

现代物理学

参 考 资 料

第 四 集

科 学 出 版 社

现代物理学参考资料

第四集

科学出版社

1979

内 容 简 介

本译文集主要翻译国外书刊上有关物理学和天体物理学方面综述性和中级科普性的文章,供我国广大科技人员、高等院校师生和中等文化水平的读者了解国外物理学发展动态时参考。第四集选译了固体物理学和其他方面的文章共十一篇,可供对这些方面感兴趣的读者参考。

现代物理学参考资料

第四集

《现代物理学参考资料》编辑组

(中国科学技术大学)

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979年2月第一版 开本:787×1092 1/16

1979年2月第一次印刷 印张:8 1/4

印数:0001—148,160 字数:190,000

统一书号:13031·952

本社书号:1350·13—3

定价: 0.68 元

目 录

固体物理学的昨天、今天和明天	1
固态物理学的成就及其展望	12
激光光谱学	29
非线性高分辨率激光光谱学	46
X 射线激光器	59
激光的失稳性	69
电子-空穴液体	78
超导电性的研究	92
低压下金刚石的合成	96
发射 X 射线的双星	105
黑洞的量子力学	120

固体物理学的昨天、今天和明天

F. Seitz

我们研究一下我们周围物理世界(也包括我们的生物世界)的多样性,我们就不能不惊异于自然界所呈现的丰富多彩了。按照我们今天的科学水平,这个广阔谱的一端是日益扩展的时空多样性,它代表已知的宏观世界,并且在物质特别集中的附近具有奇点区域。在广阔谱的另一端是高能基本粒子物理学领域,在这里显示了它本身的多样性,并且现在已向我们确凿无疑地指明了有些经典物理学的概念不再适用,例如从牛顿时代以来我们就接受的时间反演对称性。

我们从日常的经验知道,有一个充满光的世界和一个由凝聚物质组成的世界,后者包括我们的地球在内。我们周围的世界既是简单的,又是复杂的。复杂性是由于基本构成砖块排列的多样性和特殊性质。我们的周围世界是否真正处于时-空尺度的中间位置,如它的外观所示,要作出结论还为时过早。

我们也许可以确信一点:我们的地球相当无疑地处于宇宙中存在的温度尺度的下端。认为只要我们把今天已达到的温度 10^{-3}K 再降低三个数量级,我们就可以发现一个新的物理世界,这是不大可能的。但相反地,如果我们能够把今天产生的基本粒子能量再提高同样的数量级,却可能会发现一个新的物理世界。

有成果的研究领域

在现代科学诞生的五百年历史内,许多受到注意的研究领域,差不多都已富有成果地研究过了。这是在主要问题被理解之后在短期内出现的。例如在牛顿提出了行星运动的基本规律之后,人们立即了解了行星运动的基本特征。在波动光学领域内情况也是相似,在杨和菲涅耳指明方向之后,主要问题都得到了解决和了解。同样,在麦克斯韦一代内,人们了解了经典电动力学的规律。再者在海森堡和薛丁格发表了他们的重要研究成果之后,经典波动力学很快地达到了顶峰。

每种情况都如此,对这些领域的深入研究,揭示出了理论和实验之间的重大偏离。例如,发现水星的异常运动和光电效应中能量阈值的存在,都证明了这一点。正是这种异常的现象,推动了基础理论的进一步概括,这一点特别适用于相对论和量子理论。

发展中的研究领域

与上述情况相反,其他一些研究对象却没有取得如此丰富的成果,它们的研究过程一直互延现代科学的整个历史阶段。例如生物物理学就一直使科学界长时间地保持紧张状

态。对气体行为的认识也进展得很慢,如果把电磁场对等离子体的影响包括进去,就更是如此。同样,我们对流体特性的知识也增长得很慢。

本文的主题——固体物理学是另一个例子,它在几百年内一直是人们注意的中心,但只是逐步地或多或少地揭示出新的秘密。在1930年以前,由于波动力学的建立,对晶态物质的研究使我们对原子系统的规律有了重要了解。从1930年以后,由于对常常被忽略的晶态物质的特性进行了全面研究,得到了非常重要的技术应用,这些应用归根结蒂是和波动力学联系在一起的。此外,晶体物理学的研究结果在其他领域和在技术上也有了许多应用,并取得了丰硕的成果,因此,作一个简短的展望正是其时了。

开始阶段

自然界的许多矿物都呈现晶态,由于它们的瑰丽和很有规则的平面,一直吸引着人们的注意。在十七世纪中叶,斯特诺(Steno)对矿石的不同样品系统地研究了它们平面之间的夹角,证明了基平面之间相互具有固定的角关系,而与它们的大小和外表的多角形状无关。这表明了矿石内部具有高度的规则性。并且发现,物理性质各向异性的晶体,也显示出对于这些性质具有对称轴和对称平面。由此得出,这些对称平面和对称轴的可能排列总共限于32类。在最低的一类中不存在对称元素,在最高的对称类型中,这些对称元素由立方体给出。

