

当代凝聚态物理学的发展

冯 端

(南京大学固体物理研究所)

摘 要

本文简述了当今凝聚态物理学发展中的一些比较活跃的领域。分四节进行论述：首先讨论了新的有序相的探索与研究，然后分别论述了低维体系与无序体系的物理学，最后讨论了人工微结构材料及其物理学。

凝聚态物理学已经成为当今物理学中最大的、而且也是最重要的分支学科。说它是最大这一点，可以通过一些统计数字来说明。七十年代中期的调查统计表明，凝聚态物理学的论文数已占物理学的首位（占总数的三分之一）；凝聚态物理学方面的科学家数也占首位（占总数的四分之一）。从七十年代到现在，它在物理学中所占的比重，有从原来的三分之一向二分之一过渡的趋势。至于说它最为重要，则不妨分析一下近四十年来诺贝尔奖金物理学奖授予的情况。

我们可将过去的四十年分为前后两期，每期各二十年。前期是1948年至1967年。1948年晶体管刚刚问世，可以说固体物理学站稳了脚跟，开始受到人们的重视。在前期，诺贝尔奖金物理学奖总共授奖20次，有37人获奖。严格说来，由于凝聚态物理学领域内的工作获奖的只有两次，共四人而已：一次是肖克莱、巴丁与 Brattain 三人由于发明晶体管而获奖；另一次是朗道由于在凝聚态（特别是液氦）理论方面所进行的先驱性的工作而获奖。回顾起来，这两次奖的授予是非常恰当的：前一次是由于完成了一项理论指导下的实验工作，而终于在技术上实现了重大突破，从而改变了人类社会的面貌，生动地说明了凝聚态物理学中理论、实验和技术三者之间的紧密联系；而后一次则是由于完成的一项工作奠定了从传统的固体物理学发展为凝聚态物理学的理论基础，不仅研究的

物理

对象有所扩大，而且也使人们对物质结构在概念上的统一性得到更充分的认识。当然，还有几次奖是授予邻近的学科，例如，布洛赫与 Purcell 发现的核磁共振；Townes 和 Basov 与 Prokhorov 关于量子电子学的工作，导致微波激射（maser）与激光器的问世；穆斯堡尔发现穆斯堡尔效应。这些都在凝聚态物理学中获得了重要的应用。但总的说来，前二十年凝聚态物理获奖的次数和人数甚少，远远落后于粒子物理学和核物理学这些分支学科。

在后二十年（1968年—1987年），情况就大为改观。总共授奖20次，有42人获奖，其中凝聚态物理学方面获奖8.5次，共19人，已经接近总数的二分之一，超过了粒子物理学（6次，11人），跃居诸分支学科的首位。值得注意的是以超导研究获奖者达7人之多。首先是巴丁、库珀与施里弗，他们提出了BCS理论，从而解决了长期悬而未决的超导微观机制这一难题；随后是约瑟夫森和 Giever，约瑟夫森提出了约瑟夫森效应的理论预言，Giever 首次观测到超导体单粒隧道效应；最近一次（1987年）的获奖者则是发现高 T_c 氧化物超导体的 Bednorz 与 Müller，这一重大发现轰动了全世界，酝酿着一场新的技术革命。另外，Kapitsa 以超导以外的低温物理与技术而获奖。在半导体物理方面，江琦以发现半导体的隧道效应而获奖，von Klitzing 以发现量子霍尔效应而获奖，而后一问题也可认为是属于新兴的低维凝聚态物理学

问题。奈耳是以其在四十年代进行的发现反铁磁性与亚铁磁性的基础工作而获奖,而安德森、莫特与 Van Vleck 则是以发展无序体系和磁性的电子结构的理论而获奖,这既反映了磁性物理学的重要性,也标志着无序体系物理学的重大突破。另外有四位科学家是由于发展实验技术和发明新的仪器而获奖: Ruska 在三十年代中对创建第一台电子显微镜起了关键性的作用; Binnig 与 Rohrer 在新近发明了扫描隧道显微镜; Siegbann 发展了高分辨率的电子能谱仪。电子显微镜是科学技术中应用最广泛的仪器,后两种仪器则是研究表面科学的强有力的工具。此外,在原子、分子物理学领域中,因发展激光光谱学而获奖的 Bloembergen 与 Schawlow 的工作也对凝聚态物理学很有影响。值得注意的是,有关凝聚态物理学的工作不仅在物理学奖中有所反映,而且在化学奖甚至在生理学与医学奖中也有所反映。例如: 昂萨格与普里高津的理论工作; Kendrew, Perutz, Hodgkin, Crick, Watson 与 Wilkins 关于生物大分子的结构分析的工作; Hauptman 与 Karle 创建了晶体结构分析的直接法; Klug 应用电镜观测,测定了生物分子的三维结构。这些例子足以说明凝聚态物理学在促进交叉学科发展中具有的强大生命力。

下面我们对近十几年来凝聚态物理学的一些重要发展动向作一概述。

一、新的有序相的探索与研究

凝聚态物理学研究的对象是大量粒子构成的体系,体系中的粒子数高达 $10^{24}/\text{cm}^3$ 。在一定温度下,大量的粒子通过相互作用产生有序化过程,形成有序相,例如铁磁体、反铁磁体、铁电体、超导体、超流体等。这些有序相往往具有特殊的物理性质,有些是可以在技术上加以应用的,而有序化的物理机制又是理论研究的重要课题,因而对于新的有序相的探索与研究一直是相当热门的课题。近年来,这方面的工作十分活跃。

