

固体研究先驱，物理教学典范 ——记德国科学家波耳

刘超卓[†]

(中国石油大学(华东)理学院 青岛 266580)

2022-09-16 收到

[†] email: czliu@upc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20230107

波耳共振仪主要用于受迫振动研究，在高校物理实验教学中得到广泛使用。该装置最初由德国实验物理学家罗伯特·维查德·波耳(Robert Wichard Pohl, 1884—1976, 图1)发明。波耳发现碱卤晶体中的色心现象，最早系统研究固体缺陷的光电特性，是固体物理实验研究的重要先驱，莫特(1977年诺贝尔物理学奖得主)称他和玻恩(1954年诺贝尔物理学奖得主)为“固态物理学之父”^[1]。波耳还以他精彩的实验物理讲座闻名，他的教科书经久不衰，对德国教学传统影响深远。我国对波耳鲜有介绍，本文为此做一简介。

1 生平简历

1884年8月10日，波耳出生于德国汉堡，父亲是造船工程师，母亲来自幼儿教育世家。

1903年夏季学期，波耳在海德堡大学读自然科学，结识了弗兰克(James Franck, 1882—1964, 1925年诺贝尔物理学奖得主)，并一生为挚友。

1903年冬，他转到柏林大学学习物理学。1906年夏获博士学位，然后在柏林大学物理教学实验室担任实习助手。1912年，以论文“X射线的物理学”获特许任教资格(Habilitation)^[2]。

1919年初，波耳到哥廷根大学任副教授；次年12月升为教授，此后一直任教于哥廷根大学。1952年退休，1976年6月5日逝世于哥廷根。

2 早期在柏林大学的研究

1904年夏，波耳在柏林大学开始研究介质阻挡放电法对氮气和氧气的作用，这一课题后来成为他的博士论文内容。

大学假期期间，波耳在汉堡国家物理实验室尝试观测X射线的衍射效应，发表了第一篇研究论文^[3]，甚至在劳厄(1912年诺贝尔物理学奖得主)之前就已经通过晶体衍射估计出X射线的波长约 10^{-9}cm ^[4]。他的这一工作引起了索末菲的极大关注，索末菲建议自己的助手劳厄开展实验，从而验证了晶体的点阵结构。

1906年，波耳在柏林大学与弗兰克一起研究放电气体中的离子迁移^[5]和X射线的传播速度^[6]。这导致了后来的Franck—Hertz实验，证实原子存在量子态，支持了丹麦玻尔(1922年诺贝尔物理学奖得主)的原子结构理论。

1909年，波耳研究金属表面的光电效应，与普林斯海姆(Peter Pringsheim, 1881—1963)用气相沉积法制备金属膜，发现了金属表面单吸附原子的选择性光电效应^[7]，可用光量子假说来解释。

到1914年第一次世界大战开始时，波耳已出版三本专著，发表了54篇科学论文。

一战期间，他帮助两家军事后备医院建立了X光诊断设备，开发无线电系统用于寻找敌方电台，并

担任上尉工程师，直到战争结束。

3 哥廷根物理学的三驾马车之一

1920年12月，波耳出任哥廷根大学第一实验物理研究所所长，弗兰克担任第二实验物理研究所所长，玻恩则担任理论物理研究所所长，还有电学教授赖希(Max Reich, 1874—1941)领导“应用电力研究所”(图2)。玻恩的风格是偏重数学



图1 波耳(Pohl, 1884—1976)

