学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

中外科学家发明家丛书

麦克斯韦

BOOK
内部资料 非卖品

中外科学家发明家丛书
麦克斯韦

麦克斯韦是英国物理学家，是物理学上经典电磁理论的奠基人。

19 世纪初提出的电磁理论，曾经导致了物理学界的一次革命。从奥斯特、安培发现电流的磁效应开始，到法拉弟对电磁学进行实验研究和完善，直至最终电磁学理论的建立，前后经历了半个世纪的历程。而最终用数理科学方法使电磁学理论体系建立起来的，就是物理学家麦克斯韦。

有人这样评价他为：“ 自牛顿以来最伟大的数学物理学家 ”，这可能有些夸大的成份，但是就麦克斯韦本人来说，应该赢得属于他的荣誉。在他生前，麦克斯韦本人的自负和谦虚使他并未享有他所应当享有的盛名，但是在今天，我们有必要去了解这个科学史上的伟人。因为不谈他的主要理论在今天科学世界的实际作用，就是他的其他的细小的理论成就也使我们今天的实际生活丰富和幸福，比如彩色电视和彩色照相。

所以，对于物理学家而言，麦克斯韦有权得到最高承认。

一、勤奋好学的少年

詹姆斯·克拉克·麦克斯韦 1831 年 11 月 13 日生于苏格兰古都爱丁堡，他是佩尼奎克的克拉克家族的后裔。麦克斯韦的母亲也是大家族的女儿，很有教养，是主教派教会的会员。麦克斯韦的启蒙教育是由母亲承担的，母亲教他读书，启发他的好奇心。但不幸的是麦克斯韦八岁时母亲死于肺结核。这种病在今天是不难治愈的，但在 100 多年以前，因为没有特效药，得肺病的人就如被判死刑。40 多年以后，麦克斯韦也同母亲一样，死于同一病因，同一年龄。

麦克斯韦的父亲约翰是一名不随流俗的机械设计师，他对麦克斯韦的影响非常大。他是长老会教友，但思路开阔，思想敏锐，讲求实际，特别能干。家里的事情，不分巨细，他都料理得很好。修缮房屋，打扫庭院，给孩子们制做玩具，乃至裁剪衣服，他样样都能胜任。

母亲的去世对于未成年的麦克斯韦是一个无比沉重的打击。在生活上，这个家庭的生计变得日益艰难，在心灵上，给小麦克斯韦蒙上了驱不散的阻影。他深爱自己的母亲，后来他谈到母亲时曾说：“虽然我同母亲只相处了 8 年，并且一切均有我的父亲做伴，但多年来我总有丧母之忧，因而羡慕那些有母亲的人，他们生活得多么美满和幸福。”

母亲去世后，性格渐渐变得孤僻、内向的麦克斯韦便与父亲相依为命。能干的父亲担负起了抚养、教育他的全付担子。小麦克斯韦童年的最大乐趣，就是形影不离地跟着父亲，好奇地问这问那，给父亲当一个小小的帮手。父亲的倔强性格，心灵手巧以及做事的细致入微对麦克斯韦的影响非常深。

麦克斯韦 10 岁的时候，父亲把他送入了城里的爱丁堡公学就读。这所学校建于 1824 年,办学宗旨是按照英格兰的方法向苏格兰青年提供一种正统教育。因为在当时英格兰人看来，苏格兰人处于一种不文明不开化的状态之中，因而苏格兰式的教育方式不是正统的、正规的，所以真正称得上受过教育有教养的人要按照英格兰式的方法接受英格兰的教育。

公学的校长约翰·威廉斯牧师就是一个接受过正统英格兰牛津教育的威尔士人。他为人豁达、风趣、开朗，办学上有见地。他使爱丁堡公学迅速英格兰化并使之成为苏格兰的一流学校。但是这所学校的大多数教职员都是苏格兰人，所以苏格兰的传统教育方法也体现在这所公学的某些方面。这样，年幼的麦克斯韦就处于苏格兰教育思想和英格兰教育思想的交织和对峙状况之中，并在这种矛盾和融合下发展，这种状况在他毕生事业中一直存在并对他的气质有着深刻的影响。

如果说这种潜移默化的冲突是一种长期性的隐性行为，那么小麦克斯韦首先要面对的是更为世俗的冲突，那就是城市与乡村的冲突。

麦克斯韦生长于父亲的老家盖洛韦乡村，因此操着浓浓的盖洛韦乡音。他是在学期中插班来上课的，第一天上课，就受到了同学们的嘲笑。那是在老师点名叫他回答问题的时候，麦克斯韦刚一开口，那浓重古怪的口音便引得同学们哄堂大笑。有一次因为他发音实在是太古怪了，连一位文绉绉的女教师都忍不住笑出了眼泪。因此老师们便很少再在课上向他提问，麦克斯韦也更趋于孤僻。

在服饰上，麦克斯韦也与众不同。在 19 世纪，英国人是十分讲究衣饰打扮的，女流以华贵为时髦，男子要戴高筒礼帽，穿着笔挺的衣服，衬衫的领

子要做得硬梆梆的。而麦克斯韦那灵巧的父亲则认为这样的服饰一来不利于活动，二来洗起来也不方便，于是他自己动手设计、剪裁，按照苏格兰人简朴、实用的原则为儿子做了一套简便的紧身衣，可以不穿外套，也没有累赘的硬领。不仅如此，麦克斯韦的皮鞋也是父亲做的，也许是为了缝合时的方便，皮鞋头是方形的，鞋帮上用金属扣扣紧。

不料这些“奇装异服”使麦克斯韦成了同学们嘲笑和攻击的对象，城里孩子不仅讥笑他，排挤他，而且还撕破他的衣服，偷走他的腰带。他们还给他取了一个外号——“傻瓜”，这个外号在学生时代一直跟着他，实际上它的意思与其说是指愚蠢，更不如说是指古怪。

父亲见儿子如此受到侮辱，深感痛惜，决定不再让孩子穿自己设计的衣服。麦克斯韦尽管眼泪汪汪，但是却倔强地坚持要穿到底，因为他信任自己的父亲，认为他的设计是无可非议的，为此他决不向暴力屈服。

麦克斯韦依然穿着那样的服装进出课堂，为了捍卫自己的尊严，他转向那些欺侮人的家伙，并且不停地挥舞拳头，打得他们不敢吱声。

城里的孩子发现这农村学生并不是可以随意欺侮的，于是开始有意地孤立他。麦克斯韦因此也很少与大家来往，课下，他总爱独自坐在树下读读诗歌，画一些只有自己才看得懂的图画，或者一个人躲在教室的角落里，专心致致地演算父亲给他出的数学题。在班里，面对同学的冷嘲热讽，他沉默着，但却从没低下头，当忍无可忍的时候，他就用尖刻的话语来回击。整个爱丁堡公学只有两个人与麦克斯韦要好——坎贝尔和泰特，他们也是在班里受欺侮的，三人同命相怜。这两个人后来也和麦克斯韦一样有作为，坎贝尔成了古典文学学者，泰特成了数学和物理学家（自然哲学家）。

麦克斯韦最初在爱丁堡公学时就是这样，尝尽了冷眼和孤独，但是天才的光芒是永远不会被埋没的。到了中年级的时候，奇迹出现了。在一次学校举行的数学和诗歌比赛中，麦克斯韦脱颖而出，一举夺得了两个项目的最高奖。结果一经公布，不仅让全班同学目瞪口呆，就连老师们也大感意外，他们这才意识到，班里这个独来独往的“傻瓜”原来有着如此的才华。

这次比赛改变了麦克斯韦在班上的地位，优秀的学生总是受人崇敬的。于是再也没有人取笑他的口音和衣服，同学们开始敬重他，有了疑难问题也都向他请教。麦克斯韦成了全校的尖子生，获得了许多奖励。

