

凝聚态中的维度性跨越¹⁾

王晓斌 蒋青 田德诚²⁾

(武汉大学物理系, 武汉 430072)

摘要 简要综述了凝聚态中的维度性跨越现象, 其中包括整数维之间的跨越和整数维与分数维之间的跨越. 讨论了维度性跨越对于凝聚态物质的物理性质的影响.

关键词 维度性跨越, 低维体系, 无序系统, 分形子

Abstract A brief overview of the dimensional crossovers in condensed matter is presented. Both the crossovers between integer dimensions and those between integer and noninteger dimensions are discussed. The effect of dimensional crossovers on the physical properties of condensed matter is also discussed.

Key words dimensional crossover, low-dimensional systems, disordered systems, fracton

凝聚态物理学的发展, 建立了以对称破缺为核心的范式^[1]. 在向新的领域的拓展中, 低维体系和无序系统受到了越来越多的关注. 其中低维体系如具有柱、链、层状结构的物质表现出一些三维(3D)体系中不存在的优越性质. 如一维(1D)体系中的 Peierls 相变、Kohn 反常, 二维(2D)体系中的 KT 相变、量子霍尔效应、分数统计等. 另一方面, 分形几何对于无序体系的应用开辟了全新的研究领域, 具有分数维结构物质上物理性质的研究方兴未艾. 一般来说, 完全的一维、二维或分数维结构的物质只是极少数, 大多数物质在一般情况下表现为 3D 结构, 只是在特定的外界条件或在一定的尺度下才表现出低维或分数维的性质. 当外界条件改变或检测的尺度变化时, 这些材料常表现出从三维到低维或分数维的跨越. 这种维度性跨越对这些体系的物理性质的影响在不同的方面表现出来. 以下从整数维之间的跨越和整数维与分数维之间的跨越两个方面分别加以介绍.

1 整数维之间的跨越

在整数维之间的跨越现象中, 最为人熟知的莫过于层状超导体上临界场表现出的跨越行为了. 层状超导体中层与层之间通过 Josephson 耦合来实现相互作用. 耦合的特征长度(即 c 方向的 Ginzburg-Landau 相干长度) ξ_L 如果大于 c 方向的晶格常数 d_c , 则材料即使有很强的各向异性, 也表现为整体的 3D 行为. 而当 ξ_L 小于 d_c 时就表现为 2D 性质. ξ_L 是温度的函数, 随着温度的降低, 当 ξ_L 从比 d_c 大变得比 d_c 小时, 就发生从 3D 到 2D 的跨越. 跨越行为通过两种形式表现出来: 其一是 $H_{c2\parallel}$ (上临界场平行于 ab 面的分量) 的温度关系, 在 3D 情况下, $H_{c2\parallel} \propto T - T_c$, 而对 2D

1) 国家自然科学基金资助项目, 国家博士点基金资助项目.

1994 年 7 月 18 日收到初稿, 1994 年 9 月 16 日收到修改稿.

2) 中国科学院国际材料物理中心成员.

则有 $H_{c2\parallel} \propto (T_c - T)^{1/2}$; 其二是 H_{c2} 的角度依赖性, 与 Z 方向成 θ 角来测量 H_{c2} , 在 3D 时有 $\left. \frac{dH_{c2}}{d\theta} \right|_{\theta=\pi/2} = 0$, 在 $H_{c2} \sim \theta$ 曲线上表现为

$\theta = \pi/2$ 处有一光滑的极点, 而对 2D 则

$$\left. \frac{dH_{c2}}{d\theta} \right|_{\theta=\pi/2} \neq 0,$$

曲线在 $\theta = \pi/2$ 处为一尖点。对于氧化物高温超导体, 由于其明显的层状结构, 这种维度性渡越应有一些表现, 关于这一方面的工作已有较多的报道。在正常金属 (N)-超导金属 (S) 超晶格超导体及绝缘体-超导体超晶格中也有同样的渡越现象, 不过在超晶格超导体中, S 层之间通过邻近效应相互耦合, 而且耦合与 N 层的厚度也有密切关系。以超晶格超导体 Nb/Ge 为例^[2], 当 Ge 层厚度 d_{Ge} 很小 (0.7nm) 时, Nb 层之间耦合强, 样品性质表现为多层的平均效应, 呈现大块单一超导体的特征 (3D 行为); 当 d_{Ge} 很大 (5nm) 时, Nb 层间耦合很弱, 样品表现出 2D 行为。对于 $d_{Ge} = 3.5\text{nm}$, 实验上观察到, 随着温度的下降, $H_{c2\parallel}$ 表现为从线性的温度关系 (3D) 到平方根的依赖关系 (2D) 的渡越。