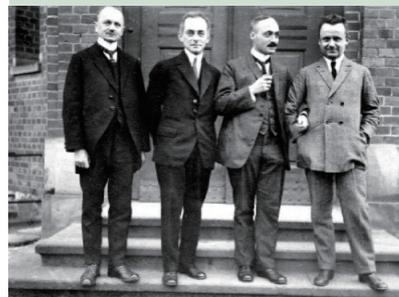


图2 (从左至右)赖希、玻恩、弗兰克、波耳在哥廷根大学

和理论，波耳的坚持则是实验高于一切，弗兰克则重视理论与实验之间的联系。他们的学生则被戏称为“小玻恩”、“小波耳”、“小弗兰克”。

玻恩、波耳、弗兰克担任三个物理学教授职位，轮流担任主席，举办“物质结构”研讨会，引来许多数学家和物理学家参与，形成了这个区域最活跃的科学团体核心，使哥廷根成为当时国际上最重要的物理中心之一，许多青年才俊来此求学，史称哥廷根物理学的黄金时代，这一辉煌直到1933年玻恩和弗兰克受纳粹迫害离开德国才戛然而止。

二战期间，波耳是哥廷根大学唯一的物理学教授，工作领域始终在他的研究所，继续维持大学高水平科研和教学。他反对纳粹政权，从一开始就确信德国会失败，与地下反纳粹公民组织保持联系，没有加入任何政党。

二战后，波耳积极参与哥廷根大学重建，并担任去纳粹化委员会的成员。

4 开创晶体色心物理研究

波耳早期在柏林研究表面原子的光电效应。到哥廷根后，因为缺乏低温和高真空设备，实验困难重

重，波耳经常声明他的信念——实验至高无上，继续探索实验，甚至反其道而行之——既然无法把原子放在表面，就设法把原子埋到固体内部去——竟开创了固体改性实验研究先河。

他和助手 Bernhard Gudden 研究 ZnS、CdS、HgS 等天然绝缘体的内部光导特性，发现金刚石晶体在光照时也会导电，说明硫元素并不是光导的必要条件^[8]。当 NaCl 晶体暴露在 X 射线下会改变颜色，也观察到导电现象。对这种晶体增色效应进行的研究，扩展到各类荧光粉和天然矿物晶体上，最终导致了色心这一重要发现。

1925 年，波耳从熔体中拉制碱卤化物，获得了纯度更高、杂质更少的人造单晶^[9]，尺寸达到孩子的脑袋大小。纯净碱卤晶体在可见光波段是透明的，如果把碱卤晶体在碱金属的蒸气中加热，然后使之骤冷到室温，则原透明晶体就出现了颜色。波耳认为晶体中出现了一种对可见光进行选择吸收的点缺陷结构，称之为“F 心”（源自德文“颜色”Farbe）或色心。色心的存在使无色晶体呈现颜色，因此引入色心的过程称为增色。

“F 心”由一个负离子晶格空位束缚一个电子构成，是最简单的色心。后来波耳陆续发现各类色心结构，都可作为光吸收中心或发光中心。

波耳研究了各种产生色心的方法技术，如紫外光照、射线轰击、化学掺杂或调整制备工艺等；发展完善了测定色心结

构的光谱及磁共振技术；系统研究了色心的发射和吸收光谱，电导、光导的微观机制，为色心物理学奠定了坚实基础。

色心显著改变了固体的光电性能，甚至能使微观载流子的运动变得宏观可视化(图 3)，这些奇妙现象也被介绍到波耳编写的教材中^[10]。

1938 年，波耳在溴化钾晶体中植入三个电极，设计了首个晶体电流放大器，虽然只能在非常低的频率下工作，在半导体领域也是开创性的；基于色心技术，他第一次阐明了晶体管的原理^[11]。到 1947 年，贝尔实验室才制造出第一个晶体管。

5 色心研究的学术影响

波耳关于固体研究的所有成果都发表在德文期刊上。当时世界关注的中心领域是量子理论、原子物理、核物理等，大家对这种晶体缺陷研究缺乏兴趣，称之为“污渍物理(dirty physics)”^[12]，但波耳却乐此不疲，不断开辟实验固体物理新领域，培养了一批人才，被称为“波耳学院”^[13]。

1937 年，波耳受邀参加在英国布里斯托举行的“固体中的导电性”会议，他关于色心的研究受到国际同行的高度关注^[14]。莫特评价道^[15]：“It was so absolutely beautiful. He published little paper after little paper setting out the experimental evidence never producing a theory — he didn't believe in theories — but the experimental evidence so spoke themselves that the theory seemed to us obvious.”