麦克斯韦的光彩，看起来象是突然迸发出来的，实际上这与他的勤奋刻苦是分不开的。他对数学和物理有着浓厚的兴趣，特别是数学。在数学方面，他很早就表现出较好的天赋。一次父亲教幼小的麦克斯韦练习画静物写生，所画对象是插满金菊的花瓶。画完后父亲一看，满纸涂得都是几何图形：花瓶是梯形，菊花成了大大小小的一簇圆圈，叶子用一些奇怪的三角形表示。父亲见他对图形的把握性很强，又有空间立体感，于是便教他几何，后来又教他代数。麦克斯韦因此与数学结下了不解之缘，而且他的数学才华，很快突破了学校教授的范围。十四五岁的时候，他就自个儿发现了次多面体。他写了一篇论文，发表在《爱丁堡皇家学会学报》上，论文题目是讨论二次曲线的几何作图。这种曲线首先是被笛卡尔发现加以研究，并描述过绘制这种曲线的方法；但麦克斯韦这次所用的方法是崭新的。在那时，一个最高机构的学报刊登孩子的论文，是非常罕见的，麦克斯韦的父亲以此自豪。这篇论文的想法十分巧妙，而且显示出了麦克斯韦一生中治学的两个特色：严密性和对几何论证的偏爱，这正是苏格兰传统教育的体现。

这篇论文的最重要价值是使麦克斯韦进入到爱丁堡的学术界。他和父亲一起，出入于爱丁堡皇家学会的会议，也因此接触了更多的有识之士，增长了见识。

少年时代的麦克斯韦还酷爱诗歌，不仅爱读，而且擅写。他的诗自成一格，常常即兴而作，博得友人的喜爱。同学之间也常常传抄、朗诵。麦克斯韦从来没有想过当一名诗人，但他一生都没有放弃过写诗的爱好。

在中学时候，麦克斯韦常爱玩两种玩具，一是提螺，它类似于中国的空竹，玩的时候用绳子提拉，一面飞速旋转，一面发出嗡嗡的声响。据说麦克斯韦毕生都爱玩这个，还教他的朋友们玩。二是一种叫活动画筒的玩具，他也极感兴趣。这种玩具大概类似于万花筒。麦克斯韦的这两种游乐兴趣，并不仅仅是出于娱乐，因为这两种看似简单的玩具中，包含着复杂的科学原理。而在以后，这些原理都被他应用到科学上。

1847 年，麦克斯韦 16 岁，中学毕业，进入爱丁堡大学学习。这里是苏格兰的最高学府。他是班上年纪最小的学生，但考试成绩却总是名列前茅。他在这里专攻数学物理，并且显示出非凡的才华。他读书非常用功，但并非死读书，在学习之余他仍然写诗，不知满足地读课外书，积累了相当广泛的知识。

在爱丁堡大学，麦克斯韦获得了攀登科学高峰所必备的基础训练。其中两个人对他影响最深，一是物理学家和登山家福布斯，一是逻辑学和形而上学教授哈密顿。福布斯是一个实验家，他培养了麦克斯韦对实验技术的浓厚兴趣，一个从事理论物理的人很难有这种兴趣。他强制麦克斯韦写作要条理清楚，并把自己对科学史的爱好传给麦克斯韦。哈密顿教授则用广博的学识影响着他，并用出色的怪异的批评能力刺激麦克斯韦去研究基础问题。

在这些有真才实学的人的影响下，加上麦克斯韦个人的天才和努力，麦克斯韦的学识一天天进步，他用三年时间就完成了四年的学业，相形之下，爱丁堡大学这个摇篮已经不能满足麦克斯韦的求知欲。为了进一步深造，1850 年，他征得了父亲的同意，离开爱丁堡，到人才济济的剑桥去求学。

二、负疚剑桥

剑桥大学创立于 1209 年，是历史悠久的大学，也是英国首屈一指的高等学府，它有着很好的科学传统。牛顿曾在这里工作过 30 多年，达尔文也毕业于此。麦克斯韦初到剑桥，年仅 19 岁，他这个青年对大千世界的一切都感到新鲜。他几乎每天都和父亲通信，谈论这时的所见所闻和自己的学习收获。

在剑桥，麦克斯韦依然保持着他惯有的勤奋作风。他的学习出类拔萃，第二年以优异的成绩考取了奖学金。按剑桥的规定，获得奖学金的学生在同一桌吃饭，麦克斯韦因而结识了一群有志有为的年轻人。他也渐渐克服了少年时代的羞怯，变得爱与人交往，因为这些有才华的年轻人毕竟情投意合，而且相互钦佩。

在这所学校中，有一群才华横溢使学校四壁生辉的自由古典派学者，他们组织了一个团体称为使徒俱乐部。这是一个科学团体，意为耶稣的 12 个门徒，人数以 12 人为限，实际上是一个有建设性的学会，只有有真才实学的学生才有资格参加。麦克斯韦的才华引起了这个团体的注意，他们吸收他为会员。

在剑桥，麦克斯韦专攻数学，读了大量的专著。此时，他的学习方法还很没有条理性、系统性，有时候为了钻研一个问题，他接连几周目不旁顾，而有的时候，他又不加选择，漫无边际地博览。课余时间，他常常和使徒社的朋友们聚在一起，探讨各式各样的问题。他们宣讲论文，进行辩论，提出批评，交流意见，有时也即兴作诗。朋友们十分欣赏麦克斯韦的诗才，但是与他谈话交流却非常困难，因为麦克斯韦说起话来和他读书一样，思维跳跃性非常大，常常如天马行空，自己心中明白，表达出来却前言不搭后语，往往一个论题没有讲完，又跳到另一个题目上。而且他的思路怪异，总爱提出一些让人摸不着头脑的怪问题，比如什么“死甲虫为什么不导电？”，“活猫和活狗摩擦可不可以生电？”，让人无从回答。尽管同伴们与他交流起来困难，但是仍把麦克斯韦看做他们中间独一无二的人。麦克斯韦惊人的想象力，敏捷的思维，讥诮的诗句使他们折服了。

一块朴玉，要有名师的雕琢才能成为佳品，一个奇才，也需要名师点拔才能有所成就。在剑桥，麦克斯韦通过一次极为偶然的机会遇到了一位好老师，那就是剑桥的教授、著名数学家霍普金斯。一天，霍普金斯因研究需要要借一深奥的数学专著，到图书馆一查，发现这本书已经被一位青年借走了。这本书一般学生是不可能读懂的。霍普金斯感到诧异，询问借书人的名字，管理员告诉他是“麦克斯韦”。他找到麦克斯韦，发现他正在埋头做摘抄，笔记上涂得五花八门，毫无头绪。霍普金斯觉得这个年轻人不一般，走上前去诙谐地说：“小伙子，如果没有秩序，你永远成不了数学物理学家。”就这样，麦克斯韦成了霍普金斯私人班级的第 15 个学生。

霍普金斯是个学识渊博的人，也是一名地球物理学家，人们称之为“造就数学学位考试一等生的工匠”。如果一个教师的水平通过他教出的学生水平来鉴定的话，霍普金斯毫无疑问地荣登榜首。在他门下，卓越的人才层出不穷：汤姆孙、斯托克斯、凯利、费勒斯、泰特、劳思……

麦克斯韦在导师的影响下，首先克服了原先那种杂乱无章的学习方法。霍普金斯是个很严谨的人，他对麦克斯韦的每一个选题乃至每一步运算的要求都很严格。更重要的是，霍普金斯不是一个抽象派的数学家。在数学史上，

数学家们大抵分为两派，一派以古希腊的毕达哥拉斯为创始人，认为世界的本源就是抽象的数，一切客观事物都是由数构成的；另一派则是 17 世纪的笛卡尔创立的，他认为数学是客观事物的定量反映，是人类用于了解客观事物的工具。这两种对立的派别影响到后来人们对数学的不同看法，一种把数学看作纯粹的符号，另一种则把数学当作手段。霍普金斯和他的学生，后边我们还要谈到的数学家托克斯都属于后者。在导师的指导下，麦克斯韦也受到这样的数学哲学的影响，很重视数学的作用，把数学当作解决问题的工具，这使得他一开始就把数学和物理结合起来，对于日后完成电磁学理论，无疑起到关键性作用。