在一百年以后,豪格(R. Haug)扩大了斯特诺的观测,证明了晶体面各角度之间的关系,和设想晶体是由三维的基元网络构成时所预料的完全相同。这种基元按现代的术语称之为晶胞。

1830年布拉瓦斯(Bravais)由一种巧妙的论据,也得到了同样的结论。如果假定一种三维的晶格结构,也可以自然地得出晶体只有32种对称类型。虽然这些发现是在人们直接证实原子和分子之前很久,也是在晶胞大小和它们的排列被确定之前很久作出的,但这些发现强烈地指明了物质的原子理论,后者是在1803年由道尔顿提出的,他曾分析了元素在各种不同化合物内的行为。

由发现晶格而得到的一个重要副产物,是设想有230种对称群——空间晶格,它描述了移动、转动和反演之间的密切关系。这个长期的发展过程是在上世纪末结束的。

宏观研究的进一步发展

在整个十九世纪,对晶体的物理和化学性质的系统研究受到了很大注意。在宏观方面进行的研究,极大地丰富了对有机界和无机界的认识。特别值得提出的是,帕斯特(Pasteur)的科学工作就是从研究光通过晶体时其偏振面转动而开始的。贝克尔在分析晶体发光时发现了天然放射性。而且导致发展压电振荡器和发光屏的基本效应,也是在这时期内发现的。光学显微镜日益广泛的使用,使我们查明了许多已知物质的晶态性质,例如金属和通常使用的合金,并且可将它们加以分类。

在这个时期内,对晶体基本性质日益增长的浓厚兴趣,推动了用人工分法从不同物质生长单晶的技术的发展。这些晶体生长方法只是在本世纪才得到充分的发展,并且成为

今天科学的重要组成部分。

从佛克脱 (W. Voigt) 编著的《晶体物理教程》一书, 我们可以最明显地感觉到十九世纪晶体研究的精神。这本书是在本世纪初写成的, 1930 年我开始学习它时还被列为一本著名的标准著作。这本书的大部分和上世纪末热力学与化学所取得的进展有密切关系。

1900 年前后未解决之谜

虽然晶体学在上世纪末取得了一系列重大的成果, 但仍有不少未解决的问题。原子和电子理论已成为物理学的重要组成部分, 并且由于统计力学的成就和气体放电的研究而得到了巩固, 但原子在晶体内的排列, 仍然是广泛研究的对象。此外, 还有不少困难的问题, 其中最主要的有如下一些问题:

(1) 晶态物质的克分子比热在低温下为什么低于对简单谐振子系统所预期的杜隆-珀替值。当然, 这是一个复杂问题的另一特殊提法, 即为什么能斯脱定律对描写接近绝对零度时的熵降低有效。

(2) 为什么有许多固体是绝缘体, 另一些是金属? 特别是为什么许多“单原子”固体——晶态元素是金属态? 与此相关的问题是, 为什么把合金元素掺进金属, 通常会提高金属的电阻?

(3) 正如德鲁迪 (Drude) 和洛仑兹提出的, 确实, 高的电导性和导热性可用自由电子气体的假设而得到说明, 后者由价电子形成, 受到原子场的散射, 那末, 为什么电子气体的比热要小于从麦克斯韦-玻尔兹曼统计所得出的 $3R/2$ 值? 事实上, 观测到的电子比热不但很小, 而且线性地随温度而变化。此外, 还得出电子在低温下的平均自由程很大, 而在温度升高时线性地下降。

(4) 为什么有一些物质如硒或氧化铜是弱导体(半导体), 它们的导电性能和金属相反, 随温度降低而减弱? 此外, 为什么在这些材料内掺入少量的外加原子, 导电性能会显著增加?

(5) 假定金属和半导体的电导率和自由电子的存在有关, 为什么这些材料的霍尔效应却指明电荷有正的和负的, 而且常常一样多?

(6) 为什么不同的晶态物质, 从稀有气体或简单的有机物开始, 一直到钨或金刚石, 它们的升华能量范围有如此之大? 对于硬度也出现相同的问题。麦德隆 (Madelung) 和玻恩 (Born) 曾非常成功地利用正、负离子形成中性晶格的假定说明了简单盐类的内聚性质。但是, 这一理论又使其他材料的结合机制问题更难以理解了。

(7) 固体的磁性来源于何处? 为什么有许多材料是抗磁性的, 另一些是顺磁性的, 而有一些又是铁磁性的?

(8) 为什么用光照射发光晶体会发光, 而且明显地移向红光。

(9) 为什么有许多元素按照化学计量配比定律以固定的比例相化合? 而另一些元素, 特别是金属的合金, 却显示出广阔的化合范围?

