

凝聚体物理学的新进展

THE NEW DEVELOPMENT OF CONDENSED MATTER PHYSICS

李国栋

凝聚体物理学是研究物质固态、液态及其组成原子充分靠近致使每一原子同时与许多近邻相互作用的物态(如高密度气体、等离子体)和特殊量子态(如超流态)的基础学科。它在当前受到重视主要有两个原因:第一是它为力学、流体力学、热力学、电子学、冶金学和固体化学等古典学科提供了量子力学基础;第二是它为晶体管、超导磁体、固体激光器和高灵敏度的辐射探测器等高技术作出了大量重要的贡献。

60年来凝聚体物理学发展的主要标志是,发现了许多崭新的现象和物态,发展了一系列新概念,开创了不少新的分支学科。这些进展又对核物理学、基本粒子物理学、天体物理学、分子物理学和化学等产生了重大影响。

凝聚体物理学对当代的社会生产、高技术和日常生活起着巨大的作用(见表1)。例如,半导体集成电路已使电子计算机更加小型化;磁带可以记录声音、图象和数字;核磁共振断层成像技术已有成效地应用于医学诊断;光通信更是由凝聚体物理学研究发展起来的全新的高技术。

本文将简略介绍凝聚体物理学的一些新进展:
1. 人造结构材料 即具有其维数或性质不是天然产生的那种结构的材料。制备这类材料的最重要的技术是分子束外延技术和金属有机化学蒸气沉积技术。利用这些技术可以制造含有交替的不同半导体、不同金属或半导体和金属层的人造周期性超点阵材料,也可以制备人造的纯二维电子气材料。后一种材料具有一些独特的和重要的特性,例如一般金属氧化物半导体不能达到的

表 1. 凝聚体物理学各领域与应用的关系

	信息 处理	语 言 和 数字通信	能源	医学	运输	空间 技术	国防
电子性质	●	●	●	○	●	○	●
声子·电子·声子 相互作用	●	○	●	●	○	○	○
相变	●	○	●	○	●	○	●
磁性	●	●	●	●	●	●	●
半导体	●	●	●	●	●	●	●
缺陷/扩散	●	●	●	○	●	●	●
表面/界面	●	●	●	●	●	●	●
低温物理	●	○	●	●	○	○	○
液体	●	○	●	○	●	●	○
高聚物	●	●	●	●	●	●	●
非线性动力学, 不稳定性,混沌	●	○	○	○	○	○	●

●表示起决定性作用, ●表示起重要或急迫的作用, ○表示有可能起作用, 空白表示其作用(联系)目前尚不清楚。

极高的电子迁移率;还在这种材料中发现了新的物理现象,如量子化霍尔效应和分数量子化霍尔效应。利用这些技术还制造出其电子平均自由程远长于超点阵周期的金属超点阵材料。金属/绝缘体超点阵是研究金属中维度效应的理想系统。

2. 量子化霍尔效应 现代技术已能制备纯二维的电子气,即电子只能严格地局限在平面内运动。在二维电子气系统中,在低温和垂直(于电子气平面)强磁场作用下,电子态分裂为朗道能级。当费米能级位于两朗道能级之间时,就会观测到,在一定条件下垂直于电场和磁场方向的霍尔电导率为恒定值。这些恒定值是以 $e^2/h=1/25812.8$ 欧姆⁻¹为单位量子化的,其中e和h分别为电子静质量和普朗克常数。这一测量精度已达到至少

李国栋(Li Guodong) 中国科学院物理研究所副研究员。

10^{-8} , 因而显著改善了这一基本常数的测量, 并提供了一种新的便携式电阻标准。最近还观测到霍尔电导率以 e^2/h 的 $1/3$ 、 $2/5$ 和 $2/7$ 等的简单分数量子化, 称为分数量子化霍尔效应。已对这效应提出了解释和具有分数电荷的新型元激发。

3. 低维效应 许多年来凝聚体理论物理学家研究的是固体的一维和二维模型, 因为可以求得它们的准确解, 而三维模型是很难处理的。这一情况促使凝聚体实验物理学家成功地研究出了其物理性质与一维和二维理论模型符合很好的物理系统。它们包括由彼此被非磁性原子隔开的磁性原子链构成的准一维磁系统, 以及原子层被分隔较远、相互作用较弱的层状化合物(如石墨插层化合物)构成的准二维系统。其他的低维系统还有二维电子气系统、表面吸附层和液晶的几个分子厚的自由悬挂层。这些发展使实验和理论物理学家设想把维度作为一个新的自由参量。