^4He 的超流相在四十年代即已确认。 ^4He 原子是玻色子,在 2.2K 以下可以凝结为无粘滞性的超流相。但氦的另一同位素 ^3He 的原子是费米子,可以设想通过配对(类似于超导相中电子的配对)来形成超流相。理论的设想早已提出,但由于原子配对的相互作用能甚低,很容易为热运动所拆散,因而估计其临界温度甚低,不易在实验中观测到。七十年代初, Osheroff, Richardson 和 Lee 在 2.3mK 的极低温条件下首先观测到 ^3He 的超流相。 ^3He 原子的配对要比超导体中的库珀对更为复杂,因为后者涉及的是 $1s$ 态电子的配对,只存在一种情况,即正反自旋的配对;而前者则涉及 $3p$ 态原子的配对, p 态是光谱学中的三重态,除了具有反向自旋的配对外,还容许有总角动量不为零的自旋配对。 ^3He 超流相不只一个,它有 A 相、 A_1 相和 B 相。它是各向异性的流体,而且其中存在有磁矩的涨落。所以,这些现象包含了丰富的物理内容,提供了检验凝聚态理论的极好机会。尽管需要应用相当困难的极低温实验技术,又无明确的应用前景,但是 ^3He 超流相的发现和 研究,还是受到学术界的广泛重视。

另一具有理论意义的体系是重费米子金属间化合物。它通常含有 U 或 Ce 等元素,其电子比热比简单金属高出三个数量级,由此可以推断其电子的有效质量比自由电子质量大得多。重费米子体系的基态不尽相同,其中有的是超导体(如 CeCu_2Si_2 , UBe_{13} , UPt_3),有的具有磁有序结构(如 NpBe_{13} , U_2Zn_{17} , CeAl_2),而有一些却两者都不是(如 UAl_2 , CeAl_3 , CeCu_6)。最后一类在低温下可以认为是处于单纯重费米子基态,它和近藤(Kondo)效应有密切关系。我们知道,近藤效应是非磁性金属中单个磁性原子和传导电子交换相互作用的结果,Ce, U 等的 $4f$ 或 $5f$ 原子相当于近藤式的杂质原子,但浓度较高,在晶格座位上排列成点阵。单纯重费米子基态的性质可用近藤点阵的“相干”电子态来解释。此时,高温的非相干散射消失了,导致电阻率与霍尔系数的急骤下降。由于近藤效应是渐变过程,从高温态到重费米子基态也没有

明确的临界温度。重费米子超导相的 T_c 不高, 约 1K 左右, 并无实用价值。但其超导性却具有强烈的各向异性, 其 T_c 对于杂质非常敏感, 而且超导性与磁性有密切的关系, 和传统的超导体在机制上有明显差异。目前已经有多种理论来解释重费米子体系的超导性: 有人认为它根源于 3p 态原子的配对, 和 ^3He 超流体有相似之处; 也有人认为自旋相关起了关键作用, 造成了具有强烈各向异性的 1s 态配对。在掺 Th 的 UBe_{13} 中, 存在着两个不同的超导转变温度, 其性质也有待于阐明。重费米子体系的磁有序问题也引起人们的注意, 并提出了类似于 BCS 理论的巡游电子模型来进行解释。

如果说重费米子超导体主要是具有理论上的意义, 那么氧化物超导体则兼具理论和实际应用上的重要性。关于钙钛矿结构的氧化物超导体的研究, 可以溯源到 1964 年关于 SrTiO_{3-x} 的工作。到 1975 年发现了 $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ 的 T_c 高达 13K, 就应该刮目相看了。因为其态密度甚低, 而且不含传统高 T_c 超导材料中认为必不可少的过渡金属元素, 所以十年过去了, 有关这方面的研究工作却毫无动静。直到 Bednorz 和 Müller 于 1986 年春发现了 $(\text{La}_{1-x}\text{Ba}_x)_2\text{CuO}_4$ 的 T_c 高达 30 K, 才突破了长期保持的 23.2K 的纪录。1987 年初, 朱经武等和赵忠贤等分别发现了 T_c 高于 90K 的 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$ 超导体, 由此开始了一场前所未有的高 T_c 超导体的研究热潮。1988 年初, 又有两种不含稀土元素的高 T_c 超导体 $\text{BiCaSrCu}_2\text{O}_x$ 和 $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ 问世, 后者的 T_c 超过 120K。这些高 T_c 超导体的晶体结构都是从钙钛矿结构衍生出来的, 对超导性起关键作用的是其中的 Cu-O 平面。由于在这些超导体中仍然可以观测到约瑟夫森效应和磁通量子化, 就足以肯定库珀对的存在, 但其配对和机制就不一定是 BCS 理论中的电子-声子相互作用。已经提出了多种的理论解释: 有的将电子-声子相互作用理论加以修正; 有的引入新的配对机制, 如激子、等离子激元、双极化子对; 有的则另辟蹊径, 认为电子间自旋相互作用是主导的因素, 如安德森的共振价键模型等。总

物理

之, 一方面还有许多基础研究的工作要做, 通过细致的实验来逐步明确其超导的机制; 另一方面, 正在积极探索其应用的可能性, 力图早日突破技术上的难关, 实现设想中的技术革命。