在跟随霍普金斯学习的同时，麦克斯韦还参加了数学家斯托克斯的讲座学习。斯托克斯比他年长 12 岁，在数学和流体力学上有很高的造诣，曾经发现过函数极限的一致收敛性。麦克斯韦在这两个优秀的数学家指点下，进步非常快，他用了不到三年的时间就掌握了当时所有先进的数学方法，成为一名青年数学家。霍普金斯盛赞他说：“ 在我所教过的学生当中，毫无疑问，这是我所遇到的最杰出一个。 ”

1854 年，23 岁的麦克斯韦参加了数学学位考试。主持人是斯托克斯，题目涉及曲面积分和线积分，非常难。事后大家才知道，这原来是斯托克斯刚刚发现的一个定理。这个定理后来对麦克斯韦从事的电学研究帮助很大。考试结果，麦克斯韦取得了甲等数学优等生的第二名。在剑桥的学习，给麦克斯韦打下了坚实的数学基础，为他以后从事物理学研究创造了条件。

毕业后麦克斯韦留在了剑桥的三一学院任研究员。在这段时间中，他研究的课题是光学上的色彩论。不久他读到了法拉第的《电学实验研究》，于是很快被书中新颖的实验和见解所吸引，对电学产生了浓厚的兴趣，并且发表了他的第一篇关于电磁学的论文——《法拉第的力线》，有关这篇论文我们后面将系统谈到。

正当麦克斯韦刚刚踏上科学研究之路的时候，一件不幸的事使他不得不停了下来。一天他在埋头研究学术资料的时候，邮差送来一封家信。收到家信，对于麦克斯韦本是平常事，但这回一见信，麦克斯韦便涌上一种不祥之感——信封上不是他所熟悉的父亲的笔迹。他长期以来一直担心的事情终于发生了，父亲年老体弱，身子一天比一天差，现在已经卧床不起了。信是好心的邻居代写的。麦克斯韦读了信，十分焦虑和难过。他与父亲的感情是无法用语言来表达的。自母亲去世后，父亲不仅担负起抚养和教育他的全部重任，而且还是他的良师益友。他们朝夕与共十多年，麦克斯韦离乡求学后，一直没有中断与父亲的通信联系。而今天，他刚刚可以立业，可以通过自己的有所作为来报答父亲养育之恩的时候，父亲却一病不起。

为了照顾父亲，麦克斯韦离开了环境非常好的剑桥，到离家较近的阿伯丁谋职。阿伯丁是英国北部的一座海港，那里的一所学院同意考虑让麦克斯韦担任物理学（自然哲学）讲师。麦克斯韦尽心尽力地照顾着病榻上的父亲，力图减轻老人的病痛。但是一切努力都无济于事，当 1856 年的春天要来临的时候，父亲病故了。这件事对于麦克斯韦来说，是永远难以弥补的损失，他长时间沉浸在悲痛中。

不久，阿伯丁的马里斯查尔学院向他发出邀请，正式聘用他为自然哲学的讲师。在去之前，他思虑了许久，对于剑桥，他还是非常留恋的，而且父亲已经去世，再到阿伯丁去已经没有意义，更主要的是，他的科学工作刚刚

开始，他不知道在阿伯丁是否有合适的研究条件。但是，麦克斯韦的人品决定他要守信用，于是他还是去阿伯丁上任了。

三、土星光环

1856 年初冬，麦克斯韦来到了马里斯查尔学院，11 月开始正式任教，这一年他年仅 25 岁。

为了讲课，麦克斯韦花了很多功夫进行准备。但是第一次走上讲台，他还是相当紧张。他在尽力地控制着讲课的节奏，心中默念着：“讲慢些，再慢些！”可是一旦讲起来，他的言语又跟着他的思维，像脱缰的野马一样，收不住了。他的思想敏捷，语速也快，而且夹带着不清晰的口音，就连来旁听的院长也暗暗替他着急。他的速度快得惊人，两课时的内容，他只用一课时便讲完了。而学生们大多依然呆坐着，什么也没听懂。于是他又从头至尾讲了一遍，听懂的人依然微乎其微，只好尴尬地下了课。

在这以后，麦克斯韦决定反省自己的讲课方法，练习发音，练习放慢语速，练习为别人讲解。好在这个时候，院长的女儿玛丽帮助了他，终于使他没有再闹过笑话。不过凭心而论，麦克斯韦确实不是一块当讲师的材料。他虽然有着敏捷的思维，渊博的学识，但是他的表达能力实在欠佳，永远不及他的才思，以至于常常苦于说不出来。世界上确实有这样的一种人，他们很善于用文字来表达，但却不太会驾驭语言。麦克斯韦就是这样，他讲起话来杂乱无章，游移不定，但是若拜读他的文章，却是条分缕析，层次分明。在马里斯查尔，麦克斯韦的论文内容精当，论述严谨，是大家所公认的。

在阿伯丁，麦克斯韦研究所得的主要成就是与电磁学毫无关联的天文学和气体力学。在天文学方面，麦克斯韦用了整整两年时间研究土星的运行，并于 1858 年发表了《土星光环》的论文。

早在 1787 年，拉普拉斯进行过把土星光环作为固体研究的计算。当时他曾确定，土星光环作为一个均匀的刚性环，它不会瓦解的原因要满足两个条件，一是它以一种使离心力与土星引力相平衡的速度运转，二是光环的密度与土星的密度之比超过临界值 0.8，从而使环的内层与外层之间的引力超过在不同半径处离心力与万有引力之差。他之所以有如此推论，是因为，一个均匀环的运动在动力学上是不稳定的，任何轻微的破坏平衡的位移都会导致环的运动被破坏，使光环落向土星。拉普拉斯推测，土星光环是一个质量分布不规则的固体环。

到了 1855 年，理论仍然停留在此，而这中间，人们又观测到了土星的一个新的暗环，和现在环中更进一步的分离现象，还有光环系统自从被发现以来二百年间整体尺度的缓慢变化。因此，一些科学家们提出了一个假说，来解释土星光环在动力学上的稳定性，这个假说是：土星光环是：由固体流体和大量并非相互密集的物质构成的。麦克斯韦就根据这一假说进行了论述。

他首先着手的是拉普拉斯留下的固体环理论，并确定了一个任意形状环的稳定性条件。麦克斯韦依据环在土星中心造成的势，列出了运动方程式，获得了对匀速运动的势的一阶导数的两个限制，然后由泰勒展开式又得到关于稳定运动二阶导数的三个条件。麦克斯韦又把这些结果换成关于质量分布的傅立叶级数的前三个系数的条件。因而他证明了，除非有一种奇妙的特殊情形，几乎每个可以想象的环都是不稳定的。这种特殊的情形是指一个均匀环在一点上承载的质量介于剩余质量的 4.43 倍到 4.67 倍之间。但是这种特殊情况的固体环在不均匀的应力下会瓦解掉，所以固体环的理论假说是不能成立的。

出于非固体环的考虑，麦克斯韦通过把对环的形状扰动展开为某个关于波的级数，审查了各种环的稳定性。他取一个起始模型，是一个由空间间隔相同，质量全都相等的许多固体卫星组成的环，更复杂的结构以后就可以同这个模型加以对照。光环的运动可以分解为四种：以恒定角速度绕土星的转动，沿着环平面的径向、切向和法向的小量运动。通过数学方法的复杂运算，麦克斯韦最后得出光环的稳定性取决于切向力的结果，并指出定义切向力的那个参数必须在 0 与 0.07 倍的角速度平方之间。

这篇论文获得了 1857 年剑桥的亚当斯奖，那年他年仅 26 岁。他论文中的基本点即土星光环是由一群离散的质点构成的，在 1895 年被科学家贝洛波尔斯基和基勒用光谱观察证实。这篇论文和麦克斯韦在此方面的工作中，因为当时条件有限，计算和结果中还有一定的误差，以及一些没有考虑到的因素在内，但是论文的基本结论还是正确的，也为后人的研究指明了方向。从这篇论文开始，我们可以看到麦克斯韦在科学上已经走向成熟。

