

# 物理实验室的创设及其意义

胡升华<sup>†</sup>

(中国科学技术大学科技史与科技考古系 合肥 230026)

2023-10-12收到

† email: shhu1961@sina.com

DOI: 10.7693/wl20231208

19世纪,热力学、电磁学和能量科学的发展使精确测量成为物理研究的首要原则,从而对实验室产生了巨大的需求,大学教学和研究物理实验室也因此19世纪60年代蓬勃发展。开尔文及其同时代物理学家基于实验室工作的科学成果和技术发明,有效地促进了工业文明发展和社会进步,同时也在科学研究、工业应用和教育等方面为物理学家创造了稳定的职业需求,物理学家和物理实验室也因此获得了足够的生存和发展空间,物理学建制化得以迅速实现。

虽然物理学在我们人类今天的生活方式中发挥着重要作用,但在19世纪后半叶以前,并没有物理学家这个职业,甚至“物理学家”这个名称也不存在,那时物理学的发展呈现出非系统性、业余性、个体化的特征。开展物理实验研究在当时是一件奢侈的事情,只有具备相当的财力才可以获取所需的实验设施,拥有自己的个人实验室;大学通常是教育的中心,而不是新知识的生产中心。在19世纪最后三分之一时间内,公共物理学教学和研究实验室的建立与推广在物理学建制化过程中,起到了至关重要的作用。实验室是物理学家安身立命之所,没有实验室,就没有物理学的根基。

## 1 物理实验与物理学家

### 1.1 物理实验

古代一直到中世纪,我们尚未发现有物理实验室的记载,亚里士多德应该是不做实验的,阿基米德是否做实验似乎没有直接的证据。希斯用现代符号体系编辑的《阿基米德文集》引言中介绍了阿基米德的许多机械发明,如滑轮、投射装置、农田灌溉机械等,但这对他而言,“只不过是几何学变化的游

戏”<sup>[1]</sup>,只需根据几何原理制造就可以了,未必需要亲自实验。传说阿基米德通过浮力实验,解决了金质王冠中是否掺有金属银的问题。在《阿基米德文集》(命题7)中给出了用浮力定律的检验方法,原理上简单明了,但实际操作却比较麻烦,需要一个体积与待测王冠相等的纯金王冠和一个同体积的纯银王冠才能比较出来。由此看来,阿基米德是否真正做了这个实验是很值得怀疑的。

伽利略(Galileo Galilei, 1564—1642)有令人信服的实验记录,他在《关于两门新科学的对话》中多处谈到实验。比如在检验匀加速运动物体通过的距离之比等于时间平方之比这个定律时,他设计了一个铜球从光滑斜面向下滚动的实验,并非非常详细地描绘了实验细节<sup>[2]</sup>:“为了测量时间,我们用一个大的盛水的容器,把它放在高处;在容器的底部焊上一根小直径的能给出细射流的水管,在每一次(铜球)下落的时间,我们把射出的水收集在一个小玻璃杯内,……在每一次水下落后,这样收集的水都在非常精密的天平上被称量;这些重量的差别和比例给了我们时间的差别和比例,我们以这样的精度重复操作了许多次”,“在成百次重复的这种实

验中,我们总是发现通过的距离之比等于时间的平方之比”。

我们认为,托里拆利(Evangelista Torricelli, 1608—1647)和帕斯卡(Blaise Pascal, 1623—1662)关于大气压的实验测量有着标志性意义。我国物理学事业的开创者之一叶企孙高度重视物理实验,他一生撰述不多,却特别为这两位物理学家写了纪念文字<sup>[3,4]</sup>,高度评价他们的实验工作:“托里拆利的水银柱实验,是装置简单而有重要意义的实验。它决定性地证明了大气是有压力的,并且建立了测量大气压力的基本方法。在人类研究气体性质与液体性质的历史过程中,这个实验是划时代性的”。帕斯卡的实验显示,“大气压随地表高度变化,进一步证明大气压强的存在,是物理学发展史上的一件大事”。

托里拆利和帕斯卡的实验具备了重大物理实验的全部要素:

(1)由物理假设或物理猜想出发,最经济合理地设计验证实验,完成实验验证过程,证实物理假设;

(2)有实验设施、实验过程、实验结果的完整记录;

(3)实验具有普适性,没有时间、地域限制,可以随时随地重复;

(4)实验带来了物理观念的重大变化,推翻了传统的“自然憎恶真

空”的观点。

伽利略、托里拆利、帕斯卡等人拉开了近代实验物理的大幕，建立了物理学研究的实验方法。然而，在16、17世纪，做物理实验是有一定风险的，一些教士们指责实验是对教义的威胁；实验也危及道德和精神生活，是对大学的破坏。以至于英国皇家学会不得不出面为实验正名，郑重其事地论证实验对教育无害，对大学无害<sup>[5]</sup>。

## 1.2 私人实验室

19世纪以前，几乎所有的物理实验室都是属于个别研究者所有或是它们的保护人所有的私人实验室<sup>[6]</sup>。“最早的物理实验是在私人实验室做的。研究者通常把他的住宅或房间的部分改造成科学研究的工场。当牛津的玻意耳(Robert Boyle, 1627—1691)进行气体弹性研究，证明了用他的名字命名的定律时，他使用了一根很长的管子，以致他‘不能在房间里方便地使用它’，因此他‘只得在楼梯上使用它’。牛顿在剑桥的寓所里完成了他关于白光色散为各种色光的经典实验。富兰克林在风筝实验以后，在他费城的家中竖起了一根绝缘铁杆，以便他自己不会在一旦空气大量带电的时候失去做实验的机会”<sup>[6]</sup>。

物理实验设备越来越昂贵，只有有钱人才养得起一个实验室。柏林大学的马格努斯(Heinrich Gustav Magnus, 1802—1870)是一位犹太富商的儿子，继承了大笔财富，他有条件在自己的住所里划出几个房间进行物理实验研究<sup>[7]</sup>。他的实验室在19世纪40年代是世界上设备最