波耳的工作使人们发现，离子晶体中的点缺陷是一个相对简单但非常有前途的研究领域，从中可以获得半导体电学性质的宝贵知识。

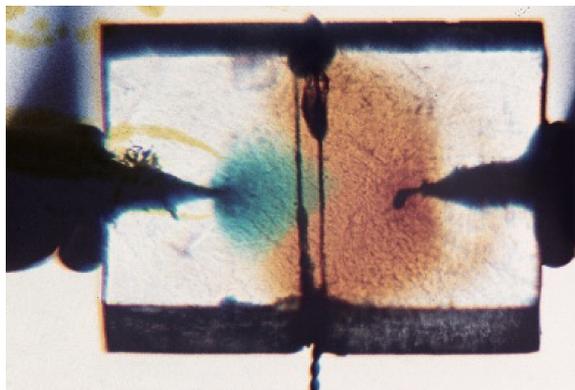


图3 电压影响下 KI 晶体中左侧阴极附近电子轨迹(绿色)和右侧阳极附近空穴轨迹(棕色)

莫特开始将量子力学用于研究晶格缺陷中的电子属性，并跟踪关注波耳的实验^[16]。中国学者黄昆(1919—2005)是莫特的博士生，在系统研究固体色心光谱的基础上，提出了基于晶格弛豫的多声子光跃迁和多声子无辐射跃迁理论^[17]，成为固体缺陷光谱领域的奠基人^[18]。

二战后，固体物理学研究兴起，半导体物理迅速发展，但大学里实验研究仍非常少。1946年，塞茨(Frederick Seitz, 1911—2008)在美国发表了第一篇关于色心的评述，系统总结了波耳的工作^[19]。1956年，第一届国际色心会议在阿贡国家实验室举行，此后每三年一次，直到1977年^[20]。

色心研究贯穿于现代固体物理学发展的始终，今天，固体物理的大量研究虽然已转移到具体的专题分支上，但色心物理仍是固体物理的基础研究课题之一。色心技术在半导体光电导、固体发光、固体电子学、激光等领域有着广泛应用，相关研究方兴未艾^[21]。

6 卓越教学的典范

波耳不仅是出色的实验物理学家，在物理教学方面也有着很深的造诣。他坚持“研教结合”，发展出新的教学方法，研制了新一代的教学设备，撰写了全新的教科书。

波耳开设了《实验物理》课(相当于现在的《普通物理》)，努力提供生动的教学方法(图4)。他在课堂上演示安装在移动桌子上的实验，并通过灯光投影到墙上，使所有学生都能观察到现象。他的实验讲座“寓教于乐”，将精湛的演示与科学的探究结合，将奇妙的现象和学生的愉悦结合，将诙谐的氛围与观众的好奇结合。尽管他要求纪律严

明，他的讲座总是充满了快乐，使学生印象深刻，广为流传，被称为“波耳马戏团”^[22]。

波耳对演示实验的开发倾注了极大心力。他重新审视原始实验，鼓励学生参与，开发演示仪器，服务课堂教学。他从柏林搬到哥廷根的行李中，有40多个行李箱，装满了讲座所需的仪器。新的实验不断被开发出来，波耳在学术会议上宣讲，在学术期刊上推介^[23, 24]。最著名的设备之一可能是以他名字命名的波耳摆(Pohl's pendulum)，现在称“波耳共振仪”，其原理是用加速力矩驱使一个具有电磁阻尼的摆轮进行受迫共振，摆轮被不断补充能量，如果没有阻尼损耗，摆轮的振幅将不断增大(图5)。这一设计物理概念清晰，体现了波耳匠心独具的构思^[25]。

波耳编著的《物理学导论》第一卷《电学》于1927年出版，第二卷《力学与声学》于1930年出版(后增加了热学内容)，第三卷《光学》于1940年出版(后增加了“原子物理”内容)。这些教材每一章节都介绍验证物理定律或演示物理现象的实验、物理学史上的重要实验，并配有大量插图^[26]；还介绍科学前沿和技术应用，专辟章节“固体的光电性质”介绍哥廷根的固体研究工作。

