

介观系统的量子力学及统计物理特征

魏 环

(河北理工大学数理系 唐山 063009)

介观体系是指介于宏观与微观之间的一类体系。介观体系的线度 L 满足 $a \ll L \leq L_\phi$ 的条件, 其中 a 为原子半径, L_ϕ 是介观体系的载流子保持相位记忆的特征长度, 被称为退相位长度, 因此介观体系中的载流子始终是相位关联的。退相位长度 L_ϕ 由体系的温度和物性共同决定, 例如在液氦温度下, 正常金属的 L_ϕ 可以达到 μm 量级, 因此低温下介观系统的线度几乎是宏观的。介观系统的可观测的物理量仍然定义为大量微观粒子物理量的统计平均, 与宏观系统的定义无异, 微观粒子的运动遵循量子力学规律。对介观系统的研究始于 20 世纪 80 年代, 现已成为凝聚态物理中一个令人瞩目的领域。介观系统就其尺度而言几乎是宏观的, 实验可及; 而介观物理实验所观测到的许多奇特的物理现象又表明该系统具有明显的量子力学的特征, 电子波的量子干涉性对这类系统的行为起着决定性的作用, 因此它又与宏观系统十分不同, 是具有明显量子特征的、接近于宏观的微小系统, 介观系统因此成为量子力学、统计物理和宏观物理交叉的研究范围。从基础研究的角度看, 对介观系统的研究有助于实验检验量子力学和统计物理的一些基本原理, 也有助于对宏观系统性质的更深入的理解。而从应用的角度看, 以信息技术为例: 随着微电子技术的发展, 集成电路芯片的容量在以每三年增加四倍的速度变化, 与此同时, 电路的集成度则通过不断缩小半导体元件的尺寸而迅速提高, 电子器件的尺寸平均每两年就减小一半。目前, 许多微电子器件的尺寸已经进入了介观范围。特别是随着半导体制造技术的发展, 在 20 世纪 90 年代出现了利用分子束外延、电子束刻蚀等

技术制成的微结构, 在那里, 电子的输运性质已经显示出了量子相干性。因此, 电子器件的小型化导致了基于经典输运理论的常规器件在原理上已经走向了它的物理极限。限制未来电路集成度继续提高的因素主要不是来自经济方面而是物理方面。人们已经认识到, 21 世纪的重大科学技术——信息科学、新材料科学、纳米科学、分子生物学等的发展都迫切地需要加快对介观系统物理性质的基础研究与实用化。综上所述也正是介观物理研究受到重视的原因。

一、介观体系的量子力学特征

20 世纪 80 年代物理学家主要研究介观体系的电子输运性质, 其中一个主要的观测手段是测量样品的 $I \sim V$ 曲线。由于磁场通常会导致电子在场中产生回旋运动从而增大电子在介质中受到散射的概率, 使电阻上升, 所以磁致电阻(或电导)就成为了研究金属输运性质的一个重要的物理量。由实验发现了许多在本质上是全新的物理现象, 例如著名的 AB 效应、弱局域化效应、普适电导涨落(简称 UCF) 以及电导的非定域化现象等。理论研究表明, 上述奇特的物理现象均是量子干涉效应的宏观表现。

真实的介观系统的一个基本特征就是由晶格缺陷、化学杂质及晶粒间界等带来的无序性。无序使得电子的运动是扩散性的, 其散射路径(又称费曼路径)是无规行走式的准经典“轨道”。由于电子与缺陷、杂质、边界等发生的散射是弹性的, 因此在介观尺度内, 电子虽经受着频繁的散射却始终保持着相位记忆, 弹性散射的结果只是使电子波获得了与散

④白色粉刷墙面的反射率为 65%~80%; 釉面砖墙的反射率为 68%~82%; 铝合金板的反射率为 73%~87%; 玻璃幕墙的反射率为 10%~35%, 从以上数据可以看出镀膜玻璃反射光的强度要比其他材料小得多, 而且镀膜玻璃将阳光中的紫外线吸收, 反射出的光对人体的危害比阳光直射还要小, 所以要加强新一代镀膜玻璃的研制。⑤在红外与紫外方面主要

采用防护眼镜来保护眼睛, 并且注意使用的方式和方法。

宣传与管理方面: 由于技术的提高需要一定的时间, 所以应该开展宣传教育, 提醒人们认识到其危害。对广告牌和霓虹灯应加以控制和科学管理; 加强城市规划, 并制定法律法规来约束。

(由教育部世行贷款教改项目资助(1282B02011))