在层状超导体和超晶格超导体涉及到维度性渡越现象的理论研究中, Lawrence 和 Doriach 最初提出了 Josephson 隧道耦合机制。随后, Klemm, Luther 和 Beasley 又从微观理论出发, 发展了耦合的 2D 超导体模型。Dcutscher 和 Entin-Wohlman 对理论作了推广, 进一步考虑了有限层厚的影响。最近, Schneider 等人基于对层间相互作用的微观分析, 提出用 g_s 模型来描写层间相互作用, 该模型可以描述吸引和排斥两种情况, 且并不只限于弱耦合, 因此能更好地解释实验现象。这些理论都是从 Ginzburg-Landau 方程出发进行计算, 对膜厚的尺寸效应的考虑不够, 实际上在薄膜限时 GL 方程失效。基于这个考虑, 邹南之和龚昌德^[3] 采用线性的 Gorkov 方程研究了正常金属-超导金属超晶格上临界场的各向异性, 讨论了各向异性的原因, 发现尺寸效应将会导致上临界

场出现 3D 行为—2D 行为—3D 行为的渡越现象。

层状超晶格超导体的超导转变温度 T_c 常不同于块材料。Missert 等人^[4] 研究了非晶态的 $\text{Mo}_7\text{Ge}_{21}$ 的超导层与非晶的正常态 $\text{Mo}_{1-x}\text{Ge}_x$ 层交替组成的超晶格, 发现 T_c 与 N 层的厚度密切相关。他们的结果表明, 随着层厚的变化发生了从单层薄膜的 2D 行为到 3D 的体行为的渡越。

对于层状材料的另一个兴趣来自于层状磁体的各向异性及在特定条件下表现出的维度性渡越。这一方面已经有了较多的研究, 部分原因是一些氧化物高温超导体的母相是具有较高 Néel 温度的层状结构的反铁磁体, 对它的研究可以提供有关长程序、元激发等有用信息。在这里, 控制渡越的量是由耦合的各向异性比 $\nu = J_{\perp}/J_{\parallel}$ 来描述, 其中 J_{\perp} 和 J_{\parallel} 分别是层间和层内的反铁磁耦合常数。Majlis 等人从 Heisenberg 模型出发, 对低温有序相的元激发采用自旋波近似, 基于无规相 (RPA) 的处处计算了磁性质, 对高温顺磁相则计算了没有长程序情况下的自旋关联函数, 得到了关联长度随 T 和 ν 变化的关系。他们的结果也表明, 在一定的 ν 值下表现出 3D 到 2D 的维度性渡越现象。龚昌德等人^[5] 利用 Schringer-boson 平均场方法研究了量子海森伯反铁磁体上的维度效应, 给出了不同维度之间 (1D \rightarrow 3D, 2D \rightarrow 3D) 渡越的判据, 并建立了联系相变温度和链 (层) 间耦合强度的方程。另外, 他们对于无序层状系统在磁场中的输运性质的研究也表现出维度性渡越和负磁阻等有趣现象。

Kondo 效应中表现出的维度性渡越则是最近的实验^[6] 才揭示出来的。Giodano 等人在研究掺少量铁的铜薄膜中的 Kondo 效应时, 在低温下测出的电阻温度关系满足 $\rho = \rho_0 - B \ln(T)$, 但 B 具有很强的膜厚依赖性。当厚度减小时, B 也随之减小。他们认为, 厚度的减小使传导电子对磁性杂质的屏蔽受到抑制, 从而使效应变得不显著, 并在某个厚度时发生从 3D 到 2D 的渡越。后来的实验也揭示出

Kondo 效应中的 2D 到 1D 的渡越。

实验技术的改进使得对特定材料的设计和一些人工作成为可能。最近关于 VSe_2 的插层实验^[7]表明这个过程可以用来改变价带的维度特征。过渡金属二硫属化物的一个特点是能够在层间引进外来的原子或分子形成插层化合物,这可以用来对某些物理性质进行调节,如把一个半导体的化合物变成金属型的等。外来原子的引入导致的一个结果就是层间距离的增大,从而减弱层与层之间的相互作用,在某些情况下可将各层之间看成是互相隔离的,而表现出 2D 特征。Starnberg 等人^[7]用具有较大原子半径的 Cs 掺入层状化合物 VSe_2 ,角分辨光电子谱的测量表明,价带结构从插入前的 3D 特征变到插入后的 2D 行为。自洽的 LAPW 能带计算也证实了实验结果。他们的实验表明,对这一类化合物的电子结构的维度特征的人工调节是可能的。Dynes 等人^[8]制备出截面积小到 $10^{-13}cm^2$ 的铅细线,用原位法改变线的宽度的同时测量其超导转变温度,发现超导转变出现从 2D 到 1D 特征的渡越。而雷啸霖^[9]等在研究 2D 和 1D 系统中的电子输运性质时也发现输运性质随宽度 d 振荡,并在大 d 时发生从 1D 到 3D 和 2D 到 3D 的渡越。