好的实验室之一，克劳修斯(Rudolf Clausius, 1822—1888)、亥姆霍兹(Hermann von Helmholtz, 1821—1894)和魏德曼(Gustav Heinrich Wiedemann, 1826—1899)等著名的德国物理学家都是这个实验室的受益者。

私人实验室更常见的是设在地窖、酒窖、马厩和仓库这类肮脏或阴暗的地方，实验者的意志时常要经受潮湿、寒冷的考验。一直到19世纪初，英国和德国的大多数大学教师都认为，大学是教育学的中心，而不是新知识的生产中心，实验研究不利于学校传授既有知识的主要任务<sup>[8]</sup>，因此实验室在大学里还不存在合理性。

## 1.3 “物理学家”的产生

直到19世纪后半叶，在任何国家从事科学研究几乎都不可能谋生<sup>[9]</sup>。任何一个专业的生存和发展都取决于社会需求，19世纪科学的进步使得社会对于获取科学服务的需求大幅增加，催生了“科学家”职业，“自然哲学”也逐渐分裂成许多专业学科。

在19世纪初的英语词汇中没有“物理学家”这个词。它是由威廉·惠威尔(William Whewell, 1794—1866, 中文译作胡威立)创造的<sup>[8]</sup>，用来描述他认为的一种新的自然哲学家，就像他1833年创造了“科学家”这个词<sup>[10]</sup>来描述一种新的从业者一样。

胡威立的名字中国人很早就熟悉，他的《初等力学教程》(*An Elementary Treatise on Mechanics*)一书由英国传教士艾约瑟和中国数学

家李善兰合译成中文，以《重学》为书名于1859年刊行<sup>[11]</sup>。胡威立善于创造新词，他还造了ion(离子)，cathode(阴极)等词。

在19世纪的大部分时间里，没有明确地、直接地定义什么是“做”物理。现在我们熟知的从中学到大学、到研究机构，这种物理学家的职业模式还不存在<sup>[8]</sup>。到了19世纪后半叶，物理学家终于通过电磁学、热力学和能量科学的发展，为自己找到了角色定位：

与自然的关系——物理学家研究自然、理解自然、解释自然，是自然的代言人；

与公众的关系——物理学家通过对自然力量的理解、把握、运用和改造，为公众谋福利；

与国家的关系——物理学家是国家荣誉的贡献者，国家力量的捍卫者。

19世纪后半叶物理学的发展，也让实验室从阴暗的角落走向前台，成为大学不可或缺的配置。

## 2 最早的物理教学实验室

德文“Laboratorium”(实验室)一词意指化学实验室<sup>[6]</sup>，1819年出版的《大英百科全书》给“实验室”的定义是：一个配有化学仪器的地方，用于进行化学制造或实验研究<sup>1)</sup>。《牛津英语词典》第二版(1989)对“实验室”的定义：一座用于开展自然科学研究的建筑。起源于化学，在化学上用于化学制品、药品和类似产品的加工或制造<sup>2)</sup>。

关于化学实验室的起源及其演化，我们不做更多的讨论，据伦敦科学博物馆莫里斯的观察，化学实

1) 原文是：A place furnished with chemical apparatus and entirely devoted to the different operations of chemistry whether on the scale of chemical manufacture, or for the purpose of experimental research.

2) 原文是：A building set apart for conducting practical investigations in natural science, orig. and esp. in chemistry, and for the elaboration or manufacture of chemical, medicinal, and like products.

验室有好几条发展路径,分别与制药、矿冶和炼金术相对应<sup>[12]</sup>。

这里表述的物理实验室与很早就出现的天文观测台站还是有显著区别的,首先,实验室概念源于化学;其次,物理实验存在着实验者对观测对象的人工干预。有鉴于此,天文观测台站不在本文讨论的范围。

## 2.1 演示实验

19世纪初,大学的职能一般是教育,而不是科研,因此研究能力不是获取大学自然哲学教授职位的先决条件。1831年,德国哥廷根大学要选一位自然哲学教授填补空缺,高斯(Carolus Fridericus Gauss, 1777—1855)回答学校当局关于人选的咨询时强调,最重要的是选一个可以通过演讲吸引听众的人。这个时候,即使以高斯这样杰出的科学家的眼光看,教授的研究能力在大学也是次要的<sup>[8]</sup>。

1799年英国皇家研究院(Royal Institution)成立时,按照发起人伦福德(Benjamin Thompson(Rumford), 1753—1814)的设计,科学研究并不是其目标,他想做的是研究和讲授科学发现在改进艺术和制造业方面的应用,公开传播有关新的有用发明的信息,并为工匠提供一所学校<sup>[13]</sup>。19世纪20年代法拉第(Michael Faraday, 1791—1867)创设的“星期五演讲”正体现了皇家研究院的宗旨(图1)。

为了提高演示实验的效果,表演者往往会精心构思演示内容,并充分利用一些演示技巧,来吸引观众,提高科学传播效果。由于当时物理学还没有在工业文明和社会生活中充分显示出其威力,只能靠眼

花缭乱的演示来吸引观众,体现物理学家的价值,拓展生存空间。那时的实验室通常是演讲厅的附属设施,为演示实验提供辅助和准备工作。

20世纪五六十年代,我国一些大学如清华大学<sup>[14]</sup>、中国科学技术大学<sup>[15]</sup>还把为教学服务的物理演示实验室直接称为表演室,对于大型实验,学生可以去表演室观看教师的演示;对于小型实验,教师也可以把实验设备从表演室搬到教室去演示。

## 2.2 最早的物理教学实验室<sup>3)</sup>

1824年德国化学家李比希(Justus von Liebig, 1803—1873)在吉森大学建立的实验室,从时间、效果、规范性和影响力等方面衡量,被认为是最早的、学生参与实验和研究的化学实验室。

英国《自然》杂志在1871年1月发表了一篇皮克林(Edward Charles Pickering, 1846—1919)的文章,介绍了他在麻省理工学院(MIT)引入物理实验教学的情形,1869—

1870年有60名学生在同一个实验室进行物理实验。他认为MIT是美国最早进行物理实验教学的机构之一<sup>[16]</sup>。皮克林后来被哈佛大学校长艾略特引进到哈佛大学任天文台台长。

