

# 我国凝聚态物理学进展概况

· 秋叶

记得杨振宁先生曾在中国第三届吴健雄物理奖大会上说过：“物理学在二十世纪最后的这些年，发展的方向非常之多。……非常高兴的是刚才黄昆念的六个初选的工作题目，都是凝聚态物理方向的，这是非常正确的方向。我个人认为，凝聚态物理是以后十年、二十年物理里头最有发展的方向。”“这么多的中国年轻人，走到凝聚态物理的方向，表示这个方向是很正确的”。

现代物理学发展的历史，也证实了杨振宁的看法。大家知道，物理学的研究一直是从处理简单系统的规律入手，如牛顿力学、麦克斯韦的电动力学都是如此。不过，诚如冯端在一篇题为《21世纪的凝聚态物理学》文章所言，在经典物理学中物的成分较小，理的成分较大。但自从量子力学和统计物理的发展使人们掌握了认识物质世界的钥匙后，物理学中物的成分与理的成分相互平衡，平分秋色。随后是粒子物理与凝聚态物理分道扬镳，前者探索更微观领域内简单系统的基本规律，而后者则面向复杂的物质世界。

凝聚态物理学的发展，生动地体现了从简单物质向复杂物质发展的规律。而对称破缺导致有序相的出现，却是凝聚态物理学的核心问题。它的重要成果之一，在于初步理解物质系统层现性质。如诺贝尔物理奖得主德燃纳与爱德华兹等，在液晶物理和高分子物理等领域中出色的工作，就是将处理简单物质行之有效的方法逐步引伸去处理化学成分和结构层次更为复杂的物质。由此可见，凝聚态物理学正在向化学、生物等相邻学科中渗透，甚至将导致物理学本身面目的改变，物的成分将进一步加重，可能会盖过理的成分。这一特点，被冯端等著名物理学家看成是21世纪物理学的重要特征。

去年，《物理学进展》杂志出版了《凝聚态物理学进展》专辑，报道了我国凝聚态物理学近十几年的进展，总结了我国在晶体物理与材料设计、高温超导体、理论凝聚态物理学、实验凝聚态物理学、晶体缺陷与结构相变、多层膜与超晶格和纳米材料几方面的成就，介绍了我国著名物理学家冯端在凝聚态物理领域的突出贡献。现将该专辑的文章介绍于后。

## 第一部分 理论凝聚态物理学

### 一 晶体物理与材料设计

#### 1 陈创天、俞琳华：钙钛矿型晶体的倍频系数和离子位移、能带结构间的关系

作者系中科院福建物质结构研究所科研人员，曾于1974年提出“非线性光学效应的离子基因理论”，对钙钛型等体系的倍频系数作了理论计算；又于1981年建议采用“晶体倍频系数的平均能带近似算法”；在此基础上，作者从能带理论出发，计算了钙钛矿型晶体的倍频系数，认为由“平均能带近似法”仍可得到“钙钛矿型晶体倍频效应基因理论”几个基本论点，给出后者

的近似等级，揭示  $\text{Sr-TiO}_3$ 、 $\text{KTaO}_3$  晶体电场感应倍频系数  $\chi^{(2)}/\chi^{(2)0}$  比值的变化与中心 B 离子的相对位移、能带结构、B-O 键离子性之间的关系；通过倍频系数和能带结构关系的研究，有可能把晶体倍频系数作为检验能带结构是否正确的一个新的数量；由作者提出的计算公式，可以计算出在外电场作用下中心 B 离子相对于配位体氧原子的位移量  $\Delta Z$ ，并和外电场作用下的感应自发极化  $P_s$  的实验值相一致。

#### 2 蒋民华：非线性光学晶体材料的研究进展

作者系统地介绍了山东大学晶体材料研究所非线性光学晶体材料等方面的研究进展，主要表现在如下方面：从 KDP 到 KTP，从 LAP 到 OMC，从 NdPD 到 NYAB，从 LT 到 SBN，从体块到薄膜，从晶体化学到晶体物理，这是一个逐步深化基础研究、不断开拓新领域的过程。