另外, 值得一提的是有关氢的有序相。氧原子只有一个电子, 因而是有磁矩的。两个氢原子结合成氢分子以降低能量。所以, 一般情况下, 气相的氢是由氢分子组成的。但是在低温下, 强磁场的作用, 可以使一束氢原子的磁矩顺向排列起来, 从而避免了氢分子的形成。这种有序相是否有超流性, 也是一个正在探索中的课题。通常的固态氢是分子型的晶体, 有人曾作出理论估计, 当原子间距缩小到一定程度后, 分子晶体将向金属晶体转变。而且, 按照 BCS 理论, 晶格原子质量愈小, 其超导相的 T_c 也愈高。金属氢很可能是一种高温超导体。利用超高压技术来制备金属氢是一个相当激动人心的课题, 但迄今为止, 还没有做出来, 虽然用超高压制备金属氘已经成功了。

一个很有趣的问题是不同的有序相是否可以共存。例如, 晶格有序可以和铁磁有序共存, 但晶格有序是否能和反铁磁有序共存就不能一概而论了。有的结构是可以共存的, 但有的则不能。目前, 最令人注意的问题是磁有序与超导能否共存。在通常的超导体中, 两者是不相容的。近年来, 在某些含稀土的三元超导体(如 ErRh_4B_4 , HoMo_6S_8) 在狭窄的温区中明确地观测到超导相与铁磁相共存的迹象。在重费米子超导体 URh_2Si_2 中, 也看到了超导相与反铁磁相共存的迹象。不少迹象表明, 重费米子超导性的机制是与自旋涨落密切相关的。对高 T_c 超导体的原型相 La_2CuO_4 的中子衍射与散射的研究表明, 存在反铁磁相, 而在奈耳温度以上, 则存在长程自旋关联。在 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\sigma}$ 中, 也观测到了自旋关联的迹象。这些问题的深入研究将有助于澄清这些非传统超导性的机制。

二、低维体系

传统的固体物理学的研究对象为三维的晶

体,存在一种错觉,认为只有三维的问题才有物理意义,至于一维或二维问题,无非是理论物理学家的习作而已.实践表明,这种观点是不正确的.以统计物理中的伊辛模型为例,迄今三维模型尚未严格解出,但在此模型提出之际,一维模型却已解出,即不存在相变.二维模型在四十年代中由昂萨格解出,求得了相变温度的表达式和临界指数.由于二维严格解的临界指数在数值上和三维模型的平均场近似的结果有明显分歧,终于导致临界现象的标度律和重正化群的建立,将相变研究向前推进了一大步.也有一些三维问题可以通过将它映象为低维问题来解决的,有名的近藤问题就是一个例子.这个问题已经提出多年,在七十年代中利用重正化群的方法求出了近似解.在八十年代初,由于将它映象为相应的一维问题,即一维链反铁磁基态的贝特设定(Bethe Ansatz)而彻底解决了.

低维体系的相变问题一直是一个引人注目的课题.虽则 Peierls 早就论证了二维体系不能存在长程序,似乎排除了二维相变的可能性.应该注意,论证是根据无限大尺寸的体系作出的,而实验室所接触到的体系是有限尺寸的体系,故这一结论未必适用.另外,在七十年代中, Kosferlitz 与 Thouless 论证了二维体系中准长程序导致的相变(称为 K-T 相变),这是和拓扑缺陷对(如涡线对、位错对、向错对)松解相对应的.这种 K-T 相变已在超流薄膜和超导薄膜中获得了实验的证实,而对于二维晶格熔化问题,则尚无定论.有关二维的吸附层中的相变,晶体表面的重构和粗糙化转变也是有兴趣的二维相变问题.五十年代中, Peierls 讨论了一维金属中由于倍周期畸变所导致的在半格矢处出现能隙的问题.如果费米面正好处于半格矢处,体系就会自发地由金属变为半导体.这种 Peierls 转变(或失稳),对链状分子构成的导体具有重要意义.

下面讨论一些现实的低维体系.首先考虑具有链状结构和层状结构的体系,这些体系侧向的联系较弱,但不等于零,所以一般而言,是准一维或准二维的体系.七十年代中, Heeger

等人由于发现了准一维的链状分子晶体 TTF-TCNQ 的导电异常而引人注目,从而触发了有机分子导体研究的热潮.除了上述的有机电荷转移错盐的研究之外,对链状高分子导体如聚乙炔(CH)_n之类的材料,也进行了广泛的研究.值得注意的是,这些新的导电体系在机制上也有不少新的物理内容.例如,在聚乙炔中作载流子的并不是通常的元激发(电子或空穴),而是非线性拓扑型的激发(畴界或孤子).这类激发具有新奇的特征.例如,不带电的孤子具有 1/2 自旋,而带电的孤子却具有整数自旋,另外也可能存在表现电荷等于 e 的分数的带电孤子.这些结果是很有趣的.另一方面,作为高分子半导体材料在器件的应用方面,也有颇为诱人的前景.

1964 年, Little 就提出链状分子结合物可能是激子配对的高温超导体这一理论猜想.后来果然发现了一系列的有机超导体,如 (TMS-TF)_nX(X 为 PO, ClO₄) 等,虽然它们的 T_c 只有 1K 左右,但通过多方面的探索和研究,最近已经获得 T_c 超过 10K 的有机超导体 (BEDT-TTF)₂Cu(SCN)₂. 这一结果是很令人鼓舞的,表明这一领域中的材料开发的工作还是大有可为的.

二维分子体系也是一个值得注意的领域.在 TaSe₂ 等层状结构的过渡金属硫系化合物中,发现有密度波(CDW)基态(电荷密度作周期分布的对称破缺态).有关 CDW 滑行引起的导电现象,也是颇令人注意的问题.又如插层化合物(intercalation compound),如石墨中插入锂层,可以通过改变插层的情况来调整其电子结构,这也是兼具理论与实际意义的研究课题.