皮克林的文章引起了英国皇家学会会士亚当斯(William Grylls Adams, 1836—1915)的注意,他不想让美国人抢走最早进行物理实验室教学的荣誉,他指出,牛津大学的克利夫顿教授(Robert Bellamy Clifton, 1836—1920)最早提出建议,物理实验室教学应该成为物理学课程的组成部分,时间不晚于1867年。而他自己所在的国王学院立即将实验室教学理念付诸实施,于1868年建立了教学实验室。亚当斯在文章中描述了实验室布置、实验内容和实验组织的一些细节<sup>[17]</sup>。

皮克林和亚当斯的文章都是记述当时发生的事情,而不是许多年前事件的历史回顾,因此可信度是很高的。但皮克林和亚当斯的文章似乎并没有引起同行的广泛关注。1908年,《自然》杂志的一篇纪念英国物理学家艾顿(William Edward



图1 法拉第在皇家研究院实验室的场景(版画)。右边楼梯可以进入演讲厅(图片来源于 Bence Jones, *The Life and Letters of Faraday*, 1870)

3) 张文裕、李国鼎于1936年曾合作撰写长文介绍他们留学的卡文迪什实验室的历史和研究特色,文章开头部分也对英国最早的物理实验室进行了很精要的考证。见:张文裕,李国鼎.英国剑桥大学物理实验室概况(上).科学世界,1937,6(6):454。

Ayrton, 1847—1908)的文章再次提出物理教学实验室的话题。文章说,从1879年到1884年,艾顿是芬斯伯里技术学院的应用物理学教授,他在那里创建的教学体系与以前存在的任何形态都有着根本的不同,现在在这个国家的每一所技术学院都可以找到它,但当时只有一所学校,几乎只有一个实验室,而且几乎只有一名工程师,可以提供这种服务、教育和经验<sup>[18]</sup>。文章显然认为是艾顿首创了物理教学实验室。

这篇纪念艾顿的文章立即受到质疑,时任伯明翰大学校长的洛奇(Oliver Lodge, 1851—1940)马上撰文反驳:“如果不提出抗议,我认为伦敦大学学院(UCL)和国王学院的学生物理实验室的先驱性工作有被忽视的危险。请允许我说,1872年以前,这些大学就有学生从事物理实验室工作。1866年,UCL的福斯特教授(George Carey Foster, 1835

—1919)亲自为我开设的定量实验室教学课程具有很高的价值,与我所知的任何一个学生实验室相比都不会黯然失色”<sup>[19]</sup>。

UCL的比尔教授所著《大学学院物理天文系史1826—1975》<sup>[20]</sup>根据校历文字记载而不是当事人回忆,对英国最早的学生物理实验室进行了探讨:1865年,UCL理事会决定将原先的“自然哲学和天文学”教授席位分解为数学和实验物理两个独立的教授席位,福斯特受聘担任实验物理教授,1866年7月,理事会通过福斯特的实验室建设计划,并拨付建设经费,1866—1867学年UCL校历列出实验室课程内容和收费标准,1866年,18名学生注册参加了英国最早的物理实验室课程。因此,福斯特于1866年在UCL建立了教学实验室是可以肯定的。顺便一提,20世纪30年代,我国曾有几位物理学家在福斯特实验室进修学习,如钱临照、江仁寿和周如松<sup>[21]</sup>。

关于最早的物理教学实验室,威廉·汤姆孙(William Thomson, 1824—1907,即开尔文勋爵)在威尔士班戈大学物理实验室揭幕典礼上的讲话(1885年)又有不同的说法:“我相信,格拉斯哥大学的物理实验室是现在遍地都是的物理实验室的鼻祖”<sup>[22]</sup>。

1845年,汤姆孙被任命为格拉斯哥大学自然哲学教授,1850年,他把大学里一个废弃的酒窖改造为实验室(图2),进行金属的电动力学的实验研究。许多实验观察一个人无法进行,他便邀请学生协助实验。后来学生也开展独立的研究。1856年,汤姆孙在《伦敦皇家学会哲学汇刊》上发表了题为《金属的电动力学性质》的长文,在这篇文章首页的脚注中,汤姆孙对至少4

位学生在实验中给予的协助表示了感谢<sup>[23]</sup>。这是英国关于学生参与实验室研究工作的最早记录。但当时汤姆孙的实验室还具有私人实验室的特征,尚不能算正式的教学实验室,学生的工作旨在为教授提供帮助,同时学生也获得一些实践经验,不是学校的课程要求和学位要求。

类似汤姆孙于1850年在格拉斯哥大学建立自己的个人实验室,并让学生参与实验的情况,德国也有,比如1833年或1834年,威廉·韦伯(Wilhelm Weber, 1804—1891)在哥廷根大学的实验室;1846年,菲利普·冯·乔利(Philipp von Jolly, 1809—1884)在海德堡大学的实验室,以及前面提到的柏林大学马格努斯的实验室等等。但物理实验室成为大学的一种制度安排也是19世纪70年代以后的事<sup>[24]</sup>,与英国的情形并无很大差异。

到底谁建立了第一个正式的机构物理教学实验室可以有争论,但这不是最重要的问题,重要的是,为什么机构教学和研究实验室突然会集中地出现(不仅是物理学领域)?这被一些学者称为形成了一场“实验室革命”。

### 3 实验室革命

19世纪的后三分之一,科学实验室,特别是物理实验室的兴起,被学者们评论为出现了一场实验室革命<sup>[25]</sup>。物理实验室的创设和推广是19世纪物理学学科建制化的重要体现。研究型大学的发展、大学研究实验室的创设和发展推动了科学的专业化。这一时期,英国学术机构中物理实验室的出现和激增被视为维多利亚科学的一个显著特征。

1884年,美国《科学》杂志的一篇题为《实验室与现代科学》的



图2 老格拉斯哥大学。汤姆孙的实验室位于右下角的黑影处(图片来源于 Silvanus P. Thompson, *The Life of William Thomson*, 1910)