麦克斯韦因此而获得了成功，在这样一个重要的经典问题上的成功给了他数学上的自信，这种自信心对他以后的科学工作影响很大。在论文《土星光环》中，麦克斯韦确立了典雅的文学笔调和精辟的数理分析。在他以后的有关电磁学的伟大论文中，他仍然继续保持着这种技术分析水平，并且在物理学和哲学的洞察力上具有划时代的进步。这些还表现在麦克斯韦同时期进行的有关色视觉和气体力学研究上。

我们前面已经讲过，麦克斯韦喜爱玩两种玩具：提螺和活动画筒。活动画筒引发了麦克斯韦对色彩的视觉的兴趣。在麦克斯韦以前，有一个名叫托马斯·扬的人提出过有关色视觉的三感受器原理。早在几个世纪以前，画家们就知道所谓的三原色，即红、黄、蓝，并且知道利用这三种颜色可以混合调配出各种想要的颜色。然而当时人们对三原色和三感受器原理还存有疑惑，因为牛顿断定并通过实验表示出来：棱镜光谱包含的原色是七种而不是三种。

麦克斯韦早在 1849 年在爱丁堡的福布斯实验室就开始了色混合实验。在那个时候，爱丁堡有许多研究颜色的学者，除了福布斯、威尔逊和布儒斯特外，还有一些对眼睛感兴趣的医生和科学家。实验主要就是在于观察一个快速旋转圆盘上的几个着色扇形所生成的颜色。麦克斯韦和福布斯首先做出的一个实验是使红、黄、蓝组合产生灰色。他们的实验失败了，而其中的主要原因是：蓝与黄混合并不象常规那样生成绿色，而是当两者都不占优势时产生一种淡红色，这种组合加上红色不可能产生任何灰色。

接着，麦克斯韦又改进了他们的色螺旋盘，这是根据他的老师福布斯在 1849 年的发明而发展起来的，它有两套不同颜色的着色纸，使用时灵活地在盘上排列成可调整的扇形。当色盘旋转的时候，这些颜色就在眼睛中混合起来。麦克斯韦还用了一套直径比第一套小的可调扇形，以便做出更为准确精密的色比较。通过反复实验、比较，麦克斯韦根据各种颜色显露的角度，列出色方程式。实验后，麦克斯韦正确地区分了三个新的光学变量——色彩（光谱色）、色辉（饱和度）、色荫（照度）。从而，麦克斯韦创立了定量色度学这一学科，他证明：各种颜色都可由三种光谱刺激源的混合配成。并证实了托马斯·扬关于色视觉的三个感受器的理论，证明了色盲的原因是一个或多个感受器的无效。1868 年，他研制了“色箱”，在生理视觉领域做出了非凡的贡献，直到今天，在生理视觉学科中，人们还把人因特殊视觉效果产生

于特殊区域的一条黑斑称为“麦克斯韦斑”，也算是对麦克斯韦在这一领域工作成果的纪念。1861 年，麦克斯韦在皇家研究院向听众们映示了第一张三原色彩色照片，这无疑是光学领域的一个重要里程碑，为后来的光学研究和彩色照片的诞生打下基础。

在马里斯查尔学院，麦克斯韦从事研究的另一个课题就是气体力学。他之所以对这一题目有兴趣，是因为他在写《土星光环》论文的时候遇到了许多与此有关的难题，所以他的倔强本性使他决定去突破它们，也正是这样，他一生的大部分时光和精力都耗费在这一领域，直到他生命的最后两年。这些我们将会在后面谈到。

在马里斯查尔学院的教书生涯中，麦克斯韦不是一个合格的老师，但是在科学研究领域，他的才华渐渐发挥出来，他的研究方法也逐渐成熟、定型。现在对他来说，物理学是要探讨的课题，数学则是他得心应手的工具。经过了必要的题目的磨练，一旦找到了合适的课题，他就将显示出他的异彩。

在这段时期，1858 年，麦克斯韦结婚了，新娘就是那个曾经给予他巨大帮助的院长的女儿玛丽。在年龄上，玛丽比麦克斯韦大 7 岁，在后来，玛丽仍然在科学事业上支持麦克斯韦，一心帮助丈夫进行色视觉和气体动力学实验。麦克斯韦也深爱着妻子，1876 年起，玛丽不幸患上了神经性疾病，麦克斯韦在工作之余尽心尽力地照料她。

1860 年初秋，马里斯查尔学院同阿伯丁的另一所大学皇家学院合并，合并以后办学经费被削减，于是只好通过裁员来解决问题，物理学讲座因此取消，麦克斯韦只好辞职，另谋生路。

麦克斯韦起初想到他的母校爱丁堡大学去谋职，因为那里他的老师福布斯已退职，需要一个自然哲学教授。同时应选的有三个人，校方决定用考试来决定录用谁。在笔试方面；麦克斯韦的学问理所当然是第一，但是在口才上，麦克斯韦再次吃了亏。考试结果，麦克斯韦是最后一名，他的讲课能力实在太差了。当时甚至爱丁堡的一家杂志都发表评论文章，为爱丁堡大学失去这样一个人才而惋惜。不过被选上的人也不差，那就是他中学和大学的同学泰特。

麦克斯韦离开阿伯丁，又因此离开家乡爱丁堡，他被聘为伦敦皇家学院的教授，妻子也一同前往。麦克斯韦于是开始了新的生活，在伦敦皇家学院，他完成了可以使他最终在物理学史上发射出光芒的电磁学理论。

四、踏入电磁学的大门

电磁学是当时比较新的科学领域。

回顾电磁学的历史,物理学的历程一直到 1820 年的时候都是以牛顿的物理学思想为基础的。自然界的“力”——热、电、光、磁以及化学作用正在被逐渐归结为一系列流体的粒子间的瞬时吸引或排斥。人们已经知道磁和静电遵守类似引力定律的平方反比定律。在 19 世纪以前的 40 年中，出现了一种反对这种观点的动向，这种观点赞成“力的相关”。1820 年，奥斯特发现的电磁现象马上成了这种新趋势的第一个证明和极为有力的推动力，但当时的人又对此捉摸不定和感到困惑。奥斯特所观察到的电流与磁体间的作用有两个基本点不同于已知的现象：它是由运动的电显示出来的，而且磁体既不被引向带电流的金属线，也不被它推开，而是对于它横向定位。同一年，法国科学家安培用数学方法总结了奥斯特的发现，并创立了电动力学，此后，安培和他的追随者们便力图使电磁的作用与有关瞬时的超距作用的现存见解调和起来。

那是在奥斯特的发现后不久，安培发现两个电流之间也存在一种力，并把所有的磁在起源上都是电的这一假说向前推进了一步。1826 年，他建立了一个公式，这个公式把已知的磁现象和电磁现象归结为一种平方反比力，此力沿着两个间距为 r 的电流元 idl、i′dl′的连线

$$Fii' = \frac{ii'dldl'}{r^2}G$$

其中 G 是一个包含 r、dl 以及 dl′之间角度的复杂的几何因子。1845 年，诺埃曼推导出同安培力相对应的势函数，并把该理论推广到电磁感应上。另一个由威廉·韦伯作出的推广是把安培定律同静电学定律结合起来以构成一个新的理论，它也说明了电磁感应，把电流作为两组数量相等、方向相反的带电粒子流来处理，这个电流受到一个力，此力方向总是沿着两个粒子 l、l′的连线，但它的大小依赖于这两个粒子沿着该连线的相对速度和加速度。1856 年，科尔劳希和韦伯通过测量静电力与电动力之比从实验中确定了一个具有速度量纲的常数，这个速度常数的大小约是光速的 2／3。这些公式、定律以及诺埃曼的势理论为 19 世纪 70 年代以前欧洲的电磁学理论研究提供了出发点。