另一类低维体系,出现在人工微结构材料之中,例如场效应管中的反型层、半导体异质结等.在薄层内电子被势垒限制在二维方向上运动,因而构成了量子阱中的二维电子气.在二维电子气中发现了一系列特殊的性质,其中最重要的就是量子霍尔效应.1980 年 von Klitzing 等首先在硅的反型层中发现霍尔电阻率为

$h/\nu e^2$, 而随着磁场变化, ν 为一系列的整数, 据此可以精确测定精细结构常数, 这就是整数的量子霍尔效应。1981年, 崔琦等在砷化镓异质结中发现 $\nu = 1/3, 2/5, 3/5, \dots$, 这就是分数量子霍尔效应。一般分母为奇数, 但最近又发现分母为偶数的结果 ($\nu = 5/2$)。整数量子霍尔效应可以用磁场下朗道能级被填充来解释 (适当考虑无序引起的局域化效应, 可以解释平台的形成), 其物理图象是清楚的。分数量子霍尔效应的理论解释就要困难得多。Laughlin 提出的理论认为它的基态为一种新的量子液体, 而且其元激发具有表观的分数电荷, 从而可以解释其基本的物理结果。如果进一步考虑混合取向的自旋问题, 也能够解释新近发现的偶数分母的结果。1983年, Mendez 在稀二维电子气中观测到一些 Wigner 设想的电子点阵的迹象, 而其经典的对应体, 则是由液氮表面上沾附的电子构成的二维 Wigner 点阵, 这样结果也就更加明确。

如果将量子阱的一个尺度加以缩减, 那么就可以向量子阱线过渡, 相应地霍尔平台也就逐步消失。这方面的研究仍在继续进行。人工一维结构的物理学也是颇有诱人前景的领域。

除了上述的整数维的低维体系外, 还存在分数维的体系, 这就是和分形 (fractal) 结构有关的问题。分形几何学的研究在数学界早就开始, 但只有在 Mandelbrot 的书中对它进行系统阐述之后, 物理学界才开始认识其重要性。考虑一个点 (或基本单元) 的集合, 如果它具有标度不变性 (scale invariant), 图象的基本特征就不会随着标度的涨缩而改变, 这种标度不变性可以用分形维数来表征。考虑从一点出发, 以 r 为半径作一球面, 球面内的点数 (或基本单元数) $k \propto r^d$, d 即分形维数。对于布满点的线, $d = 1$; 对于布满点的面, $d = 2$; 对于布满点的球, $d = 3$ 。分形结构具有大量的孔隙, 因此 $d < 3$, d 可以是分数。可以设想一些规则的分形图象, 如 Canfor 点集合 ($d = 0.6309$), Sierpinski 线集合 ($d = 1.5849$)¹⁾。自然界也存在一些分形, 如雪花的枝晶、粒子聚集图

形、高分子凝胶等, 有的规则, 有的不那么规则。这说明有关分数维结构的研究是有其现实意义的。有关分形的能谱、相变、动力学等方面的问题, 仍然有待于解决。

三、无序体系

结构比较简单的三维完整晶体是传统固体物理学研究得最透彻的领域。目前, 采用能带理论的形式 (如密度泛函、从头算的赝势等), 利用大型计算机这一有力工具, 可以相当准确地计算出一些基态的参量, 甚至某些激发态和简单的相图, 计算出来的物理性质和实测值的差异在百分之几以内。六十年代初, 赛兹曾经说过, 要从固体物理的基本理论来计算出物性参数, 恐怕是二十一世纪的事。大型计算机的出现, 使情况有很大的改变, 提前实现了赛兹的预言。因而理论研究的重点从完整晶体转向更加无序的体系, 如缺陷、表面、界面、合金、玻璃态、液晶、熔融聚合物、熔盐、简单液体。

非晶材料古已有之, 二氧化硅玻璃已有几千年的历史。现代的发展在于创造了许多制备非晶材料的方法, 如急冷、溅射、辉光放电、不完全扩散等, 扩大了非晶材料的品种, 如金属玻璃、可掺杂的非晶半导体等。这些材料在技术上也获得了重要的应用。

这样就出现两个极端情况: 一个极端为具有周期结构的晶体; 另一个极端为没有周期结构的非晶。是否有介于其间的结构存在呢? 答案明确地给出了。Shechtman 等于 1984 年在急冷的 Al-Mn 合金中发现了准晶, 表明确实存在三维周期结构的物质²⁾。

事实上, 一维准周期结构早已为人们所发现。在合金和化合物中除了基本的晶格以外, 还可能存在长周期的调制结构。如果晶格周期 a 与调制结构周期 p 之比 q/p 为一有理数, 那就形成了一维长周期超晶格; 若 q/p 为一无理数, 那么, 在这一维度上, 严格说来就没有周期

1) 参阅本刊 1986 年第 5 期第 269 页刊载的黄韵的文章。
2) 参阅本刊 1985 年第 8 期第 449 页刊载的郭可信的文章。

性了,即晶胞的尺寸趋于无限大.这就是一维准周期结构,通常称为无公度相(incommensurate phase),它是两个相互竞争的周期而彼此又无公度的必然结果.它虽无周期性,但长程序性仍然保留,每一个原子的位置还是由确定的指令所决定.至于二维准周期结构,在数学物理学家 Penrose 设计的拼接图形中,已显示其端倪.准晶发现以后,又发现了一系列具有十重对称性、十二重对称性和八重对称性的二维准周期结构,沿着高次轴的方向具有严格的周期性,而垂直于高次轴的平面则为准周期结构.至于三维准晶,主要是二十面体相,其点群为 $5\bar{3}2$ 或 $m\bar{3}m$. 值得注意的是准周期结构虽然不具有严格的周期性,但仍然有长程序,而且其衍射图象具有明锐的斑点.已经证明,三维准周期结构相当于六维周期结构在三维“超截面”上的投影.高维空间周期结构的引入是并不难理解的.正如一维准周期结构对应于二维周期结构在一无公度方向的直线上的投影,三维准周期结构必然对应于六维周期结构的投影.至于非晶结构,近年来也有人尝试用弯曲空间中的周期结构的投影来理解这一问题.这可能为进一步将非晶结构分类提供线索.