#### 3 闵乃本：微米超晶格的概念、效应和应用

作者在引言中介绍了微米超晶格理论的发展简史，认为在1969年 Esaki 和 Tsu 提出了半导体超晶格的概念后，20多年来世界各国都开展了大量的理论与实验研究，致使半导体超晶格在今天已成为发展光电子学和微电子学器件的重要材料。半导体超晶格的周期(特征长度)为纳米量级，可与 de Broglie 波波长比拟，小于电子的平均自由程，因而产生一系列新颖的效应。鉴于其特征长度，可把半导体超晶格称之为纳米超晶格。在介电材料中重要的物理过程，是经典波(光波和超声波)的传播与激发过程；在具有调制结构的介电晶体中，与微米量级的调制周期相应的倒矢量将参与经典波过程，并产生重要的光学效应和声学效应。因而将这类材料称为光学超晶格、声学超晶格或微米超晶格；这是一种新型的人工微结构材料，在发展新颖的光电子学器件和声电子学器件方面有着重要的应用前景。早在1962年，Bloembergen 等指出，利用非线性极化率的周期跃变和准位相匹配，可实现非线性光学过程的增强。关于光学超晶格的设想，首先在聚片多畴  $\text{LiNbO}_3$  单晶体中实现，观测到倍频光的增强。最

近的实验与理论结果表明,可以利用光学超晶格获得倍频蓝光、获得二次谐波谱、直接获得三次谐波、去设计四通可调开关,以及利用具有微米超晶格结构的光波导将半导体激光器的红光转变为蓝光。在研究弹性波在声学超晶格中传播与激发之后,工作频率高过1000MHz的体波谐振器和换能器已利用LiNbO<sub>3</sub>和Ba<sub>2</sub>NaNb<sub>5</sub>O<sub>15</sub>声学超晶格材料研制成功。

作者认为,通过固体微结构的调制,使晶体材料的物理常数得到调制,若调制波长为微米数量级,可与光波、超声波波长比拟,将会出现一系列新颖的非线性光学、光学、声学效应,并在光电子学和声电子学中得到应用。作者将这类人工微结构材料称为微米超晶格或光学超晶格和声学超晶格,“微米超晶格”概念是“聚片多畴”概念的发展。

作者指出,基于生长条纹对铁电相变和铁电畴结构的影响的研究,成功地制备出一种新型的聚片多畴微米超晶格。通过系统的理论分析与实验演示,证明了这类材料将产生重要的光学和声学效应,并能设计和制备成新型的光电子学、声电子学器件。作者认为:运用近代实验技术控制或调制固体微结构,从而能够发展一种新型的具有预定微结构的人工晶体材料。

#### 4 柳百新:离子束与固体作用的研究:非晶化与分形

作者简要地介绍了离子束与固体作用的非平衡特点和离子束方法实验上的特色;概述了离子束混合研究非晶化的进展与作者提出的预言金属玻璃形成能力(GFA)的唯象模型,以及根据热力学计算的自由能图对GFA和相关的自发非晶化的诠释。

近年来,作者及其研究组用离子束方法研究分形现象,其主要成果有:非晶态结构相变中形成的分形及其亚稳性,磁相互作用对分形凝聚过程的影响,固体薄膜中形成的各种分形新结构,以及首次在非晶态固体中观察到的一种线缺陷,即具有自相似性的旋错环,这种旋错相当于晶体中的位错。

