

“十一五”国家重点图书出版规划项目

The Series of Advanced Physics of Peking University

北京大学物理学丛书·理论物理专辑

固体物理学

黄 昆 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

The Series of Advanced Physics of Peking University

北京大学物理学丛书·理论物理专辑



图书在版编目(CIP)数据

固体物理学/黄昆编著. —北京: 北京大学出版社, 2009. 9

(北京大学物理学丛书. 理论物理专辑)

ISBN 978-7-301-15744-2

I. 固… II. 黄… III. 固体物理学 IV. O48

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 167053 号

书 名: 固体物理学

著作责任者: 黄 昆 编著

责任编辑: 顾卫宇

标准书号: ISBN 978-7-301-15744-2/O·0793

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752038

出版部 62754962

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 18.25 印张 插页 1 304 千字

2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 30.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: (010)62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

《北京大学物理学丛书》
第二届编委会名单

主 任：高崇寿

副主任：（按姓氏笔画排，下同）

	刘寄星	陈晓林	周月梅	夏建白
	聂玉昕	阎守胜	黄 涛	
编 委：	冯世平	田光善	孙昌璞	朱 星
	朱邦芬	宋菲君	肖 佐	邹振隆
	林宗涵	欧阳钟灿	俞允强	胡 岗
	闻海虎	顾卫宇	韩汝珊	解思深

前 言

物理学是自然科学的基础,是探讨物质结构和运动基本规律的前沿学科。几十年来,在生产技术发展的要求和推动下,人们对物理现象和物理学规律的探索研究不断取得新的突破。物理学的各分支学科有着突飞猛进的发展,丰富了人们对物质世界物理运动基本规律的认识和掌握,促进了许多和物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的进步。物理学的发展是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科产生、成长和发展的基础和前导。

为适应现代化建设的需要,为推动国内物理学的研究、提高物理教学水平,我们决定推出《北京大学物理学丛书》,请在物理学前沿进行科学研究和教学工作的著名物理学家和教授对现代物理学各分支领域的前沿发展做系统、全面的介绍,为广大物理学工作者和物理系的学生进一步开展物理学各分支领域的探索研究和学习,开展与物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的研究和学习提供研究参考书、教学参考书和教材。

本丛书分两个层次。第一个层次是物理系本科生的基础课教材,这一教材系列,将几十年来几代教师,特别是在北京大学教师的教学实践和教学经验积累的基础上,力求深入浅出、删繁就简,以适于全国大多数院校的物理系使用。它既吸收以往经典的物理教材的精华,尽可能系统地、完整地、准确地讲解有关的物理学基本知识、基本概念、基本规律、基本方法;同时又注入科技发展的新观点和方法,介绍物理学的现代发展,使学生不仅能掌握物理学的基础知识,还能了解本学科的前沿课题和研究动向,提高学生的科学素质。第二个层次是研究生教材、研究生教学参考书和专题学术著作。这一系列将集中于一些发展迅速、已有开拓性进展、国际上活跃的学科方向和专题,介绍该学科方向的基本内容,力求充分反映该学科方向国内外前沿最新进展和

研究成果。学术专著首先着眼于物理学的各分支学科,然后再扩展到与物理学紧密相关的交叉学科。

愿这套丛书的出版既能使国内著名物理学家和教授有机会将他们的累累硕果奉献给广大读者,又能对物理的教学和科学研究起到促进和推动作用。

《北京大学物理学丛书》编辑委员会

1997年3月

理论物理专辑前言

彭桓武先生在他的专著《理论物理基础》(彭桓武、徐锡申著,北京大学出版社,1998年)序中对理论物理作了精辟的阐述:

随着人们通过多次观察和实验等科学实践,对物质世界中在一定条件下一定现象之出现,获得大量可靠的感性认识,得到数据和经验规律。然后经过反复综合整理改造,形成概念,并用判断和推理的方法给以合乎逻辑的描述或解释,这样达到某种理性认识。如能以此为据对新现象有所预见且为而后的科学实验所证实,则表明这理性认识正确可靠。对越来越多方面的物质现象得到的越来越普遍的正确可靠的理性认识,便构成发展着的理论物理。