上面讨论了空间序的周期性、准周期性与非周期性,而在动力学系统中,存在有时间序的周期性、准周期性与非周期性(或混沌性).两者是遥相呼应的.试考虑耦合摆,其固有周期分别为 q, p . 可能存在 q/p 为有理数的周期运动和 q/p 为无理数的准周期运动,或在一定条件下出现完全无规的混沌式运动.目前,非线性动力学体系的理论已在凝聚态物理学中获得日益广泛的应用.空间序与时间序的类比性也是一个耐人寻味的课题.

下面谈谈无序体系的基本理论问题.早期,无序体系理论着重考虑无序体系的平均效应:在处理宏观的不均匀媒质问题时,发展了“有效媒质理论”;在处理固溶体的电子结构问题时,发展了相干势近似(CPA)理论.这些理论在一定范围内应用,获得成功.但存在一个共同的缺点,这就是有许多关键性的变化,由于

平均化的处理方法给抹平了,得不到适当的反映.近年来无序体系理论的发展趋向是更加着重于渗流、局域化和阻挫(frustration)等反映无序的内禀性质的概念的引入和应用.

渗流这一概念发展为处理宏观不均匀介质中传输的理论方法,它是在讨论多孔介质中流体的渗透问题时提出的.只有当孔隙连通为无限长的通道时,流体方能从一侧渗透到另一侧.存在有渗流阈值,它对应于无限长通道出现时空隙所占的比例.在进行具体的理论处理时,通常采用规则点阵上为两类不同粒子所占有(格坐渗流),或者格点之间最近邻键有两种(键渗流),渗流阈值对应于无限大簇的出现.渗流阈值附近的行为类似于一种几何相变,可以将相变与临界现象的近代理论(标度律与重正化群)借用过来处理这一问题.

局域化是处理微观无序但宏观均匀的介质中传输问题的理论方法.安德森于1959年首先提出无规势场导致电子局域化,实质上这意味着在无规点阵中扰动不能以波的形式传播,可以用一系列悬线长度不等而相互接触的球体所构成的耦合摆来进行直观的演示.莫特引入迁移率边 E_c . 对安德森局域化作了解释.如果 $E > E_c$, 则电子将处于扩展态; $E < E_c$, 则处于局域态.因而若费米能级 $E_F > E_c$, 则为金属态; $E_F < E_c$, 则为非金属态;当 $E_F = E_c$, 则发生金属向非金属转变.实际上,安德森局域化不仅对于明显的无序体系是重要的.通常金属中总有少量无序分布的杂质原子,特别是在低维导体中,局域化将起重要的作用.Thouless 和安德森等发展了电导的标度理论,认为二维材料在 0 K 时是局域化的,这表明随着维数的降低,无序的效应就更为突出了.

阻挫是用来表示一个体系无法同时满足不同的有序化指令的要求.例如,晶格的有序化要求体系为平面三角点阵,而自旋相互作用则要求体系呈现反铁磁性.然而这两者是无法兼容的,必然导致阻挫出现.又如电子间相互作用要求电荷密度波出现,如果它的周期与晶格周期是不相容的,也会导致阻挫出现.阻挫和

单纯的无序(引起安德森局域化)在概念上是有着差异的,它可以单独出现,也可以伴随无序一起出现,自旋玻璃即为后一情况的实例。

下面讨论一下与无序体系有关的相变问题。金属-非金属转变是一个受到重视的问题。应用渗流理论,可以处理金属颗粒-非金属颗粒混合物中的转变问题;同样也可以处理超导相与非超导相混合物中的超导转变问题。有的金属-非金属转变可以用能带度越或 Peierls 失稳来解释。莫特曾研究了强的电子关联起主导作用的电子气从气态到液态的转变,这种转变称为莫特转变。由无序引起局域化所产生的转变称为安德森转变。如果电子关联与局域化同时起作用就称为莫特-安德森转变。实际体系中的金属-非金属转变往往比较复杂。早在高 T_c 钙钛矿结构的超导体问世之前,人们就开展了钙钛矿结构氧化物的金属-非金属相变的研究,目前这方面问题的研究更加引人注目。看来,在这类相变中,安德森转变扮演了重要的角色。

另一类转变称为各态遍历-非各态遍历(ergodic-nonergodic)转变。顺磁相-自旋玻璃转变就是一个例子。转变过程的比热测量表明,这类转变和平衡态相变相类似,但低温相的自旋不是有序化的排列,而各个自旋是无规的,象玻璃一样,因而得名。这样,相变是由一个无序相向另一无序相转变。这两个无序相间的差别在于高温相的自旋无序是各态遍历的,而低温相的无序是锁住的和非各态遍历的。和自旋玻璃相类似的有铁电玻璃、四极矩玻璃等。而高 T_c 氧化物超导体中的颗粒超导性,也有人比之为“相位玻璃”,即每一颗粒中超导序参量的相位是确定的,但具有任意值。甚至液态到非晶态转变也可以认为是各态遍历-非各态遍历转变的一个特例。