波耳重视实验的课程教学、实

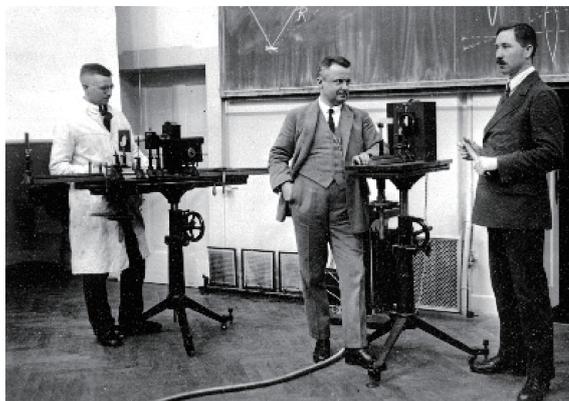


图4 波耳(中)的物理课堂

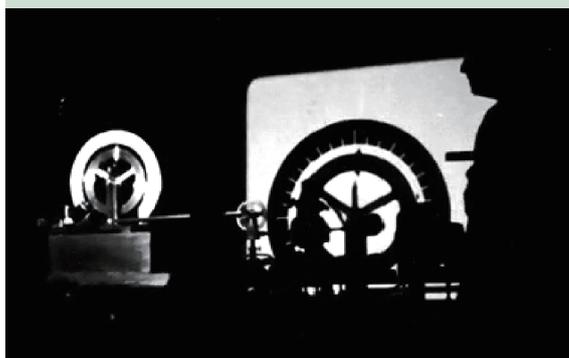


图5 波耳在演示他的共振仪

验项目和器材开发、物理教材编写，在德国大学和中学物理教育中被作为样板，成为卓越教学的典范，影响深远。他的60、70、80、90岁寿辰都得到物理学界的庆贺，没有一位物理教师能受到这般尊崇。

7 教育贡献至今回响

现在，德国许多大学讲授《普通物理》都把演示实验作为必不可少的内容，近代物理部分也不例外^[27]；助教必须在课前将实验准备好，并在课堂上讲解；实验内容也是口试内容之一。实验是理论的基础，将实验物理放在十分重要的地位，对培养人才有很大作用。

波耳设计的许多实验器具至今仍在使用，并得到发展。其中，波耳共振仪借助先进的影像设备可以精细观测振动的过渡过程，开始用

于非线性振动和混沌现象的研究^[28]。

波耳的德文版三卷本《物理学导论》到2018年已先后更新出版了24个版本,被许多大学视为经典。英文版两卷本《波耳物理学导论》在施普林格出版社出版^[29],包含了使用原始演示设备开展的110个实验视频。

8 部分褒奖和世人纪念

波耳在固体物理实验研究和物理教学领域持续耕耘30年,为学生提供了大部分灵感。在其学生和同事眼中,他的形象一直是活跃的老师、渊博的顾问、精神的导师和慈爱的父亲。

波耳先后5次被提名诺贝尔物理学奖^[30],是多所大学的荣誉博士、科学团体的荣誉会员和通讯院士,被授予德国大十字勋章、星级大十

字勋章。

量子力学的革命无疑是哥廷根大学历史上的璀璨时刻,同期波耳先驱性的固体物理研究被置于其阴影之下,使人不经意间忽略了。即使如此,莫特都坚持认为“Pohl seems to me the true father of solid state physics”^[31],充分肯定了波耳在现代固体物理研究上的卓越贡献。

1959年,美国物理教师协会(AAPT)授予波耳奥斯特奖章(Oersted Medal)。这是物理教师领域声望最高的大奖,每年只颁授一人。波耳是继索末菲之后荣获该奖项的第二位欧洲人^[32]。

1979年,德国物理学会设立波耳奖(Robert Wichard Pohl Preis),授予在物理研究、科学传播、物理教学、物理教学法研究方面取得杰出成就的学者,该奖重点是物理教学