文章有这样一段评论：“在过去的40年里，科学发现所依据的物质环境发生了彻底的变革。40年前，几乎没有我们今天认为勉强过得去的实验室。现在，世界各地的每一所重要和享有盛誉的大学都有了宽敞宏伟的实验室，实验室是我们这个时代最重要、最具影响的科学创造！”<sup>[26]</sup> 1885年开尔文勋爵在班戈大学物理实验室揭幕典礼上的讲话也指出：“物理实验室现在已经变得相当普遍。现在没有一所大学能生存，除非它有一个设备齐全的实验室。”

### 3.1 物理实验室的兴起

19世纪60年代，物理教学实验室在英国高校如雨后春笋般集中出现。表1给出了这个时期出现的正式的大学物理教学实验室的情况<sup>[27]</sup>。

1866年在物理实验室建制化的过程中是一个标志性年份，对此，我们在第四部分再细述。

### 3.2 实验室革命是科学革命的回音

19世纪的科学革命是以电磁学、热学热力学和能量科学的发展为标志的，热、电、磁、光相互联系的实验研究否定了不可称量流体(燃素、热质、电流体)的存在，欧洲各地的科学家在各自的实验室中为物理世界的统一性找到了越来越多的证据。19世纪中期关于能量守恒与转化的研究和发现，催生了一门为现代工业时代量身定制的强大的新科学——能量科学，新科学离不开实验室，实验室革命只不过是科学革命的自然回应。新科学带动了机械、通信、电力等产业的发展，产生了广泛的物理学家的职业需求，物理学家不再是“毛”，需要黏在一张皮上，物理学研究、工业

表1 英国最早的一些隶属学校建制的大学物理实验室

学校名称	创立时间	首任实验室主任
格拉斯哥大学	1866	汤姆孙(William Thomson)
伦敦大学大学院	1866	福斯特(George C. Foster)
爱丁堡大学	1868	泰特(Peter G. Tait)
伦敦大学国王学院	1868	亚当斯(William G. Adams)
欧文斯学院(曼彻斯特大学)	1870	斯图尔特(Balfour Stewart)
牛津大学	1870	克利夫顿(Robert B. Clifton)
皇家矿业学院	1872	格思里(Frederick Guthrie)
都柏林皇家科学学院	1873	巴雷特(William Barrett)
贝尔法斯特女王学院	1873	埃弗雷特(Joseph D. Everett)
剑桥大学	1874	麦克斯韦(James Clerk Maxwell)

应用、人才培养等方面的稳定需求是物理学专业化发展、机构物理实验室兴起的时代背景。

### 3.3 精确测量成为物理学研究的首要原则

19世纪物理学发展的特征使精确测量成为物理学研究的首要原则，这个时期一些著名物理学家对于精确测量有过许多令人印象深刻的阐述。

汤姆孙说，除非建立了对现象进行数值计算的实用方法，否则物理科学的任何分支都不可能取得真正的进步，物理或化学实验室的大部分工作必须是测量<sup>[28]</sup>，几乎所有最伟大的科学发现都只不过是精确测量的回报<sup>[25]</sup>。

麦克斯韦(James Clerk Maxwell, 1831—1879)也曾指出：从数学的观点看，任何一种现象最重要的方面就是可测量的问题<sup>[29]</sup>；严格地说，实验研究的最终目的，是测量我们已经看到的東西，以获得某种量级的数值估计<sup>[30]</sup>。

精确的测量实践不仅是汤姆孙早期在格拉斯哥大学的创新性教学和研究工作的特点，而且后来在十九世纪的后三分之一也成为了英国物理学家群体的共性<sup>[25]</sup>。

19世纪经典物理学的巨大成功

以及实验室精确测量所占据的突出地位，使得物理学共同体中流行着一种看法，认为物理学基本原理的建构已经基本完成，所有伟大的物理常数都将得到近似估计，留给物理学工作者的唯一职业将是将这些测量工作精确到小数点的另一个位置。物理学的未来，将只有在小数点第六位后面去寻找。这种观点在1871年就已流行，因为1871年麦克斯韦在他的剑桥大学实验物理教授就职演说中就批评了这种观点：“这种观点并不适合我们大学，大学与技艺精湛的工场是有区别的。精确测量的回报将会是新的科学发现”<sup>[30]</sup>。

这一时期大学实验室“精确测量”教学的具体内容涉及气体力学、热、光、电和磁的全面实用知识。如教学生使用气压计、温度计、高差计和湿度计来测定固体和液体的比重，以及气体在不同压力和温度下的相对密度；测量固体和液体的膨胀量及其比热和潜热；测量熔点和沸点；测量物体热导率和电导率；测量透镜的焦距，各种透明物质的折射率、色散率，以及太阳光谱固定线的相对距离；研究光的偏振原理，物体的磁性和电性，以及电学发展的不同方法；学会用绝对测量法测定电池的电动势和电

阻,测定电流强度、电报电缆的电阻,了解电报原理,等等<sup>[17]</sup>。

“精确测量”的物理观念深刻影响了世纪之交的美国物理学家,比如,迈克尔孙、密立根和康普顿等等,从而也对一些早期在美国留学的中国物理学家产生了重大影响,如叶企孙关于普朗克常数的精确测定,胡刚复的X射线光谱实验,吴有训的康普顿效应实验,赵忠尧的 $\gamma$ 射线散射(正负电子对的产生)实验等等,使中国物理学从一开始就形成了牢固的实验物理传统。

## 4 物理实验室的崛起

物理实验室的创设和发展并非是同一种模式,不同实验室的主旨和功能定位也有差异,下面通过几类实验室的比较,对早期实验室的发展情况进行更全面地描述。

### 4.1 皇家研究院的实验室

皇家研究院成立于1799年,它并不隶属于皇室,也不是一个官方机构,以社会捐赠和科学活动收益维持研究院的运转,是一种社会捐赠、基金会管理模式。

在“科学家”这个职业尚未形成、专业科学研究机构和公共物理实验室还没有先例的时代,皇家研究院发展的历史为我们提供了一个观察窗口,帮助我们了解科学家如何慢慢争取到自己合适的社会角色,以及专业科学研究机构和实验室如何确立其社会合理性的过程。