和平衡态相变相似之处是在远离平衡态的突变现象,这在液体力学中有许多著名的事例。与凝聚态物理学有密切关系的 Rayleigh-Benard 对流可作为例证:考虑一薄层液体,上冷下热,由于热胀冷缩而成为头重脚轻的体系,潜伏了失稳的可能性。当温度梯度(更确切地说是

Rayleigh 数)增加到一临界值时,就产生分解-失稳,自发出现对流胞的图象,此时对应于宏观无序的液体转变为既有空间序(Benard 胞的图象)又有时间序(周期性的对流)的体系。但随着 Rayleigh 数的继续增长和逐次分岔解的不断涌现,通过周期不断加倍的过程,终于使周期趋于无限大,达到混沌态,然后又经历了有序-无序转变的过程。这样,非线性动力学体系的理论又和凝聚态物理学的若干基本问题(如空间序与时间序的出现、演示和消失)联系起来,构成了一个值得重视的新领域。

链状分子体系是另一类的无序体系。短链的液晶分子,位置无序而取向有序,构成了液晶物理学这一新的分支学科的主要内容。长链的聚合物的研究和标度律、分形等新概念的引入,使高分子物理学取得了卓有成效的进展。胶束(micelle)与微乳胶(microemulsion)也成为凝聚态物理学家研究的新对象。

四、人工微结构材料及其物理学

自然科学的任务是研究和探索自然界的基本规律,并在掌握规律的基础上来改造自然,为技术革命作出贡献。凝聚态物理学已经在这方面发挥了重要作用,而且还会进一步大显身手。利用凝聚态物理学所掌握的规律,进行材料的人工设计来填补自然界的空白,就成为凝聚态物理学家和材料科学家共同关心的问题。当然,配制新的合金,合成新的化合物,生长新的晶体也属于这一类型的问题。但这里要着重讨论的是一些已知的材料,对其微结构进行控制和设计,可以获得具有全新性能的人工微结构材料。材料结构的人工设计也是渊源甚久。钢筋混凝土就是材料宏观结构设计的一个典型实例。钢筋与混凝土是力学性质截然不同的两种材料。前者既能承受压力,又能承受张力,但价格较贵;后者只能承受压力,但价格便宜;混合在一起,取长补短,就成为最常用的建筑材料。随后人们在缩小尺寸方面进行了研究,形成了一系列的复合结构材料,如玻璃纤维增强塑料,炭纤

维、碳纤维增强的树脂与金属材料。复合的方式可以完全通过人工的方式来实现,也可以利用某些自然的过程,例如控制共晶定向凝固过程,使得纤维状的第二相平行地排列在基质之中。在聚合物材料中,决定强度的是分子链的键合。在通常的聚合物材料中,分子构形是杂乱的,使得键强不能充分发挥出来。因此,获得特高强度的高分子材料的关键在于将其分子链平行排列起来。为此,我们可以对其凝固或脱溶过程施加外加的影响,或者采用在液态就具有方向序的液晶高分子材料。现在已经有一些商用材料(如 kevelar)达到了钢的强度而比重却要轻得多。上述的一些复合方式也可以应用于功能材料。例如, PZT 的压电性能优良,而力学性质差一些,将 PZT 丝的列阵埋在树脂之中,即可以获得上述两方面性能都较优异的压电换能器。

上述复合材料的复合方式是将平行排列的纤维安置在一定的基质。我们可以设想另外一种复合方式,即以薄膜为基础,形成多层或一维周期结构。半导体器件就是用基板上外延的薄膜制成的。后来,半导体激光器的发展,导致不同材料构成的多层次异质结的出现。七十年代初,江琦就对半导体超晶格作了理论设想:两种组分不同的半导体(如 GaAs 及 GaAlAs)排列成一维周期结构的超晶格,若其周期小于电子的平均自由程,超晶格将会由于能带结构引入了次带,从而产生一系列新的物理性能,如负电阻效应等。随后张立纲、朱永祥等应用分子束外延方法获得了界面匹配良好的超晶格,演示了一维势垒和势阱的量子力学效应,而且在量子阱中的二维电子气获得了特别高的迁移率,有可能作为高迁移率器件,因而有相当大的应用前景。随着组分超晶格的实现,人们又发展了调制掺杂的超晶格,即基质相同,通过调制掺杂,使之成为 n-i-p-i 的周期结构。后来又出现了应变超晶格,即界面匹配并不良好,但由于层厚甚小,应变可以使之保持其共格性。这样,构成超晶格的材料体系的范围得到了扩大。另外,由于非晶层间不存在界面晶格匹配的问题,

非晶超晶格也应运而生。超晶格的研究,带来了众多的理论问题,如二维电子气、隧道效应、能带结构的调整、非线性光学效应等,已经成为当今半导体物理学发展的主流。同时,人们还可以根据理论来对半导体的能带结构进行设计,然后在实验室中制备出来,这就是通常所说的“能带工程”。它在超高速器件、高效激光器、光学双稳器件等方面有重大的应用前景。

随着半导体超晶格研究的蓬勃开展,金属超晶格的研究也受到注意。现已观测到在一定调制周期下的弹性模量增强或软化。特别是铁磁层与非磁性层构成的超晶格(如 Gd/Y 系),由于自旋 RKKY 相互作用是随距离作振荡式变化,故调整其周期,可以获得铁磁性或反铁磁性的超晶格。另外,也在 Fe/V 超晶格中观测到铁磁性与超导性这一有趣的现象。