射路径相关的确定的相移。即无规散射为电子波提供了各种可能的散射路径,而电子波可以相位相干地通过整个介观样品。基于上述模型,当电子波在介观样品中的某一点被分开并沿两条不同散射路径前进而后又汇合时会发生干涉,其干涉的结果是磁致电阻随着外磁场的变化以 h/e 为周期的振荡,这正是实验所观测到的 AB 效应;当两束电子分波从某一点出发沿着时间反演路径完成相干背散射并返回出发点时,两束电子分波将以同相干涉并因此导致磁致电阻增大,这就是所谓弱局域化效应;当有磁通穿过闭和的时间反演路径时,磁通为两束电子分波带来了相位差,此时的干涉会导致磁致电阻随着外磁场的变化以 $h/2e$ 为周期的振荡,这正是由前苏联的 Sharvin 父子于 1981 年首先在介观圆筒实验中观察到的量子干涉效应,即 AAS 效应。介观体系的普适电导涨落是指在磁致电导图样中除 h/e 、 $h/2e$ 等周期振荡之外所显现的非周期的无规涨落现象。实验表明,电导涨落幅度是量级为 e^2/h 的普适量,并且每一涨落图样都是各个样品所独有,在宏观条件保持不变的情况下每一个样品的电导涨落图样可以重现,故电导涨落图样又被称为介观样品的“磁指纹”。理论研究表明,UCF 依然是量子干涉效应。如前所述,电子波函数因弹性散射而获得的附加相移与费曼路径的形状相关。费曼路径的无规则性导致了相干电子波之间相位差的无规则性和其干涉效应的无规则特征。由于费曼路径的形状取决于样品中杂质原子的数量、种类以及位形,而宏观参数相同的样品,其内部杂质原子数量及位形必存在差异,因此它们的电导涨落图样也必然是各自不同。AB 效应证明了磁场的存在,尤其是磁矢势的存在,同样会使电子获得与路径相关的相位因子,则磁场变化时对电子干涉效应的影响就相当于杂质位形发生了变化。因此介观样品的电导随着磁场的变化而产生无规则涨落,这就是形成普适电导涨落的原因,即 UCF 来源于电子干涉效应的无规变化。介观体系电导的非定域特性是指样品电导的测量值不再单纯地依赖于局域材料的性质(例如电压引线间的样品长度以及样品横截面的尺寸等),还与测量引线的位置及其引线外部区域的环境状况密切关联。理论研究表明,介观电导的这种非定域特性是相干电子波进入了电压或电流的测量引线等经典输运禁区并在那里发生干涉的结果,是介观系统所特有的尺寸效应。可见,在介观体系内,正是由于介观尺度保证了电子

波的相位关联性贯穿于整个体系,才使得量子效应因电子波的干涉而保留在了介观体系的可观测量中。所以,量子力学效应是介观物理的一个基本特征。

二、介观体系的统计物理特征

统计物理学针对的是大的系统,包括大的尺寸、大的粒子数以及大的自由度等。在对宏观系统的理论研究中上述要求被量化为热力学极限条件。从统计的角度讲,宏观系统的物理量是统计的系综平均值。由于宏观系统所包含的微观粒子数目巨大,满足热力学极限条件,因此由系综平均求得的宏观量的相对涨落很小,使得不同的系综对宏观物理量而言是等价的。宏观系统的这一特点被称为自平均性,这是宏观系统所表现出的特有品质,也是宏观系统的统计特征。这意味着,宏观样品的物理性质虽然与材料有关,但同一种材料的不同样品(指样品的尺寸、形状不同)只要尺寸还是宏观的,其物理特征就完全相同,就可以用恰当的物理量来统一描述材料的一类特性。例如可以用电导率统一描述材料的导电特性。而统计物理学既是物理学理论,又有方法论问题。故从方法论的角度看,自平均性的存在表明,在这样的系统中,部分与整体之间是一种加和关系,因此,还原论的思维方式——将复杂还原为简单,再从简单重建复杂(或先将整体分割为部分,再由部分的加和重建整体),在对宏观物理的研究中始终是一个普遍而有效的思维方式。

介观系统具有什么统计特征呢?通常认为宏观系统具有无穷多自由度,而宏观系统存在的自平均性表明,无穷多自由度带来的问题恰恰是使系统在统计中的表现更为单纯。例如统计可将宏观系统中的微观粒子波函数的相位特征掩盖掉,甚至在某些条件下可以不必考虑量子化的原则和细节,物理量的相对涨落的影响亦可忽略,各种标准系综彼此等价等等。而介观系统(通常认为它包含大约 $10^8 \sim 10^{11}$ 个微观粒子)只具有有限的自由度,并不满足热力学极限条件,这使得介观系统具有了不同的统计行为及特征。根据统计物理理论,线度为 L 的 d 维体系的统计物理量 x 的相对涨落为

$$\frac{\langle (\Delta x)^2 \rangle}{\langle x \rangle^2} \sim \left(\frac{L_\phi}{L} \right)^d$$