理论物理的发源可以从伽利略和牛顿对地面上物体坠落和天空中行星绕日等现象的统一解释算起。这奠定了牛顿力学,并从此动力学观点流行。这种观点和方法,结合对气体的物理实验和化学实验的多个经验规律,产生并逐渐澄清原子和分子的概念,阐明了热的分子运动本质,又结合电磁现象的观察和大量实验所总结的一系列经验规律,特别是法拉第的有关磁力线和电力线的形象思维,帮助麦克斯韦形成电磁场的概念和其动力学理论。不仅利用运动把电现象与磁现象联结起来,并且从理论上预见到电磁波动现象,光的现象即归结为电磁波动的现象。这预见为而后的实验证实,并为无线电通讯奠定基础。法拉第电解定律表明分子原子内部有带有一定的基本电荷的电子。有鉴于此,洛伦兹对物质中的电磁现象,提出电子论,引入带有电子运动的分子和微观电磁场的概念,后者的局部的多分子的统计平均即是麦克斯韦的宏观电磁场,这样解释了物质对光的折射率随光波长的变化的色散现象。但对电子和其运动规律的较清楚的认识,则尚待从更多的近代物理实验和其伴随的20世纪才发现的相对论和量子论。在这两个理论中,对时间和空间,粒子和波,概念上比以前有所深入,有些人称之为革命,实际上不过是,随着认识到更深一层次,原来认为割裂的或对立的却是统一的或同一的,而回过头来看,原来的认识,在一定范围内仍是对的或可靠的到一定的近似程度而已。

理论物理是有用的。作为工程设计原理的早已成熟的那部分理论物理更不必谈。在开展理论、实验与工程技术相结合的工作时,理论工作先行一步常

可以减少实验和工程的工作量。

为了促进我国的理论物理研究,国家自然科学基金委员会“理论物理专款”学术领导小组决定资助出版这套《北京大学物理学丛书·理论物理专辑》。希望从事理论物理研究的科学工作者介绍国际理论物理前沿和自己的研究工作,吸引更多的年轻人投入并献身于理论物理学的研究,为营造重视基础研究、安心基础研究的大环境,为发展我国理论物理学的研究及其在国际上占有一席之地作出贡献。有关申请出版资助的情况,请参阅国家自然科学基金委员会网站中有关“理论物理专款”的通告。本专辑的出版得到了北京大学出版社的大力支持,特此感谢。

国家自然科学基金委员会
“理论物理专款”学术领导小组

2005年10月20日

重版前言

今年正逢黄昆先生九十诞辰,黄昆先生的学术和教学思想永远牢记在我们心中,指导着我们几代人的研究。

黄昆先生对我影响最大的是他教的“固体物理”课,他的课决定了我一生的事业。1962年我面临大学毕业,当时在理论物理班,理论物理专业有许多名师,如王竹溪、胡宁、杨立铭等,但是我还是想考黄昆先生(他当时在半导体教研室)的研究生,因为三年前(1959年)的“固体物理”课给我的印象太深刻了。从1960年困难时期开始,学校不搞政治运动了,开始由教授上课。我们理论班听了褚圣麟先生的“原子物理”,孙洪洲先生的“量子力学”,郭敦仁先生的“复变函数”,王竹溪、吴杭生先生的“统计物理”,吴杭生先生的“固体理论”、“超导理论”,杨立铭先生的“原子核理论”、“群论”,胡宁先生的“量子场论”、“泛函分析”等。每位名师讲课都有特点,最后这三年的上课虽然饿着肚子(老师也是饿着肚子讲课),但给了我终身的教益。

最后我还是决定报考黄昆先生的研究生。正像厦门大学陈金富教授在《名师风范》一书中提到的,黄昆教授在教学上体现了下列独特风格:(1)严谨、清晰地阐述物理概念和物理模型。(2)教学过程中,培养学生提炼科学模型的思维能力。(3)臻于至善的教学效果。他说道:“当年听黄昆教授讲授‘半导体物理’和‘固体物理’在全国是首次,听课的师生中除‘五校联合半导体专门化’的师生外,还有清华大学进修生,更有乘早班火车从天津赶往北大听课的南开大学部分师生,可谓盛况空前,无与伦比。”“听课师生课堂上基本理解,记住教学内容,是黄昆教授教学效果的另一例证。当时在没有任何现成教材可供预习、参考的‘空白’背景下,仅依靠听课和笔记就能记住、理解授课内容,特别是领悟其教学风格,足以显示黄昆教授卓越的教学效果。”^①