上述的超晶格周期为纳米量级。值得注意的是也可以制备调制周期为微米量级的材料。例如,用直拉法调制掺杂可以获得 LiNbO₃, LiTaO₃ 等晶片多畴的晶体,这实质上相当于微米量级的超晶格。其倒矢量可参与光波与声波的传播过程,有助于实现 k 矢量的守恒(相位匹配),因而有可能具有突出的非线性光学增强效应或超声换能的增强效应。

随着集成电路的集成规模的日益提高,刻线技术要求不断细化。目前已经制出宽度只有几百埃的导电细线,并用这种细线构成了直径为微米量级的微线圈。在低温下,这些正常导电的线圈中可观测到量子干涉现象,即凝聚态物质中的 Bohm-Aharonov 效应。在这样的线圈中,杂质对于电子的弹性散射只改变其相位,而不影响其相干性。这种尺寸的线圈表现出一系列全新的物理的性质,当正常电流通过这种线圈时,其磁通也是量子化的,与超导体中的量子化磁通很相似,但原来公式 $\phi = nhc/2e$ 中的 $2e$ 将为 e 所取代。这些现象表明,在微观与宏观之间存在所谓中介(mesoscopic)区域,在这个区域内,电子的德布罗意波仍然保持其相干性。在这个区域内不仅可以发现许多新的物理现象,而且可以利用它来制造新的器件。这一

区域的存在也表明采用传统工艺方法来发展微电子器件有一物理极限,即集成电路的单元尺寸不能比它更小。

在凝聚态物理学的研究对象与原子分子物理学的研究对象之间,还存在另一中介区域,这就是超微粒。它是从亚微米的尺寸一直到几十个乃至几个原子构成的原子簇。超微粒具有异常的红外吸收和微波吸收性能以及化学催化性能,在技术上很有潜力。在超微粒的电子理论的研究中,目前有两种截然不同的理论处理方法:一是从大块材料的能带理论出发,加上量子尺寸效应的修正;另一是从量子化学出发,逐步扩大原子簇的尺寸。久保早就提出了原子簇的统计理论,认为随着原子数的增长会交替出现抗磁性和顺磁性的奇偶效应。近年来,有关原子簇的实验研究也日趋活跃,由质谱仪对原子簇的丰度的研究表明,不仅存在奇偶效应,还有类似于原子核壳层结构的幻数(magic number)效应以及同位素效应等;而原子簇的化学性质也随原子数的不同而有明显的差异。这些结果表明,这一中介区域也是一个极待发展和大有可为的新领域。

五、结 语

前面已简略地论述了当今凝聚态物理学发展中的一些最为活跃的前沿领域。当然,本文不可能将所有的重要问题都逐一提到,下面概括一下总的发展趋势。

首先应该注意到研究对象的日益复杂化。就半导体材料而言,锗、硅最为简单,其次是砷化镓及其它 III-V 族化合物等,再进一步是超晶格和高分子半导体材料,复杂化的趋势明显可辨;就超导材料而言,也是如此,从简单的金属到 Nb-Ti 合金和 Nb₃Ge 等二元金属间化合物,Cheverel 相三元金属间化合物,直到四元、五元或更多元的氧化物陶瓷超导体。研究对象的复杂化,也反映在从均匀相到非均匀相,从完整晶体到不完整晶体,从有序体系到无序体系和从平衡相到非平衡相的发展趋势。值得

物理

注意的是,人们对高分子材料中的基本物理问题已经开始有了轮廓性的了解。不少凝聚态物理学家如 Edwards, de Gennes, Schrieffer, Heeger, Stanley 等都进入了这个领域,参与了其中的研究工作。显然,这将有助于开拓更加复杂的生物大分子物理学这一新领域。

其次,值得注意的是凝聚态物理学中各个分支学科,如半导体物理、金属物理、磁性物理、电介质物理,低温物理等之间的交叉也日益频繁。对从事凝聚态理论研究的人来说,这种现象早已存在。例如,莫特的研究范围包括金属的位错理论、非晶半导体的传输理论、离子晶体理论、金属-非金属转变理论等,研究的范围极其广泛。安德森也是如此。目前凝聚态物理中的实验研究工作也有这种迹象。例如,高 T_c 超导的发现者 Müller 在氧化物的结构相变方面,已经进行了二十多年的工作,是这一领域国际知名的专家。但转而研究超导体只是最近二、三年的事情。所以我们不必将分支学科看得太死,有不少有价值的发现会出现在相互交叉的领域之中。

还要注意到基础研究既有其可预测的一面,也有其不可预测的一面。究竟在什么地方会冒出一个重大发现,往往是难以预测的。为了做规划,美国 National Research Council 邀请了许多专家编写了一套丛书,书名是《九十年代的物理学》。应该说,这些专家的水平很高,编写得很不错。但是在展望凝聚态物理进一步发展时,根本没有估计到一、二年就出现的高 T_c 超导研究的热潮。很有意思的是高 T_c 氧化物超导体的发现,正好出现在美国对超导研究经费支持的低谷。这个例子很可以说明基础研究在那里突破,确实有其不可预测的一面。

物理学有大、中、小之分。象粒子物理学就是以大物理为主的,第一流的实验工作离开了巨型加速器。凝聚态物理学也有大、中、小之分。所谓大物理指的是使用投资近亿元的设施(如同步辐射加速器,高通量中子反应堆等)来进行工作;中物理指的是使用投资上百万元的设备(如分子束外延装置、表面分析仪器、高压高