作者认为:离子束方法引入到凝聚态物理学的若干重要课题的研究中之后,揭示了许多新的现象,也开拓了新的研究课题,如离子束混合由于具有高达 $10^{11}$ — $10^{14}$ K/sec的等效冷却速率,因此扩大了非晶态合金的形成能力。又如离子束混合和离子注入在薄膜中诱导的分形生长,参与的凝聚粒子在 $10^{11}$ — $10^{12}$ 量级,这比目前计算机模拟所能做到的粒子数至少大 $10^6$ 倍;而薄膜是一种有利于二维分形生长的环境,因此能提供丰富多彩的分形生长实验结果,以推动分形理论的发展等等。

## 二 高温超导体

### 1 甘子钊:CuO<sub>2</sub>平面上空穴的运动

作者讨论了在外加空穴浓度较低的情况下,CuO<sub>2</sub>

平面上外加空穴的状态和运动,发展了理论处理这个问题的方法。

作者在引言中指出:CuO<sub>2</sub>平面上外加空穴的运动的了解铜氧化物的高 $T_c$ 超导电性上起着重要的作用,超导铜氧化物的母系(如La<sub>2</sub>CuO<sub>4</sub>,YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>等)的CuO<sub>2</sub>平面的电子态可近似为Cu3d<sup>9</sup>和O2p<sup>6</sup>。从满壳层的铜离子(Cu3d<sup>10</sup>)和氧离子(O2p<sup>6</sup>)出发,可看作是每个铜离子上有一个空穴,由于强的库仑排斥作用,这个空穴是局域化在铜离子上的,具有自旋1/2。此系统的基态是反铁磁的绝缘体。掺杂引入到CuO<sub>2</sub>平面上的外加空穴是出现在氧离子上的。

作者还就相干态表象描述自旋前景、单个外加空穴的运动、有一定浓度的外加空穴及外加空穴浓度较高的情况进行的研讨,提出了作者自己独到的见解。

### 2 赵忠贤:有关高温超导研究进展的几点看法

作者在文中讨论了高温超导体在结构表征、物理和化学特性等方面研究的某些进展,高温超导体的一些弱点,如相干长度短、各向异性强、超导非均匀性等都会影响其物理性质和应用。作为一个强关联系统,高温超导体的正常态性质已能用目前的理论来定性描述,但充分理解高温超导体的正常态性质和超导机理仍然存在很多问题。高 $T_c$ 薄膜和多层膜取得令人瞩目的进展,为制备高 $T_c$ 微波器件和超导量子干涉器件(SQUID)提供了基础,可望在未来几年内获得应用。

作者认为:与传统超导体相比,高温超导体的特有性质使我们在理论和应用方面都遇到一些困难,但也提供了机会。高温超导电子学器件的研究工作,取得了令人瞩目的进展,今后几年里可望在某些领域投入使用;而大规模强电应用还需要更长的时间,有些关键技术问题有待解决。材料方面有关高温超导体的结构特征,化学性质和物理性质的研究已取得了很多结果,虽还不完全,但对我们了解材料的制备方法和结构、性质以及强相关系统理论极为重要。作为一个强关联系统,目前的理论已能定性描述高温超导体的正常态性质,但对高温超导态和正常态性质的根本认识还需做艰苦的工作。高温超导体有着与传统超导体相同的超导特性,即:零电阻特性(电阻率小于 $10^{-11}\Omega\cdot\text{cm}$ ,1987年的测量结果),Meissner效应,磁通量子化和Josephson效应。BCS理论是能解释所有这些现象的唯一理论。BCS方程也用来描述高温超导体的超导特性,但这并不意味着高温超导体就是BCS超导体,唯象的G-L理论能较好地适用于高温超导体,但高温超导体的配对机理还不清楚。