对于麦克斯韦来说，前辈们的一切工作都对他有着深远的意义，而其中最有影响力和产生决定性影响的当属法拉第和威廉·汤姆孙。法拉第是英格兰一个铁匠的儿子，家境贫寒，完全凭借自己的天才与勤奋自学成为一名了不起的科学家。他的伟大发现：电磁感应、介电现象、电化学定律、抗磁性、磁致旋光等，都是他以一种不懈钻研的精神，通过追究力的相关关系而产生的。麦克斯韦曾评价说：“这些发现构成了 1830 年以来关于电的一切事物的核心。他对理论的贡献在于逐渐推广了有关电力线与磁力线的观念。法拉第早期关于电磁转动（相当于第一个电动机）的发现使他产生了对引力和斥力的怀疑。1831 年以后，由于他用磁力线穿过感应电路的运动来描述电磁感应取得的成功，他的观念在迅速地向前推进。在他一生中所进行的电磁学实验和他的一系列《电学实验研究》的论文中，他曾猜想：介电过程与电解过程中，这些过程沿曲线的传递是无法同关于直接的超距作用的假说调和起来的，转而把这些过程归因于带电体间空间物质紧邻部分的递次作用。在他关

于顺磁性与抗磁性的著作中，他提出了导磁性的概念。1852 年，他写了一篇富有建树的概念性论文，在这篇论文中，他对磁现象和电磁现象作了一般定性描述，在描述中推广了邻接作用原理。他的推广基于以下假说，那就是：磁力线具有使本身缩短和从旁侧互相推斥的物理性质。麦克斯韦工作的主要功绩就是后来对这一假说进行了定量表述。

汤姆逊的贡献始于 1841 年，当时他还是一名剑桥大学的学生。他的第一篇论文在静电学方程与热流方程之间建立起形式上的类比，通过适当的代换，可将一个电学问题转换成热学理论问题。1845 年，他在继续对法拉第的观点进行研究时提出了第一个对电力线的精确的数学描述。在电学历史上，汤姆逊的功绩是非凡的，他的方法和理论对麦克斯韦的研究有着举足轻重的作用。他第一次提出了电象方法、磁力与弹性固体转动应变之间的第二个形式类比，而最重要的是，随着他涉足热力学，还将能量原理应用于电学，作了许许多多工作。

麦克斯韦的电学研究始于 1854 年，当时他刚从剑桥毕业不过几星期。他读到了法拉第的《电学实验研究》，立即被书中新颖的实验和见解吸引住了。在当时人们对法拉第的观点和理论看法不一，有不少非议。最主要原因就是当时“超距作用”的传统观念影响很深。另一方面的原因就是法拉第的理论的严谨性还不够。法拉第是实验大师，有着常人所不及之处，但唯独欠缺数学功力，所以他的创见都是以直观形式来表达的。一般的物理学家恪守牛顿的物理学理论，对法拉第的学说感到不可思议。有位天文学家曾公开宣称：“谁要在确定的超距作用和模糊不清的力线观念中有所迟颖，那就是对牛顿的亵渎！”在剑桥的学者中，这种分歧也相当明显。汤姆逊也是剑桥里一名很有见识的学者之一。麦克斯韦对他敬佩不已，特意给汤姆逊写信，向他求教有关电学的知识。汤姆逊比麦克斯韦大 7 岁，对麦克斯韦从事电学研究给予过极大的帮助。在汤姆逊的指导下，麦克斯韦得到启示，相信法拉第的新论中有着不为人所了解的真理。认真地研究了法拉第的著作后，他感受到力线思想的宝贵价值，也看到法拉第在定性表述上的弱点。于是这个刚刚毕业的青年科学家决定用数学来弥补这一点。

1855 年，麦克斯韦发表了第一篇关于电磁学的论文《论法拉第的力线》。论文分为两个部分，并有例子。论文的第一部分是对力线与不可压缩的流体流线之间类比的解释。同汤姆逊对于该题目的处理比起来，这篇论文包含的广度更大，而且它还包含一篇关于物理学不同分支之间类比的哲学意义的具有启发性的公开演讲。这是麦克斯韦后来不止一次谈及的问题。在 1856 年 2 月，他在剑桥使徒社俱乐部宣读了一篇题为《论自然界的类比》的论文，而《论法拉第的力线》中就包含有这篇论文的很多观点。不过不同的是，作为专门谈论类比问题的文章，《论自然界的类比》把论题放到了更为广泛的背景之下进行讨论，文体虽然含蓄隐晦，但包含着科学哲学思想的闪光之处。麦克斯韦受到康德的哲学观影响很深，他相信人的全部知识与其说是关于事物的，不如说是关于关系的。麦克斯韦在类比方法中所看到的用处是两重的，一是类比在不同领域间进行技术融合，二是类比是分析的抽象化与假说方法之间一个极好的折中。在实际科学研究的工作中，麦克斯韦注意到，把电流同象热传导与流体运动这样不同的现象类比，将使物理学家不致轻率地假定“电不是像水那样的物质就是象热那样的骚动状态？”。类比是几何的类比，是关系之间的相似性，不是有关事物之间的相似性。

在《论法拉第的力线》中，麦克斯韦首先阐述了有关流体的性质，以便于加以类比。他主要考虑到流体运动所通过的阻力介质，改进了流体动力学类比的陈述。他认为，当不可压缩的流体从一种介质进入具有不同多孔性的另一种介质时，流动是连续的，但在穿过边界时，压强差会增加。同样，当一种介质用具有不同多孔性的的另一种介质替换的时候，由于在边界引入适当的流体源，可以在形式上取得相同的结果。这些结果有助于计算，并有助于说明磁性材料和电介质材料中发生的若干过程。

麦克斯韦把类比应用于磁学，根据前人的结果他区分了两个矢量：磁感应力与磁力，后来他用符号 B 和 H 来表示。在流电学中，相应的量是电流密度 I 和电场强度 E。B 和 H 之间的区别提供了描述“磁晶感应”的钥匙，磁晶感应是法拉第在晶体磁性材料中观察到的一种力。麦克斯韦认为：这两个量 B 和 H 同磁力的两个定义是一样的，对并行发展的静磁力理论和电磁理论有着重大作用。因为在此之前，两个磁矢量 B 和 H 已经使很多科学家大伤脑筋，而麦克斯韦的类比讨论所确定的结果使得这一问题豁然开朗。

电流与磁力线之间存在着极为相似之处，法拉第曾定性地看到这一点，这也正是麦克斯韦论文第一部分结尾的论题。第二部分完全是涉及电磁学的。在这个部分，麦克斯韦发展了关于电磁过程的一个新的形式理论。出发点是一个闭合电路的磁效应与一个具有同样周长的均匀磁化铁壳的磁效应之间的同一性，这种同一性安培曾经确定过，在运用解析方法时，麦克斯韦仿效了汤姆逊的《磁学的数学理论》，并广泛运用了汤姆逊 1847 年首次证明的一条定理。麦克斯韦采取由汤姆逊开始的分析路线，列出了一个用于描述电流与磁力线的四个矢量之间关系的一套方程组。用这个方程可以得出电磁感应建立时的电动势和一个电磁系统的总能量，用新的函数提供了方程式以表示寻常磁作用、电磁感应及闭合电流之间的力。麦克斯韦循着法拉第对假想的物质应力状态的某些想法，把这种函数叫做电致紧张函数。

这篇论文是麦克斯韦迈入电磁学大门的第一步，虽然基本上是对法拉第力线概念的数学翻译，但却是重要的一步，因为麦克斯韦从入手就使用了数学方法，而且又是选定了法拉第学说的精髓——力线思想，来作自己研究的起点，这是非常具有开创性的。在论文中，麦克斯韦除了解释法拉第的工作和给出电致紧张函数外，还包含着许多新观念的萌芽。麦克斯韦在以后的工作使这些观念重新发出了活力和光彩。

五、力线理论的突破

1860 年，麦克斯韦来到伦敦。一到伦敦，麦克斯韦便特意去拜访法拉第。在阿伯丁的四年，他的工作虽然很多，但心中总有一个心愿，就是继续进行他曾经有所建树的电磁学研究。

与法拉第的会晤在麦克斯韦心中留下了深刻的印象。那是一个晴和的秋日，麦克斯韦做了自我介绍后，递上了 4 年前曾写的论文《论法拉第的力线》。法拉第此时已年近古稀，两鬓斑白，他微笑着看着眼前这个年轻人，两人一见如故，亲切交谈起来。