与维度性渡越相联系的有另一类现象,它们并不出现维度的跨越,但是表现出明显的维度效应。如一些 1D 材料中的 Peierls 相变有和通常的 Peierls 相变不同的特征,被认为是维度效应的结果^[10]。在实际的 1D 材料中存在或多或少的链间耦合,这种耦合起着一种高维的作用。如果这种耦合很强,则系统成为一 3D 体系,而 Peierls 相变不再存在。龚昌德等人^[10]研究了准链状结构材料中链间耦合带来的维度效应,提出了分步 Peierls 相变理论。其中对于链间耦合的考虑,一方面足够弱,1D 特征仍然是主要的,另一方面又足够强,足以抑制热涨落,使热力学平衡相变得以实现。这样在保持低维特征的基础上考虑了高维的影响,导致 CDW 相变与金属-绝缘体相变不再同时发生而各出现在不同的温度。维度效应对于溶解温

度的影响也表现出有趣的现象^[11]。导电聚合物聚苯胺的研究结果表明,在重掺杂的金属态不存在 Peierls 不稳定性和 1D 局域化,因此链间耦合实际上已使它表现出 3D 特征,实验结果也证实了这一点。对其他链状有机导体如重掺杂的聚乙炔等也有人持相同的观点。另外,近年来由磁性薄膜和非磁性薄膜交互排列而成的磁性多层膜超晶格得到广泛的研究,其中被非磁性膜隔离开来的磁性膜之间的层间交换耦合对磁性多层膜的物理性质有重要影响,这种层间耦合也起着一种高维的作用。值得一提的是,最早报道的 Fe/Cr 超晶格中的巨磁阻现象,其中相邻 Fe 层间具有反铁磁耦合。

2 整数维与分数维之间的渡越

另外一类重要的维度性渡越涉及到无序系统。凝聚态物理学的许多研究对象如逾渗集团、聚合物、凝胶材料、粗糙界面、金属裂纹、多孔介质及一些非晶态固体,在不同的尺度下表现出分形特征。这些对象一般在大尺度上近似具有平移对称性,用欧几里得维数 d 来描写,而小尺度上具有统计意义上的自相似性,用豪斯道夫维数(或分形维数) D 来刻画。这样在某个特征长度 ξ 处就发生物质分布从均匀向非均匀转变,即发生整数维 d 到分数维 D 的维度性渡越。如最近 Ikeda 等人^[12]对于稀释的 Ising 反铁磁体在逾渗阈值附近的中子散射实验结果给分形结构与均匀结构之间的渡越提供了清晰的实验验证。

整数维到分数维的渡越对无序体系物理性质的许多方面都有深刻的影响。Gordon 等制备出三级 Sierpinski 垫块上的超导细线网络,发现其超导相界 $T_c(H)$ 上表现出从整数维到分数维的渡越。一些液晶的玻璃相的介电弛豫的结果也揭示出一定尺度下样品的分形特征。但最令人感兴趣的是晶格动力学性质上的声子-分形分子的渡越。分形分子是分形体上的振动元激发。当振动模式的特征长度(在声子区即波长,在分形子区则为局域化长度)从长波限接近

渡越长度 ξ 时,即发生声子到分形子的渡越.这一概念首先由 Alexander 和 Orbach 提出.分形子具有一些不同于声子的特性,它的波函数具有如下形式:

$$\psi_{\alpha}(\mathbf{r}) = C r^{-(d-D)/2} \lambda_{\alpha}^{-D/2} \exp\left[-\frac{1}{2} (r/\lambda_{\alpha})^{d_{\phi}}\right], \quad (1)$$