### 3 王业宁:高 $T_c$ 氧化物超导体在 $T_c$ 附近的内耗与超导电性

作者认为:内耗与超声测量表明,在高温氧化物超导体YBaCuO, BiSrCaCuO和TiBaCaCuO中,在

临界温度  $T_c$ 。以上几度至几十度范围总存在一个与晶格参数跳变相关的类相变,铁弹回线,形状记忆效应以及弹性软化( $C'$  和  $C_{66}$ )是这种类相变的主要特征。TlBaCaCuO 和 BiSrCaCuO 在  $T_c$  以上有一高的背景平台 ( $Q_p^{-1}$ ), 在  $T_c$  以下随温度很快下降 ( $Q_p^{-1}$ )。YBaCuO 的  $Q_p^{-1}$  随氧含量的减少或掺 Pr 量的增加而降低,  $Q_p^{-1}$  的起源可归因于带有动态畸变云的载流子。考虑了能隙边的宽化从  $Q_{ps}^{-1}/Q_{pn}^{-1}$  值求得 BiSrCaCuO 和 TlBaCaCuO 超导体能隙值为  $2\Delta_0/kT_c \approx 4$ 。

作者在引言中指出: 在高温超导体发现以后, 人们想到是否也像 A15 超导体一样, 在其临界温度  $T_c$  以上存在某种晶格不稳定或相变。为此, 人们开展了大量研究。内耗 ( $Q^{-1}$ ) 与超声衰减 ( $\alpha$ ) 对相变或弹性不稳定很敏感, 常可给出特别而有用的信息。首先用内耗和超声衰减发现, YBaCuO、BiSrCaCuO 和 TlBaCaCuO 中两个温区 ( $\sim 100\text{K}$  和  $200\text{K}$  附近) 内出现与晶格参数跳变及弹性软化有联系, 但无结构对称性改变的类相变 (PLT) 峰; 而当这类样品  $T_c$  下降较大或不超导时, 不出现  $100\sim 200\text{K}$  附近的 PLT。

近年来, 作者及其研究组进一步研究了类相变的特征, 部分澄清了不同测量结果中存在的分歧。关于  $200\text{K}$  附近的峰, 绝大多数人都认为是某种相变引起的, 而靠近  $T_c$  的峰尚无一致结论, 特别是 YBaCuO。在传统金属超导体的  $T_c$  附近, 正常态的超声衰减 ( $\alpha_n$ ) 很高, 是电-声子相互作用所引起(称为电子阻尼), 在  $T_c$  以下发生陡降 ( $\alpha_s$ ), 并有  $\alpha_n/\alpha_s = 2/[1 + \exp(\Delta/kT)]$ 。从这一关系可求出能隙值  $\Delta$ 。对于 YBCO, 也有人测出  $\alpha$  或  $Q^{-1}$  在  $T_c$  以下有陡降趋势, 但有不少人认为, 由于  $T_c$  如此高,  $T_c$  附近不可能有电子阻尼的贡献。另一方面对于 YBCO,  $T_c$  附近有两个弛豫型内耗峰, 因此  $T_c$  以下的陡峰可能是属于弛豫峰的低温边。

#### 4 丁世英: 高温超导体磁结构的各向异性

作者综述了铜氧化物高温超导体磁结构的一个重要特征, 即磁通(涡旋)线的几何结构、磁通运动、磁通钉扎和临界电流的各向异性。作者认为: 铜氧化物高温超导体(铜氧高温超导体)是典型的第二类超导体, 除了具有转变温度高、相干长度短、Ginzburg-Landau 参数大等特征外, 高度各向异性也是其基本特征。各向异性表现在不同的方面, 如晶体的结构和微结构、宏观电磁性质、微观电子性质等等。它们除对高温超导体的许多性质都有重大影响外, 对于理解高温超导电性和超导体的技术应用也十分重要, 因而是高温超导研究工作的热点之一。

### 三 理论凝聚态物理学的若干问题

#### 1 龚昌德: 分步 Peierls 相变理论一维度效应

作者重新考察了链状结构材料中的 Peierls 相变,

提出了一种分步 Peierls 相变理论, 原因在于弱的链间耦合导致通常的 Peierls 相变发生畸变: CDW 相变和金属-绝缘体相变不再同时发生, 而各出现于不同温度。应用这一理论不仅可解释一些低维材料的反常, 而且为新的实验所证实。