在皇家研究院成立的早期阶段,其最主要的功能是通过科学演示进行科学传播,此外,还意图通过教学(如为圣乔治医院的医学生开设化学讲座课程)、学术咨询与商业服务扩大财源。设在研究院的实验室首先是为科学讲演所需要的演示

实验提供支持的。由于研究院一直处于财政困难的状况中,维持日常运转已属不易,要让管理层将资金投入至无利可图的科学研究中去是很不现实的<sup>[31]</sup>。在这种情况下,科学研究主要是教授的业余行为,不能作为研究院的主要任务之一。为了研究院的生存,在1820—1940年,物理学家法拉第不得不花费大量时间为客户做水质分析,以弥补经费不足<sup>[32]</sup>。

专业科学家与专业研究实验室后来之所以能在皇家研究院得以确立其地位得益于下面几个因素:

(1)由于研究院开设的星期五晚间讲座和圣诞节系列讲座的巨大成功,研究院的社会地位日益提升<sup>[33]</sup>,科学家的话语权也相应提高;

(2)戴维、法拉第、丁铎尔和杜瓦这些知名教授通过科学研究成果,不仅为研究院,也为整个国家赢得了巨大声誉,证明科学研究事业是值得投资的事业;

(3)19世纪下半叶,科学对工业文明和社会进步带来的促进作用,让科学家和实验室获得了稳固的生存和发展空间。

到了19世纪后半叶,皇家研究院终于把没有功利主义目的的“纯粹”研究确立为皇家研究院的首要目标。其《招股说明书》也相应做了调整,阐明该机构的目标,首先是促进科学研究,然后是教授科学原理,并展示这些原理在实际问题中的应用。皇家研究院从一个通过教学促进有用知识传播的机构,变成了一个通过实验促进科学进步的机构。

### 4.2 威廉·汤姆孙的实验室

威廉·汤姆孙的实验室是另一类实验室的代表——一开始是教授个

人的实验室,随着实验室的重要性得到公认,被收编成为大学官方机构,演变为机构实验室。

汤姆孙的实验室工作在英国实验室的建制化进程中起到了相当重要的作用。他的实验室很有特色,兼具后来企业实验室的功能,在产品的生产(温度计、静电计、电流计)和专利的获取方面都很有成绩。这种独特性与汤姆孙的成长环境和他的科学理念是密切相关的。19世纪二三十年代,汤姆孙所生活的城市格拉斯哥已经是商业、棉纺、造船中心,他与同道志在实践工业和科学利益的结合。他认为:科学的生命和灵魂是它的实际应用……在物理科学中,从世界之初到现在所取得的许多最伟大进步都是受一种精诚的愿望所驱动——用掌握的物质特性知识造福人类<sup>[34]</sup>。汤姆孙在精确测量中追求理论、实践和利润(经济利益)的深度渗透,他善于把数学思维与物理原理结合,把物理特性变成可以测量的物理量,自己开发测量仪器,通过精确测量,把握物理特性,指导工业实践。

1850年,他在格拉斯哥大学一个废弃的酒窖里建立了自己的研究实验室,把热与电磁现象的定性分析转变为精确测量,在热力学理论和研究方法上做出了重要贡献。

利用细致的实验手段和数学分析解决跨大西洋电缆信号传输问题,是体现他实验室工作风格的典型案例,也是奠定他“国家英雄”般声誉的著名案例。

在2000多英里的距离上电报信号传播的时间延迟如何测算、有哪些影响因素?1858年第一条大西洋电缆的失败就在于没有科学地解决这些问题。汤姆孙通过数学推导得出信号在电缆传输时间延迟的公

式, 信号的时间延迟正比于电缆电阻、电容和电缆长度平方。关于电阻测量, 汤姆孙也发明了一种新方法: 根据热力学理论中热和功的等效性, 他将电流产生的热量设为电流所做的功, 并由此得出一个通过“产热量”度量“绝对”电阻的关系式。从这个关系式, 汤姆孙马上意识到, 电缆电阻是什么, 其实就是电流做的功转化成了热量, 而铜线的品质、铜线的均匀性都是发热的重要因素<sup>[34]</sup>。他测量了不同厂家的铜线, 发现电阻差别很大。至此电缆信号延迟的问题得到解决, 铜线要足够粗, 铜材料要足够纯, 铜线要保持均匀, 不能混用不同厂家的电缆。汤姆孙的理论推导和精确测量方法最终战胜了电报公司工程师的经验方法。

电报是第二次工业革命的一个标志, 也是帝国势力扩张的有力工具。1858年第一条大西洋电缆的失败, 以及1866年第二条电缆的成功, 有巨大的广告效应: 给汤姆孙及其所代表的物理实验室和精确测量理念带来了巨大的影响力和市场。1866年汤姆孙因其巨大贡献, 被授予开尔文爵士头衔, 他的实验室也获得正式身份, 告别了简陋的废弃酒窖和师带徒的私人作坊性质, 成为学校事业的一部分。1866年由此成为实验室发展一个标志性年份, 大学物理实验室建制化拉开序幕(表1), 随后很快出现了物理实验室建设的热潮, 并波及全球。

1884年, 美国《科学》杂志文章像是一曲实验室颂歌: 现有的实验室有两个功能, 一是为学生提供教育, 二是为研究人员提供机会。实验室的倍增和扩大源于人们日益清晰地认识到一个真理, 第一手知识才是唯一真正的知识。学生们不

能满足于被告知, 而必须亲自观察, 翻译成一条教学法就是: 教科学, 要有一个实验室; 学科学, 要去实验室。实验室的创设解释了目前科学进步的速度为何如此飞快<sup>[26]</sup>。

### 4.3 卡文迪什实验室

到19世纪末, 剑桥大学卡文迪什实验室毫无疑问是教学和研究方面最成功的实验室之一, 卡文迪什实验室几乎是实验物理学的同义词<sup>[8]</sup>。然而, 物理实验室和实验教学在剑桥大学这个古老的机构中占据一席之地绝非易事, 它与剑桥大学的传统是有一定距离的。直到19世纪中叶, 剑桥大学一直保持着学术和贵族特权阶层的堡垒角色。围绕数学荣誉学位考试(Tripos考试), 剑桥形成一种精英文化, 以严酷的数学训练, 培养自律、思维严谨和具有钢铁般意志的“产品”(学生), 以便他们将来更好地为教会服务或参与国家治理。