在阳光下，两个伟大的人物的见面有着划时代的意义。他们不仅在年龄上相差 40 岁，在性情、爱好方面也迥然不同，可是他们对物质世界的看法却产生共鸣。这是一个奇妙的会面，法拉第快活、和蔼，麦克斯韦严肃、机智。老师是一团温暖的火，学生是一把锋利的剑。麦克斯韦不善言辞，法拉第讲起话来则娓娓动听。一个不擅长数学，另一个却运用自如，两个人在科学方法上也恰恰相反：法拉第专于实验探索，麦克斯韦却长于理论概括。两位巨匠可谓是相辅相成，在许多方面可以互补。爱因斯坦曾把他们称为一对，就像伽利略和牛顿一样。麦克斯韦自己也谈到了这一点：“因为人的心灵各有不同类型，科学真理也就应该有各种不同的表现形式，不管他以具有生动的物理色彩的粗犷形式表现，不是以一种朴实无华的符号形式来表现，它都应当被当作是同样科学的。”这话有一定的道理，因为法拉第是把他引入电磁学大门的人，他内心由衷地尊敬这位前辈老师。但是，不同的科学方法，所发掘科学的深度却往往不同，法拉第用直观形象的方式表述的真理，麦克斯韦最后用惊人的数学才能把它概括出来，并提高到理论的高度，所以他的认识就更深刻，更深入事物的本质，因而也更带有普遍性。

法拉第在 4 年以前曾经注意到《论法拉第的力线》一文，但是作者是这么年轻有为的人是他所没有料到的。当麦克斯韦向他征求有关的意见时，法拉第说：“我从不认为自己的学说就是真理，但你是真正能够理解它的人。”法拉第沉吟片刻后说：“这是一篇出色的文章，但你不应该停留于用数学来解释我的观点，而应该突破它！”

法拉第的话，极大地鼓舞了这个年轻的科学家。为麦克斯韦点燃了火把，照亮了前进的道路。在名师的指点下，麦克斯韦信心百倍地投入了电磁科学研究事业。

为了更直观透彻地研究电磁学这个新的课题，麦克斯韦设计了一个理论模型，试图对法拉第力线观念作进一步的探讨。这个模型完全建立在机械结构的类比上，有人称之为“以太模型”，现在看起来是一个相当枯燥复杂的结构，有一个英国的现代科学史学家，用了大量篇幅也没有解释清楚这个结构。事实上，在麦克斯韦的工作后期，他也舍弃了这个模型，但是当时麦克斯韦就是凭借这个模型，成功地作出了正确的判断和结论。

在对这个模型进行讨论的时候，麦克斯韦了发现了一个重要的事实，引起了他的注意。为了分析介质的性质，他根据已有的方法和结论，将电的静电单位与电磁单位相除，比值为一个常数，具有速度量纲，麦克斯韦惊奇地发现，这个数值竟恰好等于光速！

这难道不是巧合吗？为了这个发现，麦克斯韦感到非常兴奋。在妻子的帮助下他又反复检查了各项数据，确信没有一点差错。这是一个非常了不起

的发现，因为实际上意味着他算出了电磁波传播速度与光速一样。正是这个发现，促使麦克斯韦 9 年后断定光就是电磁波。

1862 年，麦克斯韦完成了论文《论物理的力线》，在这篇论文中他叙述了“位移电流”的概念，并阐述了他的以太模型及有关介质的探讨。论文是以设计一种占有空间的介质的尝试开始的，这种介质应当可以用来说明法拉第那种与磁力线相联系的应力。这篇论文的结束就是我们刚才所谈的麦克斯韦发现。

麦克斯韦在此把磁体描画成一种吸管，这种吸管一端在以太流体中吸入以太，而从另一端将以太排出。从几何学上来讲，在两个这样管子之间的流动与两个磁体之间的磁力线完全相同的，但从物理学上来讲这两种作用是相反的，两个磁体就象两端按平方比律关系相互吸引的两个管子，而不象两端相互排斥的两个管子。

麦克斯韦的物理力线理论就在于把磁场中的转动这一假说从寻常的物质推广到以太。他考虑了深置于不可压缩流体中涡旋的排列。在正常情况下，压强在各方向是相同的，但转动引起的离心力使每一涡旋发生纵向收缩并施加经向压强，这正模拟了法拉第力线学说中所提的应力分布。由于使每一涡旋的角速度同局部磁场强度成正比，麦克斯韦得出了同已有的关于磁体、稳恒电流及抗磁体之间力的理论完全相同的公式。根据流体的观察实验，麦克斯韦认为各涡旋之所以能沿同一指向自由转动，是因为各涡旋由一层微小的粒子同与它相邻的涡旋格开，这种粒子与电完全相同。

根据这种观点，电不是约束在导体内的流体，而成了一种在空间中传播的一种新实体。在导体中它可以自由运动（尽管受到阻力）；在绝缘体中（包括最主要的绝缘体——空气）中，它保持固定不动。电流的磁作用和感应作用当时被表示如下。假如用一根金属线将以太模型中的粒子线结合起来，当电流流动时，运动粒子便使与之相邻近的涡旋转动；这些涡旋由于有粒子固着于周围，就象齿轮那样，将运动传给其它的涡旋，使运动面无限扩大。这些涡旋就构成了力线。当第二根金属线参与进来以后，它平行于第一根金属线，并具有有限的电阻。金属线一的稳恒电流不会影响金属线二，但“一”中的任何变化会通过介入的粒子传递一个冲动，在金属线二中引起一个反向电流，这个电流通过电阻渐渐消耗掉，这一系列的运动就是感应。

麦克斯韦在前两部分中运用了大量证据材料对结论作出了很好的证明。他的论文原打算也就到此结束，而且在第二部分印出来以前不打算写第三部分。这其间他一直在考虑着在整个电介质中电流与电荷感应的关系。1854 年，他曾对汤姆逊说过，对流线与电力线之间类比的严格论述，只不过会引入传导的极端形式而已。麦克斯韦作出了在空间中传播电的图象，他通过使涡旋介质成为弹性介质的方法，提出了更好的描述，这些一部分来自于法拉第的科学观念启示；但麦克斯韦在研究的同时，也发现其中存在有很多矛盾。在以前，包括法拉第等许多人在内，人们在研究电流产生磁场时，指的总是传导电流，也就是在导体中自由电子的运动所形成的电流。麦克斯韦发现，例如在连接变电源的电容器中，电介质内并不存在自由电荷，也就是没有传导电流，但磁场却同样存在。麦克斯韦经过反复思考、计算和分析，他得出了两个惊人的结果。一是既然导体周围的电粒子现在能作弹性位移，那么变化着的电流就不再象管中的水那样是完全被约束的：它在某种程度上来说进入了金属线周围的空间。这也就是麦克斯韦对位移电流的最初认识。二是经

过缜密的运算，他认为电磁速度量纲几乎与光速相同。

从理论上引出位移电流的概念，是法拉第在电磁学上发现电磁感应后的又一重大突破。根据这一科学假设，麦克斯韦导出了两个非常复杂、抽象的微分方程式，在后来经过完善后，被称为麦克斯韦方程组。这组方程，从两方面发展了法拉第的成就，一是位移电流，它表明不仅变化的磁场产生电场，而且变化的电场也产生磁场；二是方程不仅完满地解释了电磁感应现象，还进行了理论推广，也就是凡是有磁场变化之处，其周围不论是导体或电介质，都有感应电场存在。

在《论物理的力线》一文中，麦克斯韦对前人的工作进行了创造性总结，电磁现象的规律，经过法拉第的实验研究、汤姆逊的类比研究，终于被麦克斯韦用不可动摇的严密的数学形式揭示出来。电磁学至此才开始成为一种科学的理论。

在自然科学的历史上，一般只有当某一科学发展到了高峰，才可能用数学公式表示成定律的形式。这些定律不仅能解释已知的物理现象，还可以揭示出某些尚未发现的东西。正如牛顿的万有引力定律在后来被人们所引用发现了海王星一样，麦克斯韦在《论物理的力线》一文中，预见了电磁波的存在。他指出，既然交变的电场会产生交变的磁场，而交变的磁场又会产生交变的电场，这种交变的电磁场就会以波的形式向空间散布开去。麦克斯韦的这篇论文，终于突破了法拉第的力线思想，作出了属于他的辉煌理论。这一年，他只有 31 岁。