(10) 为什么晶体有许多性质, 尤其是塑性性质是结构敏感的? 对这些性质的兴趣是从应用方面产生的, 并且在科学上逐渐加强。

超 导 电 性

1911年当上述这些问题成为燃眉之急时,奥涅斯(K. Onnes)发现了固体物理学中的一个重大之谜,即某些金属材料在低温下突然出现超导电性,它在很长时期内一直未能解决。

差不多过了四分之一世纪后,迈斯纳(Meissner)和奥克森菲德(Ochsenfeld)发现,比较简单的超导金属也是超导抗磁体;又过了四分之一世纪,发现了约瑟夫森效应。这使人联想到中子的证实,中子揭开了许多新的前景,但到1932年才被证实,虽然基本概念和镭-铍源早在15年前就已经掌握了。重大发现被长期延迟,也殆非偶然。在向着新的深入的解释迈进一步之前,对于一个实验家好象总是存在着一种心理上的障碍。如果不是从经典放射化学得到的偶然副产品,铀分裂的发现将会延迟多长时间呵!经典放射化学是由于发现中子引起放射性而发展起来的。

揭开奥秘的钥匙

所有上述这些谜得以揭开的范围是十分复杂的,它必须由物理学许多领域的进展而描绘出来。主要的进展是:

1.对关系式 $E=h\nu$ 的爱因斯坦-普朗克解释

爱因斯坦说明能量量子化的成功是下列事实:量子论对绝对零度附近固体比热的下降提出了一个完全合理的解释,只要我们假设原子和分子具有简单的谐振子的性能。

在玻恩、冯卡门(Van Karman)和德拜用正规振动模型处理这种振动后,这一假设的定量方面就更清楚了。这是一个非常重大的进展,因为它和下列设想有关:纯金属的电阻来源于晶格的振动,它以某种方式阻碍载流子的运动。此外,必须提到,普朗克-爱因斯坦假设也指出了了解发光现象中斯托克斯移动的途径,这种移动出现在所有的大分子的系统中,它来源于光子受到系统的振动模散射时的能量损失。还必须提到一个事实,通过晶格的理想化以引进量子化的晶格振动或声子,是固体物理学中一个很有价值的定量的以及定性的工具。当然,如果振幅很大,而且处于非谐振范围内,这个概念不可避免的会失去效力。

正如下面将看到的,在固体物理学中发展了一系列这样的概念,没有这些概念,超导电性将在一个很长时期内仍然是一个谜;目前对液体的性质我们还缺乏一个深入的了解,也许就是因为对这种液态还缺乏这种有用的和简单的概念有密切联系。

2.伦琴散射

劳厄(V. Laue)在1912年提出了一个卓越的思想,即伦琴射线(如果它真的是一种电磁波)必然被晶格所散射,这对固体物理学提供了一个非常重要的研究方法。由此它标志着伦琴光谱学的诞生。自此之后,研究晶格键上的原子,包括电子密度分布和晶格振动效应,就有了几乎是无限的可能性。当然,这种技术得到了电子衍射、离子衍射和中子

衍射的补充和发展。此外,引进散射技术不但刷新了一些旧的领域,例如矿物学,而且还由此建立了有机化学和生物化学等研究领域,这些又为我们提供了完全新的知识。例如,利用 DNA 晶态试样的散射现象来研究 DNA,导致发现了多普耳(Doppel)螺旋结构。

3.量子化电子态

玻尔(N. Bohr)提出的关于原子和分子内存在分立电子态的建议,使我们可以建立一种模型,这一模型是:在晶格内具有原子或分子“中心”。这种模型对讨论晶体的缺陷发光效应特别有效。在这种情况下,杂质的周围可以用“中心”的分立的电子能级表征出来。在极限情况下,可以把晶体看成连续介质,它被点缺陷的稀薄气体所充满。高的金属导电性的奥秘,只是根据这些进展还解释不清楚。但是,另一方面,使我们对杂质形成的半导体性质却有了深入了解,这种半导体性能今天在硅和锗的电子元件中占有非常重要的地位。事实上,巴迪斯克尔(Baedecker)早在1910年为了说明半导体的性能,就提出了这些晶体可能具有中心,在温度相当高时,电子就会从这些中心逐渐蒸发出去,和高温等离子体中受束缚的原子-电子相似。

异常霍尔效应是另一个未解之谜。联系到这一点,必须提到,这种研究的一个副产物是研究卤化碱的中心。这项工作第一次世界大战结束后不久由普耳实验室开始进行的。由此得到的结果是更加强烈地转向制备更纯的化合物,和由改进测量仪器进行更精确的测量。

4.量子统计学

在1925年泡利指出一个能态只能容纳一个半自旋的电子之后,使改造经典统计力学已成为必要。其结果产生了费米-狄拉克统计法。大家知道,它是玻色-爱因斯坦统计法的对应物,玻色-爱因斯坦统计法是在此二年之前为了描述光量子而产生的,泡利曾采用新的电子统计方法来说明简单金属的弱的顺磁性。