早期Tripos考试内容除了数学之外, 还包括力学、流体力学、天文学、引力理论和几何光学等学科的数学理论。1849年剑桥大学数学研究委员会就Tripos考试范围曾有这样的建议: “考虑到考生现在关注的科目数量众多, 以及对出题范围存在疑问, 委员会建议不将电、磁和热的数学理论作为考试科目”<sup>[35]</sup>。

然而, 1866年以后, 面对时代的潮流, 剑桥大学也不得不改变对实验物理教学与研究的态度。1868年6月2日, 大学理事会批准将热学、电学和磁学纳入数学Tripos荣誉考试。同时, 理事会还任命了一个委员会就剑桥大学引入实验物理教学与研究进行调查。委员会于1869年2月提交的报告重点讨论了如何提供热学、电学和磁学的课程

指导问题, 建议专门设立实验物理教授席位, 相应地新建物理实验室, 并给出了详细的实验室建筑花费、教授及其助理人员年薪的经费预算和教授席位管理办法等<sup>[36]</sup>。但是, 让剑桥大学一下子拿出6300英镑的巨款建设实验室在当时有很多困难和阻力, 为了化解校内保守势力的抵制, 时任剑桥大学校长的德文郡七世公爵威廉·卡文迪什(William Cavendish, 1808—1891)宣布, 愿意自己个人出资, 资助实验室项目。他的慷慨解囊使卡文迪什实验室建设项目得以立即实施, 实际上仅实验室大楼就花费了8450英镑, 远远超过了预算。公爵不仅支付了这笔费用, 还继续为实验室提供仪器, 在实验室开放三年后, 首任实验室主任麦克斯韦报告说“它具备了当前科学研究所需的所有仪器”<sup>[37]</sup>。

卡文迪什实验室的建设开辟了个人资助大学科学研究工作的新模式, 同时卡文迪什实验室也与以往的实验室有重要的区别。以往实验室往往具有个人领地的属性, 注重满足个人的研究兴趣, 规模也不大; 而卡文迪什实验室则是要建设成为一个具有相当规模的“制造”科学发现的工厂<sup>[36]</sup>, 这是研究成果的新的产出模式。

1874年, 卡文迪什实验室建成, 根据J.J. 汤姆孙(Jospeh John Thomson, 1856—1940)的回忆, 麦克斯韦无意在新建的卡文迪什实验室里做自己的原创实验研究, 他大部分时间都花在整理亨利·卡文迪什(Henry Cavendish, 1731—1810)逝世后遗留下来的20大包手稿上了<sup>[37]</sup>。去实验室的学生不多, 也没有本科生实验教学。按照麦克斯韦的观点, 卡文迪什实验室是“一个

通过了数学 Tripos 考试的人可以来的地方，他们在接受精确测量方面的短期培训后，就可以做一些原创性的研究”<sup>[37]</sup>。

实验室建成5年后，麦克斯韦就去世了，继任者瑞利(John William Strutt, Lord Rayleigh, 1842—1919)对实验室建设有雄心勃勃的计划，他意图将实验室与一些大规模科学研究计划相结合，以便吸引有共同兴趣的学者加入进来。他要把卡文迪什实验室打造成团队协作的研究中心，而不是展示个人实验技巧的地方。他选择的大项目是建立一个确定电气标准的研究中心<sup>[8]</sup>。瑞利还启动了本科生实验教学，在他任期内，实验室人数快速增长<sup>[38]</sup>。

J. J. 汤姆孙在1884年接替瑞利任卡文迪什实验室第三任主任。他任期内的1895年，是实验室历史上很重要的一年，实验室不仅对国内外其他大学毕业生开放，而且，其他大学的毕业生可以被录取为“研究生”，如果研究成果优异，可以获得剑桥大学硕士学位，几年后又改为博士学位<sup>[37]</sup>。这个政策吸引了来自世界各地的年轻学子，如新西兰的卢瑟福、爱尔兰的汤森等，使卡

文迪什实验室变成了一个国际化的实验室。20世纪30年代卡文迪什实验室也是我国中英庚款留学生的一个热门选择，张文裕、李国鼎等通过中英庚款留学考试后，就去了卡文迪什实验室。

卡文迪什实验室为大学实验室创造了一种成功的创设和运作模式，麦克斯韦贯彻剑桥大学的学术传统，为实验室奠定了学术厚度；瑞利强调实验室工作的组织性、系统性和计划性，强化了可持续发展的基础；J. J. 汤姆孙使实验室成为国际化高端人才的培养基地，同时形成了一套优秀成果稳定的产出模式。这三位杰出的物理学家利用自身的学识和学校的有利条件，把实验室带到一个令人敬仰的高度。

#### 4.4 柏林帝国技术物理研究所

随着工业革命的深入，实验室的重要性日益显现，使更大规模、更有竞争力、更具目的性的国家实验室应运而生。19世纪末，技术背后的科学基础日益得到重视，欧洲列强在复杂的政治、经济与军事环境下的竞争，促成了国家实验室的兴起，国家实验室的建设和运营

开始成为国家科技政策的一个组成部分。

19世纪70年代开始，德国一些物理学家不断游说俾斯麦政府，建立一个专门从事研究的国家物理研究机构，认为这是实现德国未来的工业优势不可或缺的。

德国物理学家和工业巨头西门子(Ernst Werner von Siemens, 1816—1892)对推进国家实验室的建设不遗余力。尽管当时德国物理实验室的设施在世界范围内都堪称领先，但他认为那些实验室并没有从事与国家建构关联的研究工作，只不过是科学家在自己专业里的个人活动<sup>[24]</sup>。为了化解英国、法国和美国在科学教育与科学研究方面给德国带来的挑战，必须建立一个致力于研究的新的国家机构，它具有双重目的：其一，推进一般的自然科学研究；其二，解决制约工业发展的基础科学技术问题<sup>[39]</sup>。西门子强调，我们需要一个向所有杰出的德国科学家开放的工作场所，而不是几个人的内部小团体。物理研究需要昂贵的仪器和实验室，只有国家才能在基础物理领域进行必要的长期投资。1887年，经过15年的谋划，柏林帝国技术物理研究所(Physikalisch-Technische Reichsanstalt, PTR)宣告成立(图3)，首任主任是亥姆霍兹(Hermann von Helmholtz, 1821—1894)，他此前曾拒绝过卡文迪什实验室主任的聘约。