由于介观体系的 $L \leq L_\phi$,所以相对涨落并不趋于 0,这表明系统并不存在自平均效应。介观物理实验也表明,介观系统可观测量的物理量的系综平均

简述物质的态

谢 让 棉

(上海理工大学理学院 上海 200093)

人类生活在一个物质世界里,我们所能观测到的一切存在的东西都是物质。我们的衣、食、住、行,以及我们身体本身都是物质的。即使肉眼看不到的,甚至现在的仪器也无法观测到的一些东西(如占宇宙 90% 的暗物质),也逃不脱“物质”的范畴。呈现在我们眼前的物质千奇百怪、种类繁多。而依据形态可将物质简单地划分为 6 大类,它们依次是固态、液态、气态、等离子态、玻色-爱因斯坦凝聚态和费米子凝聚态。

一、物质的常见三态:固、液、气

这三种状态是物质存在的最基本状态,利用分子论很容易解释它们的存在。通常,物质由分子、原子构成。处于气态的物质,其分子与分子间距离很远,分子间由于距离太远而没有作用力,分子可以自由移动,从而使气体宏观表现为能充满它能到达的所有空间。而对液态物质来说,构成它的分子彼此靠得很近,一个挨一个,分子的运动不断受到碰撞和阻碍,这使得液体密度比气体大得多,但活泼性远不

如气体。至于固体,构成它的元素是以原子状态存在的,原子一个挨着一个,原子间的作用力使它们相互牵拉,从而使固体的物理性质与液体和气体明显不同。

二、物质的第四态:等离子态

20 世纪中期,科学家确认物质有第四态,即等离子态。

当被激发的电离气体在达到一定的电离度后便处于导电状态,而处于这种状态下的电离气体呈现出集体行为,电离气体中每一带电粒子的运动都会影响到周围的带电粒子,同时也受到其他带电粒子的约束。由于电离气体由中性的气体电离而成,电离气体内正负电荷数相等,因此电离气体整体表现为电中性。处于这种状态的气体具有与固、液、气截然不同的独特行为,因此科学家称这种状态为等离子态,并把它作为物质的第四态。

三、物质的第五态:玻色-爱因斯坦凝聚态

1995 年,美国标准技术研究院和美国科罗拉多

值的相对涨落对系统行为的影响是不容忽略的。以介观金属区的电导为例:低温下电子与杂质原子的散射是产生电阻的主要因素。杂质原子的无序分布导致电子因与杂质散射而无规行走,散射中心的无规分布为电子提供了各种可能的散射路径。因此,传统的系综平均的统计方法特别适于处理金属扩散区的问题,人们利用基于系综平均的格林函数法计算得到的介观电导的相对涨落的理论值是一个量级为 e^2/h 的普适量,这与实验观测到的普适电导涨落现象一致。另外实验还发现了介观磁致电导的又一特点:宏观参数相同(取自同一材料、大小、形状相同)而微观杂质位形不同的样品,在相同的测量条件下其电导涨落的图样各异,即每一涨落图样都是各个样品所独有的,并且在宏观条件保持不变的情况下样品电导的涨落图样可以重现,故电导涨落图样又被称为介观样品的“磁指纹”。这是介观样品的微观特征因电子波的相位干涉行为而被记录下来的结果,这一现象为介观体系所独有的。可见,宏观系统与介观系统具有极不相同的统计行为。显然,尽管

介观系统可观测量物理量的定义与宏观系统无异,但介观系统的物理量所呈现出的特征与每个介观样品的微观特征是相关的、极具个性的。并且是可重复的一些奇异特征表明,介观体系的尺度已经小到使其丧失了宏观系统通常具有的自平均性。因此,不具备经典自平均性正是介观体系的统计物理特征。从方法论的角度看,自平均性的消失,使还原论的思维方式在介观尺度内失去了它的效力,也使得不同的统计系综对介观物理量而言不再是热力学等价的,即介观物理量的热力学平均值对不同的系综是敏感的。

总之,从统计的角度看,是否具备自平均性是宏观系统与介观系统之间的根本差别,正是这种差别导致了宏观物理量与介观物理量具有了不同的特征和涵义;也正是系统的有限的自由度导致了自平均性的消失,使得微观粒子的量子干涉效应在这样的系统中并没有因统计平均而被完全掩盖,微观粒子的运动规律通过干涉效应而残留在了系统的可观测量行为中,从而使得量子力学效应成为整个介观体系的一个基本特征。