以后是索末菲把新的统计概念用来改造德鲁迪-洛伦兹的金属导电理论。在二十五年前发表的这个旧模型的缺点,主要是因为采用了麦克斯韦-玻耳兹曼统计法。引进泡利不相容原理克服了这些困难。

由此很明显,一个电子在晶格内的平均自由程一般大于晶格的晶胞。在纯的理想金属中,其电阻必然和晶格的热振动即声子有密切联系。但是,尚未了解的是,电荷常常有正的和负的,而且数量相同。

5.波动力学

在二十年代后半期发展起来的波动力学,为对固体进行日益广泛的研究打开了大门。波动力学的巨大成就,是对简单原子和分子的结构诠释。但是,它对固体物理学的影响也是同样显著的。例如,最先把波动力学应用于固体是海森堡用它处理铁磁性,这个应用是以后这一领域内许多研究工作的基础。同一时期弗里克(Vleck)及其合作者还对顺磁性进行了深入研究。

与此同时,特别突出的是海特勒(Heitler)和伦敦(London)的波动力学分析,它指出了原子的无极键,阐明了原子和分子的化学亲合性。但在这里,在强束缚系统例如金属、

盐类、价键晶体以及具有小升华热的分子化合物之间仍然横着一道鸿沟。

能 带 模 型

但是,从某一方面说,电子能带模型的发展,是在固体物理学中应用波动力学得到的最大的直接结果。它是斯特拉特(Strutt)在1927年和1928年首先提出的,以后又由别人加以发展。这一理论的核心是,如果我们把价电子看成是互相独立的,就可以对价电子在固体内的行为得到一个合理的模型。但是,在平均效应上,为此我们必须考虑相互作用。这就是所谓单粒子近似。如果原子从很远处相互接近,则分立的原子能态就扩展成为属于整个晶体的能带。由此可以引进充满整个晶体的电子波。原子壳上的内层电子,与晶胞的大小比较,很靠近原子核,但受影响相当小。因此,它属于很窄的能带,差不多和原子态一样。因为晶体内运动的电子波不是在真空内传播,而是受到原子场的干扰,因此,能带状态可以看成是自由电子的能级由于在晶体场内受到散射而变形。如果能带很宽,并且是重叠的,这种描写方式就是最恰当的了。

必须着重指出,在有限大小的实际晶体内,能带状态是分立的,并且相互靠得很近。正如对一切有限的系统一样,泡利原理保证了只有一部分能态被价电子填满。能带内能态的数目,由于电子自旋取向的双重性(即有两个取向),总是成为晶体内晶胞数的偶数倍数。如果每个晶胞包含奇数个电子(对钠和铝是如此),则能谱上填满和未填满的区域就不会被能隙分开。因此,这些物质的行为如同在索末菲金属理论中的一样。另一方面,如果物质在每一晶胞内有偶数个电子,例如钙、铍、硅、锗或熟知的盐类之一,则满带和空带之间是否是完全分开的,就要视能带重叠还是不重叠而定了。具有大的能隙的材料,在这种意义上就是绝缘体,其他的是金属,例如钙是一种金属,因为能带是重叠的。

在能带上部边缘的能态有一个有趣的性质,那里的电子表现为好象具有负质量,或者更简单地说,仿佛它们带正电荷。如果这种电子从能带的上部边缘离开,则其余的表现为带正电荷。在这种情况下,我们就说,能带具有正的空穴,或简单地说空穴。

能带模型在结合实验和理论方面的重大成就,是属于偶然情况的又一个例子,而在晶体物理学发展过程中,这也是经常出现的现象。在晶态物质中,电子-电子相互作用虽然很复杂,在计算内聚力时必须严格加以考虑,但这种相互作用常常可以略去不计,或者简单地通过中间过程考虑进去。例如,在电子-电子碰撞中动量是守恒的,在能带模型内通常处理输运现象时可以不予考虑。相似地,在绝缘体内,对于某些问题,能带模型可用电子-电子效应加以补充,而毋须修改模型结构。例如,通过库仑作用形成的电子-空穴耦合即所谓激子态,可以方便地引入能带模型内。

无论如何,能带模型不但使人们解决了一些难题,而且可以把不同晶态物质的许多特性相互联系起来。在处理比较完整的晶体的性能方面,例如处理导电电子的散射以及金属和绝缘体的吸收光谱,已经取得重要成就,从而也推动了许多研究人员去研究晶体的其他性质,这些性质是由晶体内的点缺陷而形成的,其中有卤化碱的色中心以及不按化学比例形成的化合物的性质。瓦格纳(C. Wagner)和莫特(N. F. Mott)的工作和这些研究密切地联系着。在了解杂质半导体的原子扩散、荧光、阻挡层和行为方面的进展,就是在这些方面取得的重要成就。

位 错

由于引入位错的概念,使我们有可能了解许多晶体的显著塑性.这些缺陷可以看成是一个晶区在二维区域内相对移动的结果.这扩展到许多单晶胞.这些概念是由泰劳(G. J. Taylor)和奥罗万(E. Orowan)提出的,以后又由伯格(C. M. Burger)加以发展.简言之,从心理上说,三十年代是非常适合于向固体性质展开大攻势的时期,只有超导现象仍然没有了解.