我本人对黄昆先生的“固体物理”课也记忆犹新。我在《自主创新之路》一书中回忆道:1959年科研“大跃进”,每天晚上开夜车。“就在这种情况下,下午安排了‘固体物理’课。吃完午饭走进教室,大家都昏昏欲睡。”“即使在当时那种头脑发昏的情况下,黄昆先生的课还是深深地吸引了我。我变得特别有精

^① 陈辰嘉、虞丽生主编,《名师风范》,北京大学出版社,2008年,第40页。

神,专心听课,认真作笔记,给我留下了深刻的,也是一辈子的印象。”“1962年我大学毕业后,正好遇上可以考研究生的机会,我就想考黄昆先生的研究生。我记得就考一门‘固体物理’。‘固体物理’是在1959年学的,已经过了3年。我赶紧把以前的讲义和笔记找出来,复习了一星期,结果考得还挺好,据说得了100分。黄昆先生到最近还记得这件事。”^①可以为我作证的是我当年听“固体物理”作的笔记本。中间经过了“文化大革命”,下鲤鱼洲,调到四川乐山585所,又回到北京中科院半导体所,搬了十次以上的家,其它东西有的都丢了,惟独这本笔记本和北大其他教授讲课的笔记本还保存完好。我当时几乎每一句话、每一个公式和每一张图都老老实实地记下来。看到这些词句,就好像昨天黄昆先生还在和我们上课一样,感到分外亲切。

黄昆先生的“固体物理”讲课手稿,在“文化大革命”以前1966年就整理好了,准备由人民教育出版社排版出版,但由于“文化大革命”开始而未付印。“文化大革命”以后,1979年为了适应读者需要,按原版印刷了85 000册^②,受到广大读者的欢迎,很快就销售一空,后来也没有再印。这次为了纪念黄昆先生的九十寿辰,我们决定重版此书,除了纪念意义以外,更是为了满足广大年青学者的需要。这本书虽然写于50年前,但固体物理的一些基本概念还没有变,还是黄昆先生讲得最透彻、最深刻。所以它的出版是有现实意义的。

比较一下我的“固体物理”笔记和《固体物理学》一书,大部分内容是相同的,但是也有一些差别。因为在讲课时,黄昆先生和广大学生面对面,有一个互动过程。他要想法把课讲得生动、吸引人,听众当堂就能理解,因此有些问题讲得深入一些,有的就省略了。此次再版,我把上课讲的比较重要的东西,而书中又没有的补充了进去,希望大家在看这本书的时候,就像听他本人讲课一样,学到更多的东西。为了不至于与原来书的内容混淆,新添加的内容用仿宋体字印刷,公式用(Q1)、(Q2)等表示,图用图F1、图F2等表示,以示区别。

添加的内容主要分三类:

1. 介绍性的。

如这本书没有引言,一上来就开门见山第一章。而黄昆先生在讲第一堂课时,讲了一段固体物理发展概况,我把它作为本书引言加了进去。这段话不长,只有276个字,但是简单扼要地说明了上两个世纪固体物理的发展概况。

① 夏建白、陈辰嘉、何春藩主编,《自主创新之路》,科学出版社,2006年,第280页。

② 黄昆编著,《固体物理学》,人民教育出版社,1979年。

2. 加深概念理解的。

在讲第五章“晶格振动和晶体热学性质”时,为了加深对“格波”概念的理解,在讲完一维晶格振动、三维晶格振动和非线性振动后,又反过来,专门补充讲了“格波”(我笔记上记的是“补充材料”),深入介绍了格波描述和位移描述的关系。

第七章“金属电子论”,在7-3节讲“分布函数和玻尔兹曼方程”以后,又以几个实例:电流的磁效应(霍尔效应)、温差电效应、电子热传导效应等说明玻尔兹曼方程的实际应用。