4. 电荷密度波 低维系统中最能被清楚说明的现象是电荷密度波, 有时是自旋密度波。直到最近出现了Nb和其他过渡金属的二硫属化合物和三硫属化合物, 若干有机金属, 例如多炔和TTF-TCNQ(四硫富瓦烯-四氰基对醌二甲烷)后, 电荷密度波的研究才多起来。在这些材料中, 含有两种非公度周期的结构, 因而整体为非周期结构。例如NbSe₃和TaS₃是具有超导性的量子系统, 极适宜于研究宏观量子现象。这些波中一些有意思的现象是与缺陷有关, 具有奇异的拓扑学性质、奇异的自旋和电荷性质等。这些研究受到重视是因为兼有科学意义和可能应用的前景。

5. 无序 历史上对无序材料的研究是试图把无序平均掉而得到“有效的介质”, 直到最近才重视其内禀性质的研究。无序材料(如非晶合金、玻璃和凝胶)的最显著特征是“局域化”, 即形成除靠热能外不能使其运动的量子态。研究局域化采用二维系统最方便, 可从中观测到导电性的非古典特征。工业上很重要的无序材料玻璃, 其结构、转变和高温退火性质, 以及新发现的低温性能(称为隧穿中心)等都是尚待解决的重要问题。

6. 混合价和重费米子 早已知道, 同一化合物(如Fe₃O₄)中同一元素(如Fe)可存在两种价(Fe²⁺和Fe³⁺), 而金属(如Ni)却不需具有固定的价, 但稀土金属由于内层f电子而一般具有固定的价。可是近年来却发现一大类含稀土族和U原子的化合物却不寻常地居于上述两者之间。一些测量(如单电子探针测量, X射线边缘谱)表明同一原子同时存在两种价, 而另一些测量(如低温磁化率和电导率)表明为固定价, 有时居间, 有时又不是。看来电子是相当缓慢地以量子力学

隧穿进出f壳层, 因而显示出十分异常的结果, 例如导带的电子有效质量可高达正常电子的1 000倍, 而在很低温度下显示超导性。目前很注意与超流³He相似的新型超导体。另一些材料中价的涨落会导致金属/绝缘体转变、磁性/非磁性转变, 软(可高度压缩的)点阵等。

7. ³He的超流相 近年发现³He在低于3毫K的温度下变为超流性(即可无阻力地通过细管), 这是自1937年发现⁴He的超流性以来新发现的唯一的超流体。但³He与⁴He的性质是很不相同的, 前者遵从费米量子统计力学规律, 而后者却遵从玻色量子统计力学规律。而且超流³He具有许多以往超流体所没有的物理性质, 例如超流的局部各向异性。

8. 重正化群方法 这种方法用于讨论涨落时发生在宽广的长度、能量或时间标度范围内的物理现象。这个方法最初应用于粒子物理学, 后来应用到凝聚体物理学, 处理如固体和液体的熔化和凝固、铁磁体的磁化时, 获得很大成功。利用这个方法可以从理论上解释给定系统在相变(临界点)附近不同性质间的经验关系, 也能以高的精确度预言临界性质。这些预言已为后来的实验所证实。重正化群方法还可应用于凝聚体物理学的不同领域, 如无序电子系统、杂质问题、两序磁性材料(自旋玻璃)、非线性动力学系统、聚合物长链系统和宏观不均匀系统(如多孔性岩石)的渗流等。

9. 时间和空间的混沌现象 混沌理论用于处理凝聚体物理、流体动力学和等离子体物理学中的远离平衡态而不再能应用线性方程的强驱动系统。利用这种方法, 把这些系统看成是具有一个或几个自由度(单周期或双周期运动, 或纯混沌运动)的简单模型, 便可处理各种难以处理的现象。这样可得到一些普适的性质, 它们会在一些实验中观测到。但是也还存在着一些尚待解决的问题。例如, 完全的湍流无法用简单的数学描述, 那么怎样近似描述呢? 等等。混沌的非线性行为在许多凝聚体系统中是普遍存在的, 如半导体激光器、各种超导器件等。

10. 同步辐射的广泛应用 同步辐射是能量为100MeV到10GeV的高能带电粒子(通常是电子)在同步加速器中发射的电磁辐射。同步辐射源能提供目前激光源在波长上或不能得到或尚不能调谐的强电磁辐射。这种辐射具有若干所期望的特点: 高亮度、宽调谐度、高准直性、线性偏振和高稳定度。同步辐射在凝聚体物理中可用来在实验中测定如Ni、Cu元素及GaAs、CdS半导体的能量-动量关系 $E(k)$; 测定铁磁性Ni的
(下转第27页)

超过 10^{-44} 秒,即不可能测量比 10^{-44} 秒小的时间间隔。类似地,长度测量精度也不可能超过 10^{-33} 厘米,即不可能测量比 10^{-33} 厘米小的距离。

