

## 介观体系和介观物理\*

阎守胜

(北京大学物理系 介观物理国家重点实验室 北京 100871)

20 世纪 80 年代初中期开始兴起的介观物理是凝聚态物理中人们十分关注的研究领域;“介观”一词大家已听得很多了.一段时间以来,常读到介观尺度是由电子非弹性散射平均自由程决定的说法,觉得不太确切.想到这一说法可能和我早先发表在《物理》杂志的文章<sup>[1]</sup>,以及我们主编的《介观物理》一书第一版的前言<sup>[2]</sup>有关,特写此短文说明.这里的说明也许仍有不妥之处,请读者指正.

## 1 介观尺度

介观体系的大小是由介观尺度来刻划的.介观尺度是载流子保持相位记忆的长度,一般记为  $L_\varphi$ ,称为退相位长度.相位记忆的丢失源于载流子的非弹性散射,因此  $L_\varphi$  必定是与非弹性散射有关的尺寸.电子和声子的散射,电子吸收或放出一个声子,能量发生改变,是电子最常碰到的非弹性散射.如果把介观尺度理解为非弹性散射的平均自由程,又把后者理解为  $v_F \tau_\varphi$ ,其中  $v_F$  是电子的费米速度, $\tau_\varphi$  是非弹性散射(例如电子和声子散射)的弛豫时间,那么当温度下降,体系中声子数越来越少, $\tau_\varphi$  越来越长时,介观尺度就变得很大了.对于普通金属,如果  $\tau_\varphi$  取为  $10^{-9}$  s,因为  $v_F \approx 10^8$  cm/s,介观尺度可以达到 0.1 cm 左右,显然这个尺寸过大了.

实际上,在液体氦的温度下,如果普通金属的剩余电阻率  $\rho \approx 1 \mu\Omega\text{cm}$ ,则弹性散射的弛豫时间  $\tau_0 \approx 10^{-13}$  s,电子在两次非弹性散射之间会经受上万次弹性散射,走无规行走的路径,以扩散的方式运动, $L_\varphi$  是相继两次非弹性散射间电子扩散运动的距离.由于扩散系数  $D = (v_F l) / 3$ ,其中  $l$  为弹性散射的平均自由程,在  $\tau_\varphi$  时间内的扩散距离为  $(D\tau_\varphi)^{1/2}$ ,约  $10 \mu\text{m}$ ,远小于上述的“平均自由程”长度.这一简单的对扩散距离的估算,给出了介观体系大小正确的数量级.

在固体物理教科书中,载流子所经受的不同散射的频繁程度是用与不同散射对应的弛豫时间来刻

划的.讲到载流子的平均自由程,通常是指由最短弛豫时间决定的相邻两次散射间载流子所走的距离.对于普通金属,在液体氦温度下,如上所述,平均自由程一般由与剩余电阻相联系的载流子和杂质、缺陷的弹性散射决定.而在室温下,则由电子和声子的散射决定.由于在低温下与  $L_\varphi$  相联系的  $\tau_\varphi$  远大于  $\tau_0$ ,因此把  $L_\varphi$  看成是载流子所经受的相邻两次非弹性散射间的平均距离要比看成非弹性散射的平均自由程更合适一些,也少一些误解.在《介观物理》一书第二次印刷版前言中,我们做了这样的改动.

电子经弹性散射保持相位记忆,常说在  $L_\varphi$  尺度内电子的运动是相干的(coherent motion).Imery 在他写的《Introduction to Mesoscopic Physics》一书<sup>[3]</sup>的前言中讲道,运动是相干的含义是,当一个电子通过整个(由  $L_\varphi$  大小所决定的)体系,且不经受非弹性散射时,它的波函数保持有确定的相位,电子因此会表现出一些新的、有趣的干涉现象.在介观物理中,我们很熟悉的一个例子是,电子从空间某一点 A 运动到另一点 B,可以取不同的无规行走路径.到达 B 点的几率并不能用经典物理计算,简单地取为走各条路径几率的总和,而是要用量子力学的方法处理,考虑不同路径间相位导致的干涉,是一种相干的叠加.

决定  $L_\varphi$  大小的非弹性散射,除去上述电子-声子散射外,还有电子-电子散射以及磁散射.在三维弱无序金属中,主要是电子-声子散射.在薄金属膜中,当温度低到电子-声子散射可忽略时,电子-电子散射变得重要.近来,人们注意到在很低温度下,非弹性散射的弛豫时间趋于饱和,这意味着  $L_\varphi$  不会无限增大,其物理机制尚不清楚,有多种模型,且颇有争议.