然而麦克斯韦并未满足自己已有的成果而举足不前，他仍然向电磁学领域的更深处前进。1863 年，他在别人的帮助下完成了他的第三篇论文《论电学量的基本关系》，这是麦克斯韦电学研究中迈出的重要一步，在以往却常常被人忽视。在这篇论文里，他推广傅立叶在热的理论中开始的程序，宣布了同质量、长度、时间度有关的电学量和磁学量的定义，以便于提供对那种二元的电学单位制的第一个最完整透彻的说明。他引入了成为标准的记号，把量纲关系表示为用括弧括起来的质量、长度、时间量度的幂（音 mì）的乘积，带有各自的无量纲的乘数。在这一年，麦克斯韦已经找到了在电磁量与光速之间的一个纯唯象性质的环节。

1865 年，他发表了第四篇论文《电磁场的动力学理论》，为解决与光速之间的纯唯象问题提供了一个新的理论框架。它以实验和几个普遍的动力学原理为根据，证明了不需要任何有关分子涡旋或电粒子之间的力的专门假设，电磁波在空间的传播就会发生。在这篇论文中，麦克斯韦完善了他的方程式。他采用拉格朗日和哈密顿创立的数学方法，由该方程组直接导出了电场和磁场的波动方程，其波动的传播速度为一个介电系数和导磁系数的几何平均的倒数，这一速度正当等于光速。这一结果又再一次与麦克斯韦四年以前的推算结果完全一致。至此电磁波的存在是确定无疑的了。由此，麦克斯韦大胆的断定，光也是一种电磁波。法拉第当年关于光的电磁论的朦胧猜想，经过麦克斯韦精心地计算而变成为科学的推论，法拉第与麦克斯韦的名字，从此像牛顿与伽利略的名字一样，联系在一起，在物理学上闪烁着永久的光芒。麦克斯韦在一封信上曾谈及他的这篇论文，他说：

“我在完成一篇包含光的电磁理论，在我确信相反的理论产生以前，我认为这个理论是强大的武器。”

从 1865 年开始，麦克斯韦辞去了皇家学院的教席，开始潜心进行科学研

究，系统地总结研究成果，撰写电磁学专著。

六、《电磁学通论》

经过了八年的艰苦努力，1873 年，麦克斯韦的一部电磁学专著终于问世了，书名叫作《电磁学通论》。

在《电磁学通论》中，麦克斯韦比以前更为彻底地应用了拉格朗日的方程，推广了动力学的形式体系。这一时期前后，英国和欧洲大陆的数学家中间普遍倾向于更广泛地在物理学问题中使用分析动力学的方法，麦克斯韦的做法与数学家的方法不谋而合。而且他的方法和见地新颖，使很多人为之吸引。通过把这种流行的研究倾向动用于电磁学，他使时尚变成了他特有的结果。麦克斯韦采用风格极为新式的关于项的对称性与矢量结构的论证，以最普遍的形式表示出电磁系统的拉格朗日函数。麦克斯韦对拉格朗日方法的运用，就其几乎是通往物理学理论的一条新途径来说，这是第一次尝试。过了很多年，其他物理学家才充分地运用这一方法来研究电磁学领域。

在《电磁学通论》中，麦克斯韦用了一章的篇幅专门来谈磁光效应。因为他卓有成效地应用了对称性的考虑,他就使汤姆逊 1856 年作出的论证有了一个坚实的严格的基础，并且证明凡是对偏振光平面旋转的动力学解释都必定依靠磁场中的局部旋转。在后来的理论中，磁感应强度是一个轴矢量，而物质中的电子则绕外加场进行运动：这些是分子涡旋假说背后的真理部分。独具匠心的是，麦克斯韦并没有使自己的思考局限于一般的对称性论证上，他通过试图想出反例的办法来检验这一理论，他曾说：“ 我也已尝试了除我已宣布的那些假说以外的许多重要假说来解释磁光效应，并且对于可能产生旋转的条件正好被一开始未看到的其他条件推翻的情况感到惊愕。 ”

在《电磁学通论》中，麦克斯韦在完成了动力学类比之后的下一步是导出一组描述电磁场的 8 个方程式。这组方程式是按照《电磁学通论》中所采用的形式，列出在带有辅助方程的表格中。这些方程式所体现的原理是：电磁过程是由各个电荷或磁化体各自独立地对周围空间作用传递的，而不是由直接的超距作用传递的。关于运动的带电体之间的力的公式确实可以从麦克斯韦方程中推导出来，但该作用并不是沿着它们的连线，因此，只要考虑到同场之间的动量交换，它就能同动力学原理调和一致。

麦克斯韦叙述道：这些方程式是可以精简的，但“ 在我们进行探究的这个阶段，去掉一个表达有用的量，是得不偿失的。 ”后来他在他的第五篇主要论文中，也就是他 1868 年的《关于光的电磁理论的注释》中，他简化了这些方程组。

《电磁学通论》是一部经典的电磁理论著作，在这本大部头的著作中，麦克斯韦系统地总结了人类在 19 世纪中叶前后对电磁现象的探索研究轨迹，其中包括库仑、安培、奥斯特、法拉第等人的不可磨灭的功绩，更为细致、系统地概括了他本人的创造性努力的结果和成就，从而建立起完整的电磁学理论。这部巨著有着非同小可的历史意义，可与牛顿的《数学原理》（力学）、达尔文的《物种起源》（生物学）相提并论。从安培、奥斯特，经法拉第、汤姆逊最后到麦克斯韦，通过几代人的不懈努力，电磁理论的宏伟大厦，终于建立起来。

这本书的出版，理所当然地成了物理学界的一件大事，当时麦克斯韦只有 42 岁，已经回到剑桥任实验物理学的教授。人们早已通过他以前的几篇卓有见地的论文而熟识了他，他的朋友和学生以及科学界的人士对他的这本书

更是期待已久，争相到各地书店去购买，以求先睹为快，所以书的第一版很快就被抢购一空。

《电磁学通论》一书虽然被一抢而空，但真正能够理解书中所述理论的人却寥若星辰。过了一段时间，便有人发表文章，批评书的内容艰深难懂。在科学的道路上，这一切都是正常的，特别是高度抽象的麦克斯韦微分方程，毕竟不是 1＋1=2 这样的简单加法。仅仅用两个公式，几个数学符号，就包含了电荷、电流、电磁、光等自然界的一切与电磁有关的现象和规律，这在一般人的眼中和脑中，的确是不可思议的事情。另外，还有一个更主要的原因，那就是在麦克斯韦宣布了它的理论之后，一直还没有人真正发现电磁波，这使得他的理论更加陷入抽象。能否证明有电磁波存在，成了检验麦克斯韦理论的关键。所以许多物理学家都对此持怀疑态度，甚至连当年曾给予过麦克斯韦帮助的汤姆逊，也不敢肯定麦克斯韦的预言是否可信。

麦克斯韦的电磁理论，对物理学的贡献是超越时代的。但是，我们前面说过，麦克斯韦是一个思维跳跃性很大的人。在工作和科学上，他涉及的面也很广泛，在作出理论之后，他本人并没有再去深入钻研，去通过实验来发现电磁波，证实自己的理论。70 年代以后，特别是他任剑桥实验物理学教授以后，由于环境和工作条件的限制，麦克斯韦一直没有更多的机会从事电磁学实验，而与此同时，他把大量的时间和精力，投入到热力学和分子物理学的研究中。另外，麦克斯韦在物理学史上，是一名理论物理学家，正如他的学生弗莱明后来对他的评价：

“他从理论角度预言了电磁波的存在，但似乎从未想过要用任何实验去证明它的存在。”麦克斯韦与法拉第不同，这一点我们前面已经谈过，法拉第一生都在从事着实验研究，可以说没有实验就没有法拉第的成就；而麦克斯韦截然不同，他在伦敦国王学院五年间，仅从事过一些有限的实验研究，而且大多是气体动力学方面的。在他的住所屋顶，有一间狭长的阁楼，那是他的实验室，里面设备相当简单、陈旧，他的妻子常常为他当助手，生火炉，用以调节室温，从事气体功力学实验。