这里 C 为常数,而 $d_{\phi} > 1$, 表明分形子波函数在空间分布以比指数形式更快的速度衰减,因此分形子常被认为是超局域化的,而 d_{ϕ} 称为超局域化指数.分形子的态密度也不同于声子

$$N_{fr}(\omega) \sim \omega^{\bar{d}-1}, \quad (2)$$

其中 \bar{d} 为谱维数(或分形子维数).谱维数不同于分形维数 D ,也不同于欧几里德维数 D .当几何结构由自相似对称过渡到平移对称时,以上三种维数等同起来,出现维数的简并,而在分形情况下,简并是解除的.另外,声子一分形子渡越发生在渡越频率 $\omega_c = \omega_c(\xi)$ 处,它与渡越长度 ξ 的联系可由

$$\omega_c \propto \xi^{-D/\bar{d}} \quad (3)$$

来描写.分形子存在于 ω_c 以上的区域,而 ω_c 以下为声子.对于一个稀释的铁磁或反铁磁体,也存在类似于声子一分形子渡越的磁振子—磁分形子的渡越.

声子(磁振子)—分形子的渡越已经由光散射和中子散射的实验所证实.在无序材料的低温比热和热导的实验中也得到了支持.尽管对于谱维数 \bar{d} 的普适性、渡越区 (ω_c 附近)态密度的分布等细节问题仍有待深入探讨,但作为整数维—分数维渡越的一种表现形式的声子(磁振子)—分形子渡越对无序体系的物理性质的影响却是不容置疑的^[4].

Alexander 等人^[5]用声子与分形子非谐相互作用的模型计算了非晶固体的热导率,发现与实验测量中揭示的热导—温度关系曲线上的平台及其后的线性增长的现象相符.硅凝胶等材料的测量结果表明这一计算的合理性. Salammon 等研究了一系列非晶的稀释合金的磁化行为以后得出结论,对于 Bloch 的 $T^{3/2}$ 定律

的偏离是来源于自旋元激发上的磁振子—磁分形子的渡越.在声子(磁振子)—分形子渡越对电输运性质的影响方面,我们最近进行了一些工作^[6].其中包括导出了电子—分形子相互作用哈密顿,并计算了该相互作用对电阻率的贡献.结果表明,该项的贡献与其他散射机制的共同作用可以导致低温 F 电阻率的极小,从而为无磁性杂质的金属玻璃中的电阻率极小现象提供了一个可能的解释.研究了稀释反铁磁和铁磁体中磁振子和磁分形子对传导电子的散射,基于 $s-d$ 交换作用模型,用有效媒质近似(EMA)处理被随机破坏的交换作用键.对于反铁磁体的情况,结果表明分形子对电子的散射作用对电阻率的贡献在较大的温度范围内是线性的,与氧化物高温超导体正常态的实验结果一致.而对于铁磁体,不同的键占据浓度可使 $\rho \sim T$ 的关系发生由 $T^{3/2}$ 到 T^2 的变化.对于具有分形结构的超导体正常态的电输运也从电子—分形子相互作用的角度进行了计算,并研究了其超导转变温度 T_c 和能隙参数 β 与分形维数的关系,结果表明在一定条件下可以得到高临界温度的超导体.对 2D 的稀释反铁磁体上的磁振子—磁分形子渡越对声子元激发的修正也进行了研究.

稀释磁体中磁振子—磁分形子渡越的理论研究结果十分丰富,而实验报道却较少见,这与声子—分形子渡越的大量实验结果形成对比.这其中部分原因是磁分形子方面的实验一般技术上的难度较大.我们最近的研究表明,对于稀释磁体中的激子动力学的实验研究可能是研究磁振子—磁分形子渡越的一条相对容易的路线.通过对稀释反铁磁体中激子的子晶格间的弛豫率的计算,发现该弛豫率比较敏感地依赖于自旋元激发的态密度.当引进分形子的态密度时,得到弛豫率与温度的 T^2 关系不同于单纯磁振子情况时 T^3 的关系.这样一个结果可能给磁振子—磁分形子渡越方面的实验研究开辟新的途径.

由于分形体上粒子的波函数具有超局域化的特征,其中电子态的变程跳跃的温度关系

$\sigma = \sigma_0 \exp \left[-\left(\frac{T_0}{T}\right)^\beta \right]$ 中的指数 β 也不同于

Mott 的 $\beta = 1/(d+1)$, 其中 d 为欧几里德维数的情况, 而是由 $\beta = \zeta/(D+\zeta)$ 给出, 这里 D 为分形维数, 而 ζ 为超局域化指数 [即(1)式中的 d_ϕ]. 对于实际的材料, Mott 关系曲线在跳跃距离 r_n 远远大于关联长度 ξ 的条件下, 即电子态的跳跃感受不到自相似性的存在, 而分形区的跳跃关系则出现在 $r_n \ll \xi$ 的时候. 如果 r_n 接近 ξ , 则可能出现两种情形之间的过渡, 使情况变得复杂. 我们讨论了这方面的结果, 指出弄清几个特征长度之间的关系是分析跳跃机理并进一步研究局域化的背景的关键.