在讲第八章“半导体电子论”时,先介绍了如何由吸收光谱了解半导体的能带结构,引入直接带隙和间接带隙半导体的概念,接着介绍了“空穴”概念是如何得到的,以及各向异性有效质量、态密度等。

3. 和实验、应用的结合。

第一章“晶体的几何”,在介绍了原胞、原胞基矢、倒格矢等概念以后,讲了X射线衍射法、劳厄法、如何利用倒格矢求衍射方向等,使学生既加深了对基矢、倒格矢的理解,又学到了用X射线衍射方法测量晶体结构。

在讲第八章“半导体电子论”时,最后还讲到了半导体的应用。虽然已经过了50年,但这些应用在当前能源危机下又都成了热门,如光伏、温差电、探测器等,其基本原理是不变的。而黄昆先生却用很简短的语言、形象的图以及基本的公式讲解得非常清楚。

原书中有些表述和现在的书有些差别,需要指出以引起读者注意。书中普朗克常数有时用的是 h ,而不是现在通用的 \hbar ,两者相差 2π ,因此书中的波矢 k 也和现在的波矢相差 2π 。“满带”就是“价带”,“光敏电阻”就是“探测器”。有些实验事实已经过时,但决不影响阅读本书。书中有三章是原来课上没有讲的,它们是:第三章“相图”、第十章“固体的介电性”和第十一章“超导电的基本现象和基本规律”,大概是由于时间关系来不及讲了。

关于听课笔记,现在看50年前记的笔记,我都奇怪,怎么字体这么端正,图这么标准,数学公式这么精确。想起当年黄昆先生以及他们那一代教授讲课的情形,讲课的一个主要方式是板书。老师非常认真地板书,写完这一黑板,推上去,再接着写另一块黑板,边写边讲。学生们则边听边记边想。这样一堂课下来,真正做到了像陈金富教授所说的那样:“听课师生课堂上基本理解,记住教学内容。”板书占掉了上课的一些时间,但是值得的,收到了很好的效果。正因为如此,老师在课堂上不能什么都讲,只能挑最本质、最精髓的讲,这正是黄昆先生这本《固体物理学》的特点。尽管50年来固体物理学有了飞速的发展,新

的分支学科层出不穷,但固体物理学的基础是基本不变的,都包含在这本书中。

最近杨振宁先生在接受《知识通讯评论》采访时说:“如果我们谈到物理学家的风格,可以把当时最要做数学的,最不要做数学的,和后来的规范场论,说成三个方向,一个在右,一个在左,一个在中间。我一直认为在中间的较容易成功。”^①黄昆先生和杨振宁先生是属于同一种风格的,他们既有很深的物理基础,又有十分高超的数学技巧,所以他们是成功的。学习这本《固体物理学》可以加深我们的物理基础;还要学习的是黄昆先生的学术论文——《黄昆文集》^②,以提高我们用数学解决物理问题的能力。让我们永远学习黄昆先生,继承他的优秀传统,为发展我国的科学事业做出更大的贡献。

重版前,我和编辑顾卫宇同志又重新校对了一遍,改正了原书中的一些印刷错误,同时将外国科学家的中文译名改成《物理学名词》^③推荐的译名,一些物理单位尽量改成法定的单位。本书的重版得到国家自然科学基金委数理部理论物理专款项目的资助,中国科学院半导体所超晶格国家重点实验室的支持,特此致谢。

夏建白

2009年6月12日

① 科学新闻,2009年第10期,第56页。

② 秦国刚、甘子钊、夏建白、朱邦芬、李树深编,《黄昆文集》,北京大学出版社,2004年。

③ 物理学名词审定委员会审定,《物理学名词》,科学出版社,1997年。

黄昆论学习^①

我在北京上的是燕京大学，它是由美国基督教会办的。那时这所大学的课程门类较少，课程内容也较浅，从学基础知识讲，是比较局限的。不过却有利于我打另外一个基础，即培育了我对科学事业的追求，这可以说是基础的基础。