物理学中的“社会”变迁

在解决所提出的问题方面,除了上面介绍的大胆果断外,在1930年前后还有两个大的变化.在经典波动力学的发展过程中,固体物理学的发展是和物理学基本定律的发现密切地联系着的,它对整个原子物理学和量子物理学提供了研究的工具和知识,由此而导致了量子理论.但是,在波动力学建立之后,基础物理学的注意中心越来越转向核物理学和高能物理学以及宇宙学方面.如已提到的,固体物理学成了一个本身孤立的世界,尽管仍非常有兴趣和很有成果,但已不再是牛顿及其同时代人称之为自然哲学领域内重大变革的中心了.同时,我们还应回忆起狄拉克的一个评论,他在1930年指出,整个化学都包含在薛丁格方程内.在原则上狄拉克的说法是对的,但我们今天从生物化学的发展知道,薛丁格方程只是为化学打开了一点点小门而已.

随着能带模型的发展,物理化学家从物理学舞台上消失了,而且这不仅在固体物理学中是这样.从发现波动力学以来,甚至从道尔顿时代以来,具有物理倾向的化学家和物理学家肩并肩地进行战斗,共同解决有关物质结构的最困难问题.事实上,化学家对揭开错综复杂的途径作出了许多贡献,这正如能斯脱,郎米缪(Langmuir)、瓦格纳、尤里(Urey)的工作所证明的.此外,在二十年代有许多物理化学家,例如波拉尼(Polanyi)、贾克(Giaque)、泡令(Pauling)等,对晶体物理学贡献了他们很大一部分精力.

有一种想法当时是可以理解的,即认为晶体物理学的钥匙——薛丁格方程,不但必然引起国际物理化学界的重大兴趣,而且作为跳板,也必然导致物理化学的重大发展.但这种情况并未发生,而固体物理学却以尚未明了的方式成功地闯入了物理学的主要领域,在理论物理学和应用物理学之间搭起了桥梁.与此同时,在二十年或三十年内,它还把许多科学家吸引到了它的领域内,这些科学家是在物理化学领域内开始作出贡献,或者早已进行过工作.

关于这一点曾提出了许多说法,但看来没有一种说法是有根据的.例如一种说法认为,物理化学特别在美国已成为有机化学的仆役,因而失去了它的独立地位.另一种说法又把这一点归之于普通热力学,它是伯克利化学学派提出的,它剥夺了这一研究领域的个人自由.第三种可能性是,由于在第二次大战后的美国,国家对物理学的进一步支持主要集中在大学物理学,结果使年青一代都转向研究固体物理学有关的问题了.

第二次世界大战

在第二次世界大战时期,固体物理学中明显地具有实际意义或者看来将具有实际应

用的一些领域得到了大力发展,因而使另一些领域却被忽略了.和电子学有着直接关系的一些领域,包括锗和硅的研究以及发光屏的发展或核反应堆辐射的作用,引起了强烈兴趣.相反地,对固体的电子态或位错的研究,却被完全抛诸脑后了.

在第二次世界大战中,关于固体物理学方面有两个可能是最重要的结果,即:

1. 固体物理学受到了十分重视,因为它进一步提供了有用的研究结果.

2. 在实验技术和设备方面有了重大进展,后者和高频电磁波的产生有密切联系.由它可以设计和制造各种仪器,对固体的性质开展深入的研究.对此首先有核自旋共振和电子自旋共振.此外还有数字计算机的发展,它后来可以在更广泛的基础上进行更高速的计算.

1945年后的时期

在1945年后的时期,固体物理学的主要发展,是沿着两条相互联系但基本上又相当不同的路线进行的.一方面,奠定牢固的基础,这在三十年代就已经被接受了;另一方面,揭开了固体物理学的最后一个奥秘,即超导电性,J.巴丁是这方面的一个关键人物.

在本文内不可能深入地讨论这两个总的方面.为此需要一系列专著才能做到.因此,我只限于详细地介绍一些主要之点.在和能带模型与晶体缺陷理论有关的领域内,由于建立了大量的研究实验室,在广泛的战线上取得了飞跃的进展,下面只限于介绍其中一些最重要之点:

1. 晶体生长和加工

因为不仅理论固体物理学,而且应用固体物理学,都强烈地依赖于成分确定的、尽可能完美的晶体,因此,许多实验室(更不要说工业部门的实验室)都作了很大努力来生长大块完美晶体.生长硅单晶、石英、硅型化合物以及金刚石的实际意义,使这方面的工作更加重要了.