研究所分技术和科学两个部门<sup>[8]</sup>，技术部门又划分为5个子部门，名称分别是：材料测试、精密机械、光学、温度测试和电气标准测试。科学部门下属下列实验室：

(1) 热学实验室。任务是寻找更好的温度计材料，提升高温下测温的准确性，改进热机的设计；

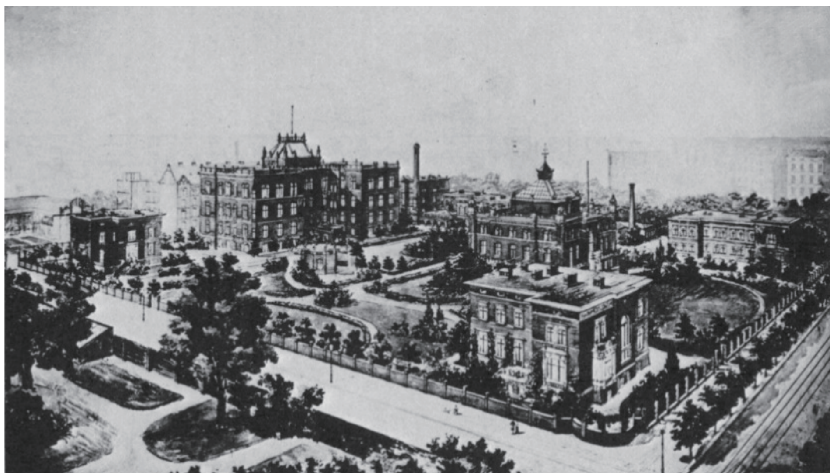


图3 柏林帝国技术物理研究所规划图(绘制于1884—1887年间。图片存于慕尼黑西门子博物馆)



(2) 电磁学实验室。任务是提供准确可靠的电气标准,这与卡文迪什实验室存在激烈的竞争;

(3) 光学实验室。任务是在光的测量方面建立可靠的工业标准,扩大德国在光学仪器方面的领先优势。

西门子和亥姆霍兹等人对于物理学发展与国家的关系有这样的认识:基础科学是国家工业技术和经济竞争力的支撑;物理学研究需要很大投入,只有国家投资才能保证物理学的可持续发展;物理学能为帝国工业发展提供良好服务,需要尽力保证德国物理学在国际竞争中占据主动,以捍卫国家荣誉。

受帝国技术物理研究所的刺激,英国在19世纪末也成立了国家物理研究所(National Physical Laboratory, NPL), NPL的首任主任格拉泽布鲁克(Richard Glazebrook, 1854—1936)曾在卡文迪什实验室任实验室演示员,他曾在《自然》杂志上发表文章,这样阐述NPL的使命:研究表明,德国正在迅速走向欧洲的工业霸主地位,这一显著进步中最有力的因素之一是其科学与商业之间的完美联盟。德国,曾经是梦想家和理论家的国度,现在则变得非常讲求实用,那里的科学教育不再针对议院和教堂,而是与商业和工业公开结盟。格拉泽布鲁克认为,为了挽回英国正在失去的制造业和商业领域的霸主地位,我们必须在英国推广德国的做法<sup>[40]</sup>。国家物理实验室由此而成立,其核心思想也是要维护英国在商业和制造业的霸权,使科学为国家服务。

柏林帝国技术物理研究所和英国国家物理研究所都深度卷入了第一次世界大战,成为国家战争力量的重要支撑。英国物理学家参与了

飞机制造、潜艇探测、炸药等方面的工作;德国柏林帝国技术物理研究所有一半的人员走出研究所,直接从事战争工作,留在研究所的人员也大都涉及与战争相关的测试和技术改进工作,以至于有学者认为,第一次世界大战某种程度上是一场物理学家的战争<sup>[8]</sup>。

经过一些著名物理学家的努力,至19世纪末,物理学建制化宣告成型,通过第一次世界大战,各国政府对物理学在战争中所起的作用有了非常深刻的认识,物理学某种程度上变成了国家的事业,物理学发展的路越来越宽广,这也为20世纪成为物理学的世纪奠定了物质基础。

## 5 结语

在19世纪的大部分时间里,物理学家对自己的角色定位和工作模式并没有清晰的认识。但开尔文、亥姆霍兹那一代物理学家把握住了时代的机遇,利用实验室的精确测量手段,把热力学、电磁学、能量科学的研究引向深入,并将研究成果应用于工业社会,成为第二次工业革命的推手,使物理学家的社会形象也得以改变,从过去离群索居的思考者、卖弄技巧的表演者、达官贵人的门客,一跃而成为大自然的代言人、工业财富的开拓者、物质生活进步的推动者,乃至国家力量的捍卫者。

随着实验室的推广和物理学研究成果社会效益的扩大,物理学家也建立了稳固的职业结构,形成了工程师、物理教师、实验室研究人员等一整套职业体系和自己的职业文化,具备了清晰的教学环境、研究环境、交流环境和应用环境。

由于物理学已成为国家竞争实

力的组成部分,成就卓越的物理学家,如法国的拉普拉斯、英国的开尔文和德国的亥姆霍兹等,几乎与政治家和保家卫国的战士一样,被视为民族英雄。这方面的一个典型例子是1907年在威斯敏斯特大教堂举行的开尔文葬礼,王公贵族、各国使节、各大社会机构和学术机关首脑悉数到场,备极哀荣<sup>[41]</sup>。