分辨电镜等)来工作;小物理是指应用一般常规设备进行研究,当然也不排除偶而应用一下中、小型设备。据统计,凝聚态物理学的论文作者数的峰值出现在2—3人处。这一结果表明凝聚态物理学的研究工作是以两三个人的研究组来进行的,是以小物理为主的。不一定要在设备齐全的大型实验室才能做出第一流的工作。一件值得注意也很令人鼓舞的事实是连续两年的诺贝尔奖金物理学奖的获得者出自于苏黎世的IBM公司的实验室。这个实验室规模不大,只有70多个科学家在工作,设备一般。起关键作用的还在于科学家的素质与实验室的工作状况,即要求科学家要有创新的物理思想,要有实现这些想法的基本实验手段以及活跃热烈的学术气氛。

本文是根据作者在1987年11月于无锡召开的中国科学院数学学部会议上所作的报告,以及随后在北京中国科学院物理研究所所作的两次报告整理而成

的。感谢章宗同志、杨国桢同志以及李荫远同志对作者所作的盛情邀请,使我有机会整理一下对这一方面问题的看法。感谢冯步云同志将录音整理成为初稿。本文参考了美国National Academic Press出版的“Physics through the 1990s”一书中的“Condensed Matter Physics”分册(1986)。

[编者注:这是一篇高水平的综述凝聚态物理学发展的文章。为了更好地理解此文,有兴趣的读者可以参阅以下本刊已刊载的文章:(1)于淦、郝柏林,相变和临界现象(I, II, III), 9(1980), 376, 472, 545; (2)冯端,凝聚态物理的回顾和展望, 13(1984), 193; (3)管惟炎,宏观量子现象——超流动性, 14(1985), 193; (4)郭可信,五次对称与准晶态, 14(1985), 449; (5)章立源,重费米子系统及其超导电性, 15(1986), 7; (6)谢希德,八十年代的凝聚态物理学, 15(1986), 248; (7)黄煦,分形维数和分形凝聚, 15(1986), 269; (8)江丕桓,量子霍耳效应的发现, 15(1986), 393; (9)阎守胜,近年来凝聚态物理学的进展, 16(1987), 390; (10)王迅,金属超晶格, 16(1987), 597; (11)吴自勤、毕龄松,电子全息术及其应用, 16(1987), 723; (12)Anil Khurana,高温超导研究进展, 17(1988), 129; (13)黄昆,超晶格和量子阱研究中的若干问题, 17(1988), 385; (14)陈立泉,无稀土高温超导体, 17(1988), 439]

第五届国际中国科技史会议在美国圣迭戈举行

第五届国际中国科技史会议于1988年8月5日至10日在美国加州大学圣迭戈(San Diego)分校举行,会议由该校物理系程贞一教授主持。参加会议的代表共130多人,他们来自中国、美国、法国、英国、联邦德国、日本、澳大利亚、比利时、瑞士、马来西亚、新加坡、南朝鲜等。中国的台湾和香港也派代表参加了会议。会议代表共提交论文摘要175篇,分别在下列二十个组内宣读:大会报告,数学,宇宙学与天文学,中国医药史的新探索,中国十三世纪后的数学,生物学与农学,中国文化中的印刷,物理技术,炼丹与化学,冶金学与金属技术,声学,声学,物理学,天文学(观察、仪器、历史),地学(地理、制图学、地质学、地震学),语言,哲学和科学,医学与药理学,东、西方科学技术的交流,科学、技术和责任的历史回顾:日本的化学战与生物(细菌)战,现代科技的发展,传记。会议排出了报告时间表,代表们可任意选择听讲。除8月7日(星期日)组织旅游与参观外,其余时间都是连日宣读论文与开展讨论,气氛之热烈可谓空前。这次会议参加代表人数之多,代表来自的地区之广,论文之多与涉及领域之广,都超过前几届。特别是在物理学史方面,过去论文只有很少几篇,代表只有一、二人。而这次有关这方面的代表人数骤增,提交的论文数也增加到20多篇,并且有的论文材料新颖,见解精辟,受到与会代表的好评。

有关物理学史方面的论文摘要的作者姓名和题目如下:

王锦光,中国古代物理学史简介(特邀报告); L. B. Borst, 史前的尺; 陈大鹏, 论半坡出土的尖底瓶的稳度; 洪震寰, 《淮南子》物理知识初探; C. Cullen, 明代科技家的物理思想; 薄忠信, 元气考辨; 戴念祖, 中国古代用相对性原理来解释地球的运动; 王先冲, 中国古代的电与磁; 王锦光, 中国古代的颜色科学; 李志超, 方以智派的成象论; 刘昭民, 中国古代的海市蜃楼知识; 毛增滇等, 用现代方法研究西汉透光镜; 戴念祖, 喷水鱼池的起源及物理分析; 沈星扬, 中国编钟声学; 戴念祖, 中国编钟的特征及其在文化史上的意义; 程贞一, 双音编钟与十二音阶; E. G. McClain, 汉代科技研究的错误: 声学的纠正; J. S. Major, 《淮南子》(第三篇)的和音和数字论; 沈星扬, 中国竽(吹管)的音响结构; E. G. McClain, 汉律管新定论; 刘秉正, 中国古籍中的司南的真正意义; 闻人军, 论古代司南的意义及其发展; 苏冠文, 论西夏物理学的成就。

由此可见,第五届国际中国科技史会议在物理学史方面已经大大前进一步,希望今后在这方面能更加蓬勃发展。

(杭州大学物理系王锦光)