3 讨论

从以上的简短的描述中可以看到, 能够发生维度性渡越的物质一般都具有内禀的低维或分数维的结构. 当外界条件的变化引起某个物理量的特征长度变化从而改变层(链)间的耦合强度, 或是尺度的变化揭示出新的结构层次时, 就表现出维度性渡越现象. 在多数情况下, 渡越是通过尺度的变化来完成的. 认识到这一点很自然, 因为维度性渡越首先是一个几何特征的变化, 而维度又通过能谱和拓扑性质来影响物理性质^[47], 因此维度性的渡越必然带来物理性质的变化. 但是, 维度的渡越中所涉及到的尺度终究是某个物理量的特征长度, 维度性渡越不是单纯几何意义上的名词, 它实质上也是一种物理上的描述. 随着现在实验手段的不断改进, 对凝聚态物质的研究深入到介观尺度, 人们可以设计制造出量子阱、量子线、量子点等. 另一方面, 对于层状材料及超晶格的研究具有巨大的潜在应用前景, 而无序体系由于其研究对象的复杂性, 还有许多问题有待澄清. 对于这些物理对象的研究将会揭示出许多新颖的变化. 因此可以预计, 维度性渡越的概念将会成为考察这些对象物理性质变化的一个出发点, 并越来越成为不同领域的人们的共同语言.

应当指出的是, 维度的渡越是以一种突变

的形式发生的. 随着尺度的变化, 在某处发生从低维 (1D 或 2D) 到 3D 或从分数维到整数维的跳变, 即这个渡越从维度的角度来看是一个不连续的过程. 我们注意到, 在有的作者的工作中引进了“有效维度”的概念, 如 Majlis 等在研究层状磁体的渡越行为时定义了有效维度 $D_{eff} = (z_{\parallel} + \nu z_{\perp})/2$, 其中 z_{\parallel} 和 z_{\perp} 分别为面内和 c 方向上的配位数, ν 为前面提到的各向异性比. 这样对于 $\nu = 0$, 就对应于 2D, 而 $\nu = 1$ 则表示 3D 的情况. 这个定义对于研究一些物理性质是有用的, 但用来表征维度性渡越则不合适. 由于 ν 是连续变化的, 它给人的印象就好像维度在渡越过程中也是连续变化的. 因此, 我们认为在研究维度性渡越现象中引进这样一个有效维度的概念是不必要的, 它实质上仍是表达了耦合强度的大小, 没有更深入的物理意义. 在我们看来, 一个变化的耦合强度或特征长度再加上某处维度的突变就是以描述渡越的过程, 而不必引入新的量来描写.

参 考 文 献

- [1] 冯端、金国钧, 凝聚态物理学新论, 上海科学技术出版社, (1992).
- [2] 张其瑞, 高温超导电性, 张其瑞主编, 浙江大学出版社, (1992), 28.
- [3] 邹南之、龚昌德, 低温物理学报, **11**(1989), 413.
- [4] M. Missert and M. R. Beasley, *Phys. Rev. Lett.*, **63** (1989), 672.
- [5] Y. J. Wang, M. R. Li and C. D. Gong, *Phys. Rev. B*, **46** (1992), 12034.
- [6] N. Giordano et al., *Phys. Rev. Lett.*, **69**(1991), 209; *Phys. Rev. B*, **45** (1992), 2951.
- [7] H. I. Starnberg et al., *Phys. Rev. Lett.*, **70** (1993), 3111.
- [8] R. C. Dynes et al., *Phys. Rev. Lett.*, **71** (1993), 428.
- [9] X. F. Wang and X. L. Lei *Phys. Rev. B*, **47** (1993), 16612.
- [10] 龚昌德, 物理学进展, **13**(1993), 84.
- [11] C. D. Gong et al., *Phys. Rev. B*, **36**(1987), 5517.
- [12] H. Ikeda, *Physica A*, **204** (1994), 328.
- [13] S. Alexander and R. Orbach, *J. Phys. (Paris) Lett.*, **43**(1982), L625.
- [14] T. Nakayama, K. Yakubo and R. Orbach, *Rev. Mod. Phys.*, **56** (1994), 381.
- [15] S. Alexander et al., *Phys. Rev. B*, **34** (1986), 2726.
- [16] D. C. Tian, J. X. Li and Z. H. Zhang, *Phys.*

(下转第 522 页)