2. 电子结构

固体能带结构的知识,对估价实验结果非常重要.因此,详细地测定这些量有非常大的价值.由于电子计算机使用了新的计算技术,使得在理论方面取得了重大的进展.此外还有一些方法,如许多材料的光学吸收、霍耳效应和电子共振等,也提供了进一步的数据.

3. 点缺陷

点缺陷领域由于发展了一些精密的测量技术,吸引了很大的注意力.这里包括低温技术和电磁共振.和半导体一样,传统的盐类领域也在这个研究方向上引起了很大兴趣.

4. 电子态和阻挡层

晶体管的发明重新引起了研究表面电子态和阻挡层的很大兴趣.特别是研究了P-n结如何用作阻挡层的问题.实际应用和基础研究之间的相互联系非常密切,而且卓有成效.这些研究工作的副产品之一是光发射二极管和隧道二极管.在许多工作中,贾埃弗

(Giaeva)的工作最有成绩。他研究了通过两导体之间的薄氧化层的电流通路；其中证实了有超导电流通过这种势垒。

5. 位错

位错理论首先是为了说明晶体的塑性而发展起来的，在发现位错决定一系列晶体性质(如晶体生长)之后，这一理论得到了新的推动力。弗兰克(Frank)和里德(Read)指出某种位错排列可能是产生进一步位错之源。但是，位错的概念对阐明技术上重要的一些性质，如材料的硬度或疲劳，只有有限的价值，虽然由它可以作出定量的描写。但在这里，这一领域的学术研究方面，对复杂的有实用价值的领域只有有限的影响。相反，电子性质的研究对于半导体技术却有重大的影响。

6. 内壳层未填满的化合物

在三十年代已认识到， d 壳层的电子能带(铁族)和 f 壳层的电子能带(稀土元素)是非常窄的，因为相邻晶体原子的电子分布很少重叠。由此产生强的顺磁性和这种特殊电子的低电子迁移率。当时对内壳层未填满的这种化合物曾进行了深入而广泛的研究。这首先有两个目的，第一，了解各个分量本身；第二，查明能带模型在窄带的极限情况下有哪些局限性。

7. 晶体变化

对核反应堆不断增长的兴趣，激发了人们研究射线感应的晶体损伤，同时当然也由此而加快了晶体缺陷领域研究工作的进展。

8. 激光

激光发射的可能性，导致了制备在光学上尽可能均匀的发光晶体。同样，晶体光学首先在非线形领域经历了一个大的跃进。在某种意义上说，在这种发展中显示了经典的宏观的方面，但是主要的贡献却是在量子光学的广泛战线上完成的。

9. 磁性

最后应该提到，磁现象的研究有显著的发展。基础是由战前的工作奠定的，但发展了新的测量技术，例如共振方法。关于这一领域，可以单独写一本厚书。

超 导 电 性

从1945年以来，在理论和应用方面有了巨大发展的第二个重要领域是超导电性。虽然这些工作和固体物理学在三十年代的经典工作有密切联系，但这一过程有其本身的规律。在这个特定领域内，在应用方面和基础研究方面将会出现重大的成果。

在三十年代，迈斯纳和奥克森菲德发现了纯金属超导体同时也是超导抗磁性，从而极大地加速了进一步的研究。在理论上这导致了所谓二流体模型，它阐明了正常性质和超导性质的混合态。这种转变是二级转变的事实也得到了说明。此外，伦敦关于这个模型的理论就和麦克斯韦方程结合起来了。

表述超导电性的原子模型,是一件十分困难的事情。在这个方向最重要的尝试是巴丁(J. Bardeen)提出的,他曾试图把超导抗磁性解释为由于电子-原子相互作用而使晶格结构受到扰动的结果。

从伦敦的结果得出,电子系统的超导态比起自由电子气体的超导态,其耦合要强得多。电子系统的行为仿佛电子运动可用自由电子气体状态之上的一个单一的分立能态来描述,也许这类似于原子态和分子态被连续态分开了。

这个课题差不多被忘记了十年,一直到五十年代,在实验上发现了超导电性的同位素效应。超导水银的不同同位素具有不同的跃迁温度。正如所想象的那样,这些工作的定量分析证明,超导电性和电子与晶格振动之间的耦合有密切关系。许多实验工作者对它的进一步了解作出了贡献,同时,巴丁及其合作者对揭开这个从1911年以来就是难解之谜取得了很大成就。他们提出了一个理论,今天被称之为BCS理论。简言之,他们指出了正常超导电性是靠近能带上部边缘的两个电子之间有吸引的相互作用的结果。这种耦合可以从电子对晶格振动的影响推导出来。耦合态的波函数的能量要比没有这种相互作用时的能量低。在能带上边缘的电子以相反的动量和自旋成对地束缚在一起,在有限的温度下,这种相互作用是统计性质的,但靠近能带上边缘的所有电子都参予此作用。

