爱因斯坦的最伟大的贡献之一就是建立了引力是以光速传播的理论,而这一理论得以建立的思想根源直接可以追溯到赫兹那里.”(见文献[1]第XX XV页).

参 考 文 献

[1] Hertz H. *Memoirs · Letters · Diaries*. Hertz J, Hertz M, Süsskind C eds. San Francisco : San Francisco Press , Inc. , 1977. 193

[2] Hertz H. *Miscellaneous Paper*. Lenard P. ed. Jones D E, Schott G A trans. . New York : Macmillan & Co. , 1896. 273—290

[3] Darrigol O. *Archive for History of Exact Sciences* , 1993 ,45 (3) 246

[4] Havas P. *American Journal of Physics* , 1966 34 668

[5] Buchwald Z. *The Creation of Scientific Effects : Heinrich Hertz and Electric Waves*. Chicago : University of Chicago Press , 1994. 203

[6] Hertz H. *Electric Waves*. Jones D E trans. New York : The Macmillan Company , 1900. 137—159

[7] 爱因斯坦著. 范岱年等编译. 爱因斯坦文集(第二卷). 北京 : 商务印书馆, 1977. 99—103[Einstein. Fan D N et al. trans. *The Collected Works of Albert Einstein*. Vol. 2. Beijing : Commercial Press , 1977. 99—103(in Chinese)]

[8] 爱因斯坦著. 赵中立等译. 爱因斯坦全集(第一卷). 长沙 : 湖南科学技术出版社 , 1999. 7—9[Einstein. Zho Z L et al. trans. *The Collected Papers of Albert Einstein*. Vol. 1. Changsha : Hunan Science & Technology Press , 1999. 7—9(in Chinese)]

[9] McCormach R. *Isis* , 1970 61 462

[10] Lorentz H A. *The Theory of Electrons and its Applications to the Phenomena of Light and Radiant Heat*. Second edition. New York : Dover Publication , Inc. , 1952. 2 57



· 信息服务 ·

美国伦斯勒理工学院招生信息

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics , Applied Physics , and Astronomy Areas of Research : Astronomy , Elementary Particles Physics , Nano-Structure Physics , Origins of Life , THz Imaging , THz Electronics.

Teaching , research assistantships , and fellowships are available.

Application <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

Information <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

E-mail : gradphysics@rpi.edu