回顾19世纪物理学建制化的过程可以明显地看到,物理学家起初是用一套功利化的语言和行为争取社会资源,建设友好社会环境,以拓展学术发展空间和职业空间。即便是对于纯学理探索式的研究,科学家也会从应用的角度赋予其社会合理性。亥姆霍兹在游说成立柏林帝国技术物理研究所时便指出,理论研究与实际应用二者不矛盾:“最终,每一项严肃的科学工作都会在人们以前最意想不到的地方产生其实际应用”<sup>[39]</sup>。到了20世纪,物理学家在社会资源和社会环境不再成为严重制约因素的文化背景下,回归“纯学术”声音经常会响起,给科技政策的制订带来一些问题:现代社会里,纯科学是否需要重新定义、是否可以实现目标导向与自由探索的有机结合,等等<sup>[42]</sup>。随着科技与社会关系的进一步复杂化,以及国际竞争格局的变化,这些问题可能会反复出现。

## 参考文献

- [1] Heath T L. The Works of Archimedes. Cambridge: Cambridge University Press, 1897. p.xvi
- [2] 伽利略著,武际可译.关于两门新科学的对话.北京:北京大学出版社,2006. pp.164—165
- [3] 叶企孙.托里拆利的科学工作及其影响.见:叶铭汉,戴念祖,李艳平编.叶企孙文存(增订本).北京:科学出版社,

- 2018, pp.259
- [4] 叶企孙. 科学大众, 1962, (08):228
- [5] Sprat T. The History of the Royal Society of London(4<sup>th</sup> Edition). London: Royal Society, 1734. pp.323—329
- [6] 卡约里 著, 戴念祖 译. 物理学史. 北京: 中国人民大学出版社, 2010. pp.274—275
- [7] Leeds A R. Journal of the Franklin Institute, 1870, 89(3):208
- [8] Morus I R. When Physics Became King. Chicago: The University of Chicago Press, 2005. p.19, p.6, p.25, p.47, p.237, p.243, pp.249—250, p.273
- [9] Phillips M. American Journal of Physics, 1983, 51(6):497
- [10] Snyder L J. Reforming Philosophy: A Victorian Debate on Science and Society. Chicago: The University of Chicago Press, 2006. p.2
- [11] 聂馥玲. 自然科学史研究, 2010, 29(02):158
- [12] Morris P J T. The Matter Factory-A History of the Chemistry Laboratory. London: Reaktion Books Ltd, 2015. p.20
- [13] Chilton D, Coley N G. Ambix, 1980, 27(3):173
- [14] 清华大学物理系. 物理与工程, 2014, 24(01):58
- [15] 叶邦角. 物理, 2008, 37(08):547
- [16] Pickering E C. Nature, 1871, 3:241
- [17] Adams W. Nature, 1871, 3:322
- [18] Perry J. Nature, 1908, 79(2038):74
- [19] Lodge O. Nature, 1908, 79(2040):128
- [20] Bill J W. A History of the UCL Physics and Astronomy Department from 1826-1975. <https://www.ucl.ac.uk/physics-astronomy/about/history/departmental-history/history-ucl-physics-and-astronomy-department-1826-1975>. 2023-06-08
- [21] 尹晓冬, 周金蕊. 大学物理, 2013, 32(09):43
- [22] Thomson W. Nature, 1885, 31(801):409
- [23] Thomson W. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1856, 146(3):649
- [24] Cahan D. Historical Studies in the Physical Sciences, 1985, 15(2):1
- [25] Gooday G. The British Journal for the History of Science, 1990, 23(1):25
- [26] The Laboratory in Modern Science. Science, 1884, 3(54):172
- [27] Sviedrys R. Historical Studies in the Physical Sciences, 1976, 7:416
- [28] Thomson W. Nature, 1883, 28:91
- [29] Maxwell J C. A Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford: Macmillan and Co., 1973. p.vi
- [30] Maxwell J C. Introductory Lecture on Experimental Physics. In: Niven W D ed. The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p.241, p.244
- [31] 柯遵科, 李斌. 自然辩证法通讯, 2012, 34(01):16
- [32] Chilton D, Coley N G. Ambix, 1980, 27(3):177
- [33] 王洛印. 自然科学史研究, 2020, 39(01):111
- [34] Wise M N, Smith C. Historical Studies in the Physical and Biological Sciences, 1986, 17(1):147
- [35] Wilson D B. The Educational Matrix: Physics Education at Early-Victorian Cambridge, Edinburgh and Glasgow Universities. In: Harman P M ed. Wranglers and Physicists: Studies on Cambridge Physics in the 19th Century. Manchester: Manchester University Press, 1985. pp.16
- [36] Crowther J G. The Cavendish Laboratory: 1874-1974. London and Basingstoke: The Macmillan Press Ltd, 1974. pp.23—27, p.31
- [37] Thomson J J. Recollections and Reflections. London: G. Bell and Sons Ltd. 1936. p.100, p.104, p.95, pp.136—137
- [38] 阎康年. 卡文迪什实验室: 科学革命的圣地. 保定: 河北大学出版社, 1999. pp.85—87
- [39] Cahan D. Historical Studies in the Physical Sciences, 1982, 12(2):253
- [40] The Aims of the National Physical Laboratory. Nature, 1901, 64(1655):290
- [41] Lord Kelvin's Funeral in Westminster Abbey. Nature, 1907, 77(1991):177
- [42] 陈志. 人民论坛·学术前沿, 2023, (09):36

## 新书推荐

凝聚态物理学是一门内容丰富多样、层次交错复杂的基础学科, 在当前理工科人才培养中扮演极为独特的角色。在诸多凝聚态物理导论类的文献中, 如何选题、如何安排难易程度都是不易权衡的难题。惟其如此, 对于欲构建个人凝聚态物理学基础的读者来说, 多参考几本专著从而从多个不同的角度入手便显得有必要了。

高等教育出版社2022年出版的《凝聚态物理学导论》一书, 由南京

大学全国钧教授撰写。全国钧教授是物理教育名家, 长期奋战在物理学研究与教学第一线, 特别是对凝聚态物理的教学有丰富的实践经验和独到心得。《凝聚态物理学导论》全书分为九章, 对无序系统、关联电子态、非常规相变、拓扑量子态等一般教科书较少关注的艰深主题给予了充分的讨论。特别地, 本书充分利用最新的研究成果辅助对前沿问题的阐述, 有利于相关专业的研究生快速进入相关专业的研究领域。



读者和编者