超导电性的出现主要来源于能带上边缘的态密度较高。如果只有少数电子出现在能带下边缘,这就会是另一种完全不同的情况了,例如,纯硅的情况就是如此。在靠近电子能带上端,对超导电性具有决定意义的区域的宽度为每个超导电子所具有的热能量的数量级。

伦敦的结论还导致另一种猜测,即超导抗磁性是电子对具有有限的运动自由度的结果。

对超导电性最重要之点是电子耦合而成对,它伸展到约 10^4 个晶格距离之远,即所谓耦合长度。这样半径的球包含 10^6 个电子对。因此,这些单一的电子对不能看成是相互不相关的。必须把系统作为一个整体来讨论。

永久电流的出现和下面的事实有关,即许多电子作为一群由电场所引起的运动,只能由大量的电子对同时分离和重新耦合才能停止。虽然无流态的能量比有流态的低得多,但电子对的临界数目只能由于热涨落而破坏,这个情况从统计上看来也是非常不可能的。加之在宏观领域内,一种超导态的自发消失也是必要的。

贾埃弗关于正常电子通过绝缘势垒出入超导体的精彩实验,为BCS理论所预言的电子分布提供了一个强有力的证据。它也可以测出在电子能带上边缘的狭窄能隙。约瑟夫森效应对耦合的电子运动提供了又一个引人注目的证明。正如这个实验所证明的,存在一系列效应,可以引起通过贾埃弗型薄层的电子流。此处又证实了伦敦的一个猜测。

此外,超导化合物的发现,对改进和加深我们对金属内电子的了解作出了贡献。这个区域无疑义地将对我们的技术工艺产生巨大的影响。第二类超导体在一定的温度范围具有高的导磁率,例如,可用它来制造超导磁体。

固体物理学的未来

有许多研究领域同时显示了内推和外推的特征。前一种研究在于深入了解细节,它

提供多样性和准确性。第二种方法可以扩展我们的视野,创立新的研究领域,超导电性的研究就属于这种研究,它大大地扩展了我们对固体物理学的了解。但是,区别这两种情况常常是很困难的。例如,穆斯堡尔效应把核裂变和固体物理学联系起来,它具有内推的性质。此外,它对整个物理学也有着深远的后果。固体物理学当前的重大问题是,在超导电性现象阐明之后,是否还存在充分的外推效应?如果要我作出完全公正的回答,我必须说,这在很大程度上依赖于当温度降低到 10^{-3}K 时是否会出现完全新的现象,也即是是否会出现一个新的世界。我认为这一点是不大可能的,因此,未来的研究将是向内推方向发展。但我想立即补充一点,这不应是一种否定的说法。统计力学领域在麦克斯韦和玻尔兹曼进行了决定性工作一百年之后,现在仍然是一个非常活跃的领域。如果考虑一下晶体世界的多样性,那末晶体物理学仍有一个美好的未来,而这也包括与生物物理学有关的方向。生物系统在许多方面表现晶态性质,但它并不属于通常的平衡热力学范围。

最后,看到过近几十年内固体物理学对技术的重大影响的人,必然认识到,它还将这样保持一个整个时代。因此,固体物理学在未来仍将是技术的基础。

(德文译自《Physik in Unserer Zeit》)

1975 年 1 月号,何希圣、张振忠校)

固态物理学的成就及其展望

J. Bardeen

一、引言

固态物理学依据物质的电子结构和原子结构来了解凝聚物质的各种特性。把固体和液体都包括在内,这一领域现在常被人称为凝聚物质物理学(The physics of condensed matter)。不仅如此,可能还有人感到固态物理学这一名词已经被日用电子工业界接过去用了。但是,不爱时髦的我,还要继续使用这个名词,不过要把它的含义加以扩充,把量子液体也包括进去。自从第二次世界大战结束以来,这一领域发展得非常之快,现在已成为最大的物理学分支了。在此期间,这方面的工作人员几乎每隔五年就增加一倍。

固态物理学有一个很广的应用范围:电子学中的半导体;变压器、磁记录带和计算机存贮元件中的磁性材料;作为光源用的和图案显示用的发光材料;静电印刷用的光导体;强电磁体中的超导体,等等。电子通信和计算机工业的惊人发展,都直接有赖于固态物理学的新成果。在电力方面,半导体整流器已经广泛地被使用,而在发电机、电动机、地下电缆和其他方面,超导体的大规模应用也是大有希望的。随着固态物理学的发展而制造出来的工业产品的产值,每年达到几百亿美元之多。