作者在引言部分写道: Peierls 相变是一类链状结构材料的共同性质。但在一些一维材料的 Peierls 相变实验数据中表现出和寻常的 Peierls 相变不同的特征: CDW 相变和金属-绝缘体 (M-I) 相变并非发生于同一温度。在实际一维材料中常存在或多或少的链间耦合, 它起着一种高维作用。可以预计, 若链间耦合很强, 则实际上系统已成为一三维系, Peierls 相变也不复存在。因此, 研究低维系统特征如何随高维效应的影响而改变, 是一个饶有兴趣的问题。作者在文中还讨论了准链状结构材料。这里的“准链状”是指链间耦合, 一方面足够弱, 一维特征仍然是主要的, 另一方面又足够强, 足以抑制热涨落, 使热力学平衡相变仍然得以实现。在这样的条件下, 原低维特征仍被保留, 但又考虑高维的影响, 可以想象其结果将导致原来的低维系中的 Peierls 相变发生某种畸变。

#### 2 孙鑫: 维度和凝聚态物理

作者根据维度性的分析, 揭示了低维凝聚态具有三维体系所没有的一系列物理特性及其原因, 认为在物理上维度性通过能谱决定了低维不同于三维体系, 在几何上维度性通过拓扑使低维体系具有了特殊性质。

作者引用了冯端在新著《凝聚态物理学新论》中论点, 介绍了近年来出现的具有低维结构的凝聚态体系和新材料, 大体上有三类: 第一类是材料自身具有链状、柱状或层状的结构, 如导电聚合物由高分子链所组成, 有机超导体 (TMTSF, BEDT-TTF) 中的分子堆砌成柱, 高温氧化物超导体中起主要作用的是铜氧层。由于不同的链、柱、层之间的耦合比较弱, 具有链状或柱状结构的材料形成准一维体系, 具有层状结构的材料形成准二维体系。第二类是人工制备的准一、二维结构, 如异质结、超晶格、量子阱、量子线等。第三类是用电场或磁场使部分自由度冻结, 如反型层、窄通道、磁通线等。这些准一、二维体系具有一系列新的物理特性, 而这些特性在三维体系中并不存在。如一维体系中的 Peierls 失稳、Kohn 反常、扭结 (Kink) 载流子; 二维体系中的量子 Hall 效应、K-T 相变、分数统计。

作者分析低维体系会出现三维体系所没有的物理现象, 其原因: 维度是几何空间的自由度, 不同维度的空间有不同的拓扑结构, 因此维度性对凝聚态体系的影响, 直接来自于几何上的拓扑结构。在物理上, 凝聚态的性质决定于体系的能谱。在相同的相互作用下, 维度不同可形成截然相异的能谱。从而使低维体系产生与三维不同的物理现象。因此概括地讲, 维度

# 探索地外智慧生命



晴朗无月的夜晚,在远离城市灯光的平原上,人们用肉眼能够看到的星星大约总共 6000 多颗,由于另一半球的星星在地平线以下,所以,一个晚上人们实际看到的星星不过 3000 多颗。事实上,广袤无垠的宇宙中存在着无数的恒星——遥远的“太阳”。我们太阳系所在的银河系恒星总数约达二三千亿颗。据天文学家观测估计,我们的宇宙中存在  $10^{11}$  个类似于银河系的恒星系(称为河外星系)。

茫茫宇宙中有没有地外“智慧生命”或曰地外文明?这是人类自古以来就非常关心的问题。在世界各地,无论是中国、印度、埃及,或是墨西哥和南美的印第安人那里,都有关于“外星人”的神话或传说。随着天文学的发展,关于存在着外星智慧生命的想法变得越来越具体了。在人类文化史上,不管是唯物主义者还是唯心主义者,都有人认为地球决非智慧生命唯一的栖息地。