我上一二年级时，讲微积分课的老师是位从剑桥大学毕业不久的英国教员，他不仅讲课非常出色，课外对学生也十分关心。出于启发学生对发展科学的追求的目的，他出面组织了一个课外研究小组，在课余和他本人一起学一些科学发展的新知识。这个“尖子班”试图学习“相对论”，学习新兴的“量子力学”及其所带动的一些新的数学方法，主要是矩阵代数。这一活动进行了一年，结果包括这位教员本人在内，对相对论谁也没学懂。不过在这一过程中，通过学习新知识，探讨科学的最新发展，对教育我对科学的爱好与追求却很有影响。

另一方面，因大学课程不重，我从事课外阅读的机会较多。当时我读过的两本书给我的影响最深，书名至今都还记得。一本叫 Men of Mathematics(《数学家》)，讲的是从牛顿以来的数百年间最伟大的物理学家们的生平和贡献；另一本叫 Microbe Hunters(《探索微生物的人们》)，主要讲从发现细菌以后的一二百年中，科学家们一个接一个地找到了引发一系列重大病症的细菌和防治方法。该书对医学方面的大科学家们的研究工作过程，描写得非常生动感人。读了这两本书，觉得这些科学家们的事业，是再辉煌不过的了，比什么都振奋人心。这些科学家们对科学事业的追求和献身精神，对我震撼很大，影响着我在人生，使我对科学事业产生了兴趣和爱好。

^① 本篇为黄昆先生在20世纪90年代为中国科学院半导体研究所研究生做“治学为人”专题报告的部分内容，由何春藩根据录音整理，转载自《黄昆集——祝贺黄昆先生八十华诞》，夏建白、何春藩编，内部发行，1999年。收录于此，以供读者参摹。

再有一个例子,就是学习量子力学的问题。我们那个研究组,想要学的是包含量子力学的数学。在当时情况下,量子力学在国内还是一门非常新颖和神秘的学问,它代表了当时物理学发展的顶峰,所以我对它非常景仰。因此我在大学三四年级时,通过对图书馆里仅有的几本介绍量子力学书的自学,初步打下了量子力学的基础,并在此基础上完成了大学毕业论文《海森伯和薛定谔量子力学基础的等价性》。因为在那时,量子力学的发展,先是海森伯提出了一个量子力学的理论,其数学形式是用矩阵来表示的;一年以后,薛定谔也发表了他提出的量子力学理论,是以波动方程形式表达的。我的论文就是论述这两种理论为何是等价的。将两者沟通后,就变成了一门具有普遍性的量子力学理论。这一工作的本身,并没有自己的创见,不过通过这一实践,增强了我对这一理论的发展过程的参与感,自己觉得也进入了这一科学新领域。

我在1941年大学毕业后,去了西南联大,先是当助教,后来当研究生,一直到1945年出国留学。在这期间,对我最有影响的事,是认识了杨振宁和张守廉。他们两位都是天赋极高、聪明过人的人。课堂上我认为是非常艰深的理论,他俩很快就能轻松地掌握。所以在日常交谈中,这些知识成了我们随时讨论的课题。对科学的追求,在他俩身上随时随地都有体现。因与他俩交往甚密,我也受到了感染。

总之,从上大学到当研究生,通过课外小组的活动、自学和同学间的交往,培育了我对科学的爱好向往和追求,这对有志于科学研究的人来讲,是非常重要的。国家近年来的政策,在基础研究方面,强调要提高质量,要在国际上占有一席之地。要做到这一点,对从事这方面工作的人,首先需要有对科学不懈追求的精神。这种追求,不是口头上而是要渗透到自己的思想中去,甚至于渗透到每天的生活中去。做基础研究的人,如果没有这样一种思想境界,在某种意义上讲,可以说是不大像一个做基础研究的人。

1945年我考取了去英国公费留学。有这种机会的好处是,你可以自主地填报志愿。我在西南联大时,有一位英国教授给联大捐赠了一大批在英国出版的科学书籍。我对这批书很感兴趣,大都翻阅了一下。引起我注意的是一位叫莫特的英国科学家,他写了三本书:《原子的碰撞理论》、《金属与