科学理论上的新进展,固体中新物理现象的发现,以及性质不平常的新材料的发现,也同样是很壮观的。在本文中,我将只提出几个主要之点,并将只着重叙述我本人所从事过的半导体和超导体这两个方面。其它同等重要或者更重要的领域只好割爱了。可惜我们不能再多谈一些重要的问题,例如电子自旋共振和核自旋共振、穆斯堡尔效应、激光光学和非线性光学、对金属的费米面以及其它一些电子性质的研究、量子流体和量子晶体的研究、相转变的研究以及凝聚物理学这一广大领域中的许多其它问题。这些领域中的每一个都已经有了很大的进展,而且每一个领域都值得提出来分别谈谈。不过,固态物理学毕竟是一个有着大量的彼此不同的多种多样问题的领域,而不是只有少数几个主要问题。

首先我要叙述人们认识固体的一些历史背景,然后再谈一谈那些作为过去 25 年间研究工作的特征的实验方法和理论方法。接着,我要再举几个在半导体、磁学和超导体方面的研究和应用的例子。最后,讨论一下未来的展望。

二、早期的发展

任何一门学科都有它迅猛发展的黄金时代。在固态物理学中,有三个这样的时代最为突出。第一个是在本世纪的初期,即在发现了X射线、电子、普朗克能量子和有核原子之后,这些发现揭开了原子世纪的序幕。这一时期是从特鲁德-洛伦兹的金属电子论和爱

因斯坦把量子论应用于固体中的晶格振动和光电效应开始的。劳厄于 1912 年关于晶格应能起到 X 射线衍射光栅的作用的建议以及布喇格父子 (W. H. Bragg 和 W. L. Bragg) 的研究,开辟了 X 射线结构分析法的广阔领域。

固态物理学的基础是在非常活跃的第二个时期牢固地奠定下来的,这个时期是在量子力学出现之后,大约应从 1928 年算到三十年代的中期。当时,世界上许多第一流的理论物理学者都被卷入了这项工作。以单电子模型为基础的布洛赫理论引入了能带概念,阐明了固体为什么可以按照其电子结构的不同而成为金属、绝缘体或半导体。固体中电输运和热输运的理论基础也建立起来了。就在这些年里,诸如空位、位错以及杂质原子之类的晶格缺陷对于许多晶体特性所起的重要作用,也开始被人们认识到了。在这一时期内,在固态物理学理论发展上作出了杰出贡献的一些人中有布洛赫、布里渊、夫伦克耳、朗道、莫脱、佩尔斯、肖脱基、赛兹 (Seitz)、史莱特 (Slater)、威耳孙 (A. H. Wilson)、维格纳和范扶累克。第三个黄金时代是第二次世界大战以后的迅猛发展时期,这时不但在理论上,而且在工艺技术和新产品上都有巨大的进展。

本世纪三十年代的成就,已经总结在 1940 年出版的赛兹所著的一本书里。这本书已经成为培养了若干代固态物理学者的经典著作,影响巨大。在三十年代,理论上的进展虽然相当地大,但是,一般说来,在理论和实际之间只有很有限的定性的符合。这一点固然和理论的局限性有一定的关系,但是更重要的原因却在于对那些组成明确的系统所作出的实验还很缺乏。晶体的许多最重要的性质都是所谓结构敏感的,就是说,晶体的这些性质对于晶体中存在着的很小一点浓度的杂质或缺陷极为敏感。结构敏感的性质包括半导电性、材料的机械强度、光电导性、发光性以及其它许多性质。除了少数例外,当时大多数的测量都是对化学成分欠明确的多晶体材料进行的。在三十年代,一个引起注意的例外是希尔许 (Hilsch) 和坡耳 (Pohl) 在德国所作的关于卤化碱晶体性质的一系列漂亮的实验。

三、第二次世界大战后的时期

作为第二次世界大战以后这一时期的特征的实验工作和理论工作的性质,是值得花点时间来谈一谈的。现在,在晶体的许多理论的和实验的性质之间已经进行了非常细致的定量检验。正因为有了这些大量的细致工作,才使得这些难以捉摸的结构敏感的性质不但在实验室中,而且在工业生产规模上都得以控制。

晶体生长方法的发展是十分重要的,用这种方法可以得到特别纯的或者成分非常确定的而且没有缺陷的各种材料的单晶体。由于通常要求的纯度远远超过了用普通的化学方法所能达到的限度,物理学者们常常是自己动手生长单晶以控制单晶的性能。杂质的浓度即使比百万分之一还要小得多,也会有显著的影响。通用电器公司的霍尔 (R. N. Hall), 通过非凡的努力,将用于探测辐射的锗提纯到使杂质离子的浓度小于 10^{-12} 的程度,这就使得能量分辨率得到很大的改进,超过了锂漂移探测器。为了确定影响着晶体的性质的杂质及其它缺陷的特性,已经做过大量的工作。为了了解和控制某一类材料中对结构敏感的性质有影响的杂质,也曾进行了多年的努力。

在这些年中,实验工作的设备和方法有了很大的改进。已经引入或大大发展了许多