## “天狼星人”访问过地球吗

西非马里共和国境内有一个称为“朵根”的部落,该部落从七八百年前起就世代拜祀肉眼看不见的天狼伴星。大约在 1930 年,法国人类学家格雷奥勒和达特莱去那里考察一住就是 20 年,他们与部落乡亲们朝夕相处,朵根人十分信任他们,终于把本民族最珍贵的秘密告诉了外来客人。当时朵根人四位有地位的老者用山加语告诉他们:

天狼星是两颗星,即一颗大星旁边陪伴着一颗小星,小星沿椭圆轨道绕大星运转,天狼伴星虽小但是最

性通过两个途径来决定凝聚态的性质:在几何上通过拓扑,在物理上通过能谱。

### 3 李正中:重费米子合金的自治理论及其应用

本文导出无序合金 Anderson 模型的 SB 平均场哈

重,由一种发光的金属组成。朵根老人当时用手杖在地上画了个椭圆,示意这是伴星的轨道,然后在椭圆的一端画一个小圆圈,即天狼主星,在主星上方画一小点圈,表示伴星,又在椭圆另一端点上许多小点,表示伴星随时在轨道上变动着位置。除此之外,他们还告诉客人木星有四颗卫星。土星有光环。

1950 年,那两位法国人把这些令人惊讶的消息在法文的《非洲科学杂志》上披露出来,读者无不感到非常惊奇。因为这些天文知识(特别是天狼伴星是一颗超密星)即使在比较文明的民族中间,知道的人并不多。那么朵根人是从哪里得到这些知识的呢?据美国学者罗伯特·坦普尔访问朵根部落的祭司、搜集有关实物而写出《天狼星的奥秘》一书中称,朵根人的天文知识是一位叫“诺默”的“神”传授的,诺默即“天狼星人”。在朵根人的图画上描绘有诺默乘坐“方舟”——一艘宇宙飞船下凡,着陆的瞬间闪起了一片火焰。上述朵根人的传说似乎表明,地外智慧生命曾拜访过地球。

据有的天文学家分析,这根本是不可能的事。因为从天文物理角度看,天狼星及其伴星那里的环境不适合生物的生存和发展。首先,天狼星的年龄不过三亿年左右,而生命从最简单的氨基酸进化到复杂的智慧生命,大约需要几十亿年。其次,天狼伴星是一颗白矮星-红巨星演化的产物,在红巨星阶段,星体向外辐射的热能成倍成倍地增加。例如太阳将来演化成红巨星时,地球的海水将被烘烤干净,炽热膨胀的太阳将“吞食”火星。可以想见,若天狼伴星周围有行星,并且有生命,必将遭受灭顶之灾。一句话,“天狼星人”的推测没有科学根据!朵根人的天文知识很可能得自地球文明民族的传布(或者传教士)。

## 生物生存的必要条件

行星上生物的发生和发展,必须要满足一系列极其一般性的条件,或者说要有生存的必要条件。首先,生命的诞生、存在和发展离不开自身发光发热的天体——恒星。由天体演化学知道,恒星是由气体尘埃云坍缩而形成的。对于密度很低的原始星云在自身引力作用下收缩,渐渐变成一个自转着的扁平圆盘(称为吸积盘),于是中央主要部分因密度增大、温度升高发生热核反应而形成恒星,其周围的物质盘渐而形成行星系统,如我们的太阳系。

科学家设想,在每个具有行星系的恒星周围都有一个区域,在那个区域中行星上的温度条件不排斥生命的发生和发展。行星的温度首先取决于单位时间内

密顿量和决定 SB 参数的自治方程,再引进合金的相干势、有效介质的哈密顿量和 CDA 自治方程。然后,给出合金的电子 DOS,并解释相干效应。最后,作者还探讨了理论对新近发现的 Kondo 绝缘体的应用。(待续)