法,每四年颁发一次^[33]。

1979年,德国大众汽车基金会在中国上海的同济大学支持建立“波耳固体物理研究所”,这座研究所一直以波耳冠名至今。同济大学研制的新型波耳共振仪得到了广泛应用^[34]。波耳的科学、教育思想在中国生根发芽。

“简单是真理的标志”是波耳的科学座右铭,根据这一信念,波耳举行了几十年的实验物理讲座,它的拉丁文“Simplex sigillum veri”被刻在哥廷根大学物理报告厅的墙上。

波耳对实验科学的追求孜孜不倦,对物理教学的付出脚踏实地,在20世纪物理学发展史上留下了重重一笔。因此,当我们面对波耳共振仪开展实验教学时,不禁重温波耳那“重视实验、研教结合、寓教于乐”的学术品格和人格魅力。

参考文献

- [1] <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/29974>
- [2] Pohl R. Die Physik der Röntgenstrahlen. Braunschweig: Vieweg, 1912
- [3] Pohl R. Ann. Phys., 1905, 322: 375
- [4] Walter B, Pohl R. Ann. Phys., 1908, 330: 715
- [5] Franck J, Pohl R. Verh. Dt. Phys. Ges., 1907, 9: 194
- [6] Franck J, Pohl R. Verh. Dt. Phys. Ges., 1908, 10: 117
- [7] Pohl R, Pringsheim P. Die lichtelektrischen Erscheinungen. Braunschweig: Vieweg, 1914
- [8] Gudden B, Pohl R. Z. Phys., 1920, 3: 123
- [9] Gudden B, Pohl R. Z. Phys., 1925, 34: 249
- [10] Pohl R W. Einführung in die Elektrizitätslehre. Berlin: Springer, 1944
- [11] Hilsch R, Pohl R. Z. Phys., 1938, 111: 399
- [12] Mott N F. Proc. R. Soc. Lond. A, 1980, 371: 56
- [13] Braun E. Proc. R. Soc. Lond. A, 1980, 371: 104
- [14] Pohl R W. Proc. Math. Phys. Eng. Sci., 1937, 49: 3
- [15] Mott N F. Proc. R. Soc. Lond. A, 1980, 371: 3
- [16] Mott N F. Proc. R. Soc. Lond. A, 1938, 167: 384
- [17] Huang K, Rhys A. Proc. R. Soc. Lond. A, 1950, 204: 406
- [18] 甘子钊. 物理, 2019, 48: 496
- [19] Seitz F. Rev. Mod. Phys., 1946, 18: 384
- [20] Pick H. J. Phys. Colloq., 1980, 41: C6
- [21] 方书淦, 张启仁. 晶体色心物理学. 上海: 上海交通大学出版社, 1989
- [22] Teichmann J, Stinner A, Riess F. Sci. Educ., 2007, 16: 511
- [23] Pohl R W. Sci. Nat., 1932, 20: 932
- [24] Pohl R W. Sci. Nat., 1940, 28: 585
- [25] Lüders K, Pohl R O. Pohl's Introduction to Physics Volume 1. Berlin: Springer, 2017
- [26] 林学言. 工科物理, 1991, (01): 28
- [27] 林学言. 工科物理, 1988, (03): 35
- [28] Mao C, Luo W, Ma Y *et al.* Eur. J. Phys., 2014, 35: 055012
- [29] Lüders K, Pohl R O. Pohl's Introduction to Physics, Volume 2. Berlin: Springer, 2018
- [30] https://www.nobelprize.org/nomination/archive/show_people.php?id=7311
- [31] Mott N. New Scientist, 1976, 69: 663
- [32] Phillips M. 50 Years On Teaching Physics. New York: AIP Publishing, 1979
- [33] <https://www.dpg-physik.de/auszeichnungen/dpg-preise/robert-wichard-pohl-preis>
- [34] 陈铭南, 何雨华. 工科物理, 1999, 9: 27