合金的电子理论》、《离子晶体中的电子过程》。这使我感到这位科学家的学识非常渊博。另外在这三本书中,后两本讲的是固体物理的问题,虽然在当时并没有什么“固体物理”一说,读了之后,感到内容新颖、奇特,很有意思,他所研究的领域是非常丰富多彩的。基于这两方面原因,我就到布列斯托大学做了莫特的研究生。

现在想来,我在科学研究的方向选择上是非常幸运的。首要一点,选择莫特做导师,也就选择了将固体物理做为自己的研究方向。而固体物理作为一门学科来讲,在40年代刚刚形成,以后有了很大发展,称得上是物理学在20世纪里最重大的一个新的学科的发展。我在那个时期进入这一大有作为的科学领域是很幸运的。其次就是导师莫特的治学风格,对我产生了很大的影响。跟他认识和接触以后,使我进一步认识到,从对科学的追求到真正进入科学领域,是通过对一个又一个具体的科学问题的解决逐步发展的。原认为他很博学,跟他接触后发现,他只关心他当时所研究的具体的问题。其它的问题,你跟他讨论,他几句话就把你打发开,或用打岔的办法马上给敷衍过去了。我觉得这一习惯对我影响很深,其好处是需要你集中全部精力来解决你所面临的问题。当然也有坏的作用,时间一长,知识面就较窄。集中精力与否,是你能否做好研究工作的关键。

目 录

引言 固体物理学发展概况	(1)
第一章 晶体的几何	(2)
1-1 晶格及其周期性	(2)
1-2 晶向、晶面和它们的标志	(10)
1-3 晶体的宏观对称和点群	(13)
1-4 晶格的对称性	(20)
1-5 X射线衍射方法	(24)
1-6 中子衍射和电子衍射	(27)
第二章 晶体的结合	(28)
2-1 晶体的基本结合形式	(28)
2-2 原子的负电性	(33)
2-3 元素和化合物晶体结合的规律性	(34)
2-4 结合能	(37)
第三章 相图	(42)
3-1 固体相	(43)
3-2 两相平衡并存的准静态相变	(47)
3-3 三相平衡共存与共晶和包晶转变	(50)
3-4 相转变过程的实例	(52)
3-5 固溶体的混合熵和自由能	(53)
3-6 有限和连续固溶体	(56)
3-7 高温熔化和共晶相图	(58)
第四章 晶体中的缺陷和扩散	(60)
4-1 多晶体和晶粒间界	(60)
4-2 位错	(61)
4-3 空位、间隙原子的运动和统计平衡	(69)
4-4 扩散和原子布朗运动	(73)

4-5	离子晶体中的点缺陷和离子性导电	(78)
第五章	晶格振动和晶体热学性质	(81)
5-1	简正振动和量子热容量理论	(81)
5-2	爱因斯坦和德拜理论	(83)
5-3	双原子链的振动	(90)
5-4	三维晶格的振动	(97)
5-5	晶格的状态方程和热膨胀	(101)
5-6	晶格的热传导	(105)
第六章	能带论	(110)
6-1	一维周期场中电子运动的近似分析	(111)
6-2	三维周期场中的电子运动	(120)
6-3	布洛赫函数和简约波矢	(125)
6-4	能态密度和 X 射线谱	(129)
6-5	原子能级和能带间的联系——紧束缚近似	(134)
6-6	准经典运动	(139)
6-7	导体、绝缘体和半导体的能带论	(144)
第七章	金属电子论	(149)
7-1	费米统计和电子热容量	(149)
7-2	功函数和接触电势	(159)
7-3	分布函数和玻尔兹曼方程	(162)
7-4	弛豫时间近似和电导率的公式	(166)
7-5	各向同性弹性散射和弛豫时间	(170)
7-6	晶格散射和电导	(173)
7-7	金属的输运性质	(178)
第八章	半导体电子论	(184)
8-1	概述	(184)
8-2	半导体能谱和载流子	(190)
8-3	半导体电子的费米统计分布	(193)
8-4	电导和霍尔效应	(198)
8-5	p-n 结	(200)
8-6	半导体的应用	(204)
第九章	固体的磁性	(209)
9-1	原子磁性	(209)
9-2	一般固体磁性概述	(216)