由物理学方法论,一个原则上不能直接或间接测定的物理量,在物理中是没有意义的。这就是说,在小于 10^{-44} 秒和 10^{-33} 厘米的范围内,时间和长度概念将失去意义。由时间和长度派生出来的其他概念,也随之失效。总之,引力与量子二者的结合将导致时空概念本身的改变。这就是量子引力论面对的难题之一。

为了克服这些困难,已经提出了不少有价值的思想。这里只简单地列举一下:正则量子化,协变微扰理论,欧几里得量子引力论,弯曲时空中的量子场论,诱生引力论,几何量子化,缠绕子理论,离散引力,曲率平方理论,非线性量子力学,自旋网络,渐近量子化,量子宇宙学,超引

力理论, K-K理论以及近年最热门的超弦理论。

今天我们还不可能对这些尝试作进一步的评论。也许只能说,量子引力论的成功,大概需要各种尝试的协同努力。

引力物理的开放

笔者正在参与明年将在美国科罗拉多举行的国际广义相对论及引力学会第十二次大会的组织工作。一位资深的同行说:“在这个学会刚刚建立的时候,经典广义相对论是个多产而独立的领域,学会本身也有一个非常清楚的科学家‘圈子’。现在情况完全不同了。其他两个强有力的‘圈子’中的物理学家,即天体物理学家及粒子物理学家已经大量涌入引力物理研究”。

的确,这是一种趋势。回顾一下引力物理的发展史,从牛顿到爱因斯坦,引力物理的确有一系列影响着物理全局的创造。但

是,由于引力是自然界最弱的相互作用,所以,就具体研究来说,引力物理一直是个独立的即相当孤立的领域,它与其他物理分支的联系极少。但近二十年来,渐渐改观了。一方面在宇宙学和高能天体物理中,引力物理和高能物理、天体物理之间难于划界了。另一方面,在微引力物理中,引力也开始进入凝聚态物理和材料科学。

对这些交叉领域中的课题,我们不再讨论了,一一列举也不必要了。当然,不列举并不表明它对引力物理不重要。相反,引力物理的未来,也许正是在引力物理的这种开放式发展之中。

参考文献

1. Physics Through the 1990s, Gravitation, Cosmology and Cosmic-Ray Physics, National Academy Press, (1986).
2. 方励之, 物理, 16, (1987), 481.
3. 方励之, 物理, 17, (1988), No. 5.

(上接第10页)

而不能把更远的目标当成中近期目标来对待。所谓政治权力高度集中下的商品经济体制恰恰是这一时滞的表现,它有利于经济发展并为政治民主化提供了先决条件。南朝鲜和巴西的经验似乎就表明了这一趋向。1961年朴正熙军政府建立时,人均国民总值只有87美元,到80年代达到3 000美元后,全斗焕政权不得不进行了转轨,由“政府主导”改为“民间主导”,80年代中期后,又不得不让位于“民选政府”。巴西1964年军政府上台后,经济得到迅速的发展,20年后,军政府已让位于“民选政府”。

由上述分析可以得出结论:发展中国家的某一特定发展阶段,不仅是经济,而且是政治社会急剧变化的时期。在这一时期的阶段目标是经济发展,而为了保证这种经济发展不至于被内外因素所打断,社会的相对稳定是非常重要的,唯有这样才能为政治民主化提供基础。而要想缔造这样一种局面,使经济社会发展有序地进行,在这一发展阶段,较佳的体制模式是政治权力高度集中下的商品经济体制。

(上接第29页)

交换裂距与温度的关系;研究玻璃态非晶材料的结构和几个分子层厚的液晶的相变;研究表面的结构和催化活性;可在光刻蚀中产生线度小至70 Å的人造结构。目前同步辐射已成为广泛实验领域的最有用的工具之一。

11. 原子级分辨率的实验探测 在过去10年,实验研究凝聚体仪器方面的主要进展是发展了几种能观测单个原子的探测器,其中一种是扫描真空隧道显微镜,它的原理是利用电子的量子力学隧道效应,由此效应产生的电流对于从探针到样品的距离是很敏感的。现在已可利用这种仪器直接观测样品表面原子级的结构。另外的一些进展是1982年生产了分辨率达到约1.5 Å的透射电子显微镜,可以研究沿电子束方向的样品内线型和平面型缺陷,也可研究完美晶体的薄膜样品的原子位置;还研制成了分辨率约2 Å的扫描透射电子显微镜,利用它可以得到碳膜中的重原子象。可以期望将来这些仪器可越来越多地用来直接测定固体内部和表面的原子位置。