这里,附带要说的是,笼统地讲微米尺度就是介观尺度显然是不对的.这种说法忽略了介观尺度的物理含义.载流子相干运动的尺度对不同的体系以

\* 2000-08-03 收到

及在不同的温度下是不同的. 对于正常金属,  $L_{\varphi}$  在微米尺度是出现在液体氦或更低温度下的. 采用 STM(扫描隧穿显微镜)类型的技术, 有可能大大减小微加工的尺寸, 从而使体系在液体氦或室温下成为介观体系, 由此构造新的小尺度的量子器件正是人们当前关心的研究方向.

## 2 介观物理

介观(mesoscopic)一词是 1981 年 Van Kampen 首先建议的. 介观物理是介观体系的物理的简称, 因此对介观物理涵盖内容的理解主要决定于对介观体系的划分. 从上节的讨论知道, 介观尺度是有确切的物理含义的.

对介观体系界定的主要判据是体系的尺度约为  $L_{\varphi}$  大小, 载流子在其中做相干运动. 从基础研究的角度, 其重要性在于介观体系表现出许多本质上是新的物理现象. 一类是与波函数相位有关的量子力学效应, 另一类是与小的样品尺寸及非弹性散射减弱、热平衡变慢有关的统计物理效应. 在物理上, Imery 将主要的要点概括为:

(1) 弹性散射和非弹性散射是很不相同的. 前者给予电子一个完全确定的、但可能是复杂的相位. 后者导致相位的不确定性, 从而使量子干涉效应消失.

(2) 在大到  $L_{\varphi}$  的尺度内存在量子干涉效应, 导致诸如 Anderson 局域, 不同的 A-B 振荡和电导涨落等量子现象发生.

(3) 介观体系的样品特质(sample-specific nature)导致不同样品间诸如电导和轨道磁响应的涨落, 某些涨落量的大小是普适的.

(4) 正常电子在  $L_{\varphi}$  尺度内相位相干使它们能携带超导的信息. 希望这将会对在正常金属甚至在半导体中的感生超导电性提供新的了解.

这些是介观物理主要讨论的内容, 也是 Imery 书中主要涉及的方面. 相应的介观体系主要是载流子的定域化长度  $\xi$  大于样品尺寸  $L \approx L_{\varphi}$  的弱无序电子体系. 具体的材料可以是金属、合金、或半导体、半金属. 目前在单电子水平上对介观和量子干涉效应, 人们已有很好的了解. 相互作用以及电荷和磁通

量的组合产生的新效应是当前人们关注的中心.

以上是有关介观物理涵盖范围比较狭义的理解, 着重在载流子尽管经受很多弹性散射仍做相干运动, 以及与此相关的、在物理上与宏观体系及微观体系本质的不同.

如果一般的将介观体系理解成量子力学效应突出的、几乎是宏观尺度的微小体系, 那么介观物理涵盖的面要宽得多. Imery 在他的书中最后一章“结语”中也讲道, 或者因为物理比较直接, 或者已有很好的评述文章, 还有很多内容在他的书中未包括在内, 如光学效应、弹道输运、共振隧穿、库仑阻塞等. 同时也未讨论有关电子和经典波类似方面的很多工作. 由于经典波的波长远大于电子的费米波长, 相应的体系会有大得多的尺度. 但是另一方面我们也看到, 1991 年 Beenakker 和 van Houten 写的有关半导体二维电子气中量子输运出色的评述文章<sup>[4]</sup>并未冠以半导体“介观体系”的名称, 而是用了半导体“纳米结构”的名词. 除纳米微颗粒和团簇以外, 有关宏观和微观之间微小体系物理的国际会议一般也称为“纳米结构和介观体系”的物理, 并未笼统地只用介观物理来概括.

在我即将出版的《固体物理基础》一书<sup>[5]</sup>中, 由于章节组织的关系, 采用了比较狭义的介观物理的概念, 但对某些从广义的了解亦属介观物理范围的内容也做了说明. 对于一般的物理涵盖面很宽的情形, 也许称“微结构和介观体系物理”更好一些.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 阎守胜. 物理, 1993, 22 : 705 [ YAN Shou-Sheng. Wuli (Physics), 1993, 22 : 705 (in Chinese) ]
- [ 2 ] 阎守胜, 甘子钊主编. 介观物理. 北京: 北京大学出版社, 1995 [ YAN Shou-Sheng, GAN Zi-Zhao eds. Mesoscopic Physics. Beijing: Peking University Press, 1995 (in Chinese) ]
- [ 3 ] Imery Y. Introduction to Mesoscopic Physics. New York, Oxford: Oxford University Press, 1997
- [ 4 ] Beenakker C W J, van Houten H. Solid State Physics. Ehrenreich H, Turnbull D ed. Boston: Academic Press, Inc. 1991, 44 : 1
- [ 5 ] 阎守胜. 固体物理基础. 北京: 北京大学出版社, 2000 [ YAN Shou-Sheng. Fundamentals of Solid State Physics. Beijing: Peking University Press, 2000 (in Chinese) ]