由于以上的种种原因，电磁理论在诞生以后，有相当长的一段时间没有得到承认，最初只有剑桥大学的一些青年物理学家支持这个理论。大多数人，包括很多卓有成就，在物理学界颇具威望的科学家们，都对未经过证明的新理论持怀疑态度，一方面，麦克斯韦的理论完美可靠，运算缜密；另一方面，当时还没有人发现或测定确实有电磁波的存在，于是多数人都只是观望。劳厄在著述《物理学史》中曾对此作出评论道孙：

“尽管麦克斯韦的电磁理论具有内在的完美性，并和一切实际经验相符合，但它也只能逐步为物理学家们所接受。他的思想太不同寻常，甚至象赫尔姆霍茨和波尔兹曼这样有异常才能的人，为了理解电磁理论也用去了好几年的功夫。”

在麦克斯韦生命的最后几年，他把全部精力都花在了卡文迪许实验室的建立工作上。从 1871 直至 1879 年他去世，麦克斯韦埋头于剑桥，一面建立卡文迪许实验室，一面进行整理卡文迪许遗著的工作。1872 年，这座实验室破土动工，1874 年竣工，修建经费是由一位鼓励科学事业的公爵捐赠的。麦克斯韦和剑桥的几名科学家建筑师一起对卡文迪许实验室进行了非常详尽的设计、使这座实验室体现出许多独创的特征：它有宽敞的走廊和楼梯，因为实验室需要很大的水平距离和垂直距离；一个无铁的磁测量室，里面装有放

置灵敏仪器的抗震桌，这些抗震桌又用从屋顶支架上垂下的钢琴弦维系着……在建造过程中，从建筑设计，到工程施工、仪器购置，乃至大门上的题词，麦克斯韦都亲自过问。1876 年以后，为了维持实验室的运转，麦克斯韦还把自己的大量积蓄拿出来，用以添置设备。麦克斯韦是卡文迪许实验室的创建人，也是第一任主任，后来接替他工作的，有约瑟夫·汤姆逊，而后是卢瑟福，这些人都是后世鼎鼎大名的第一流物理学家。这座实验室在 20 世纪，特别是在原子科学领域，培养出一大批优秀的科学人才。与建立实验室的工作同步，麦克斯韦在生命的最后几年中，从事着整理卡文迪许遗稿的工作。这也是那位公爵委托给他的任务。卡文迪许是 18 世纪一位性格孤僻的英国科学家，氢气就是他所发现的，水的化学成份也是他确定的，他还是第一个计算地球质量的人，在静电学上也很有研究。这个人终身未娶，为人腼腆，喜欢离群索居，在死后，留下了 20 多扎没有发表的科学手稿，大多是涉及数学和电学的，其中有很多有价值的东西被埋没了几乎半个世纪。整理这些科学资料，是一项非常必要而又细致的艰难的工作，麦克斯韦在这项工作上倾注了大量心血，作出了很大的牺牲，甚至放弃了自己的科学工作，耗尽了精力，终于使这笔宝贵的科学遗产免于埋没。

除了卡文迪许实验室的日常工作，麦克斯韦在剑桥每个学期还要担任一门课程的教学工作，内容是电磁学和热力学。于是课堂成了他传播自己理论的讲坛。他利用讲台，热心地宣传电磁理论，推广新的学说。可惜的是，他的听众并不多。他本身就不是一个善于讲演的讲师，更何况他所讲述的电磁学理论与当时的传统物理学大相径庭，而又如此高深。

1878 年 5 月，他曾举行过一次有关电话的科学普及演讲，电话是当时的一个新生事物。1875 年，贝尔发明电话，次年取得了专利；1877 年，爱迪生发明了“炭纽”送话器。这些人类电讯史上的新发明引起了麦克斯韦莫大的兴趣，也许他当时曾有过某种预感，有一天他的理论将会对人类、对人类的文明事业作出贡献。

麦克斯韦生活的后期充满了不幸与苦恼。在事业上，他的学说不被时人所理解；在生活上，他的妻子长期患病。这两个不幸，使他精疲力尽。妻子病后，整个家庭的秩序陷于混乱。麦克斯韦是个对妻子体贴入微的人，为了看护照料她，麦克斯韦有时甚至整整三个星期没在床上睡过觉。就是在这样的情况下，他的演讲、他的授课，他的实验室工作，却从来没有中断过。然而，过度的焦虑和劳累，终于夺去了他的健康，他的同事们也注意到，这位无私的、有为的科学家正在渐渐消瘦下去，面色也愈来愈苍白。然而这个伟大的学者对科学的热忱和执着的追求，却从来没有衰退过。

1879 年是麦克斯韦生命的最后一年，这一年的春天似乎来得很晚，天气乍暖还寒。麦克斯韦的健康状况已经明显恶化，他的病与 40 多年前母亲的病一样。就是这样，他仍然坚持着工作，仍然站在讲台上，宣讲他的电磁理论。在他的课堂上，这时只有两名学生，一个是来自美国的研究生，另一个就是后来发明了电子管的弗莱明。晚年，孤独、疾病、劳累、未老先衰伴随着他，而这个注定将要不朽的学者仍然倔强地、步履艰难地走上讲台，向人们宣讲自己的学说。

1879 年 11 月 5 日，麦克斯韦因病不治去世，病因是肠癌，终年仅 49 岁。近代物理学史上一个可以与牛顿相提并论的伟人就这样早早去世了，这是科学界的一个重大损失，也是全人类的重大损失。他的理论为近代的科学事业

开辟了一条崭新的道路，他的功绩在生前却未得到应有的重视。这位科学巨匠就这样在曲高和寡、默默无闻中死去了，在他死后的许多年，在另一个伟大的物理学家赫兹证明了电磁波存在以后，人们才意识到麦克斯韦的价值所在，并公认是“ 自牛顿以后世界上最伟大的数学物理学家 ”。

七、身后

赫兹是德国的一位青年物理学家。麦克斯韦的《电磁学通论》发表之时，他只 16 岁。在当时的德国，人们依然固守着牛顿的传统物理学观念，法拉第、麦克斯韦的理论对物质世界进行了崭新的描绘，但是违背了传统，因此在德国等欧洲中心地带毫无立足之地，甚而被当成奇谈怪论。当时支持电磁理论研究的，只有波尔茨曼和赫尔姆霍茨。赫兹后来成了赫姆霍茨的学生。在老师的影响下，赫兹对电磁学进行了深入的研究，在进行了物理事实的比较后，他确认，麦克斯韦的理论比传统的“超距理论”更令人信服。于是他决定用实验来证实这一点。

经过不懈的动力，1886 年，赫兹经过反复实验，发明了一种电波环，用这种电波环作了一系列的实验,终于在 1888 年发现了人们怀疑和期待已久的电磁波。

赫兹的实验公布后，轰动了全世界的科学界，由法拉第开创、麦克斯韦总结的电磁理论，至此取得了决定性的胜利。麦克斯韦的伟大遗愿终于实现了。

这一年成了近代科技史上的一座里程碑，赫兹的发现具有划时代的意义，他不仅证实了麦克斯韦所发现的真理，更重要的影响是导致了无线电的诞生，开辟了电子技术的新纪元。更实际一点说，赫兹使麦克斯韦完美的创见变成了客观现实。

在这以后不久，人们将电磁波运用到实际生活的各个方面，无线电技术广泛涌现并投入应用：无线电报、无线电广播、无线电导航、无线电话、短波通讯、传真、电视、微波通讯、雷达以及遥控、遥测、卫星通信、射电天文……无一不是这一变革的产物，而这些现实生活中与人类密不可分的现代发明，又无一不是以麦克斯韦的电磁理论为基础的。正是因为麦克斯韦的电磁理论为契机，整个世界发生了飞速的变化，人类生活质量有了明显的提高，直至现在，麦克斯韦的电磁理论还在对我们的现实生活产生着深远的影响。他的理论将永远光照史册！