

# 电子有“特异功能”吗 ——浅谈介观物理学

蒋 平

如果有人告诉你,用两根探针测量一段导线的电压并算出其电阻,结果却同这段导线相串联的线路的其他部分有关,似乎电子有左道旁门式的“特异功能”,跑到常识以外的区域里去了,你一定不相信,因为这不符一段导线的电阻只决定于其自身的基本物理事实。

然而,近年来却实实在在地观察到这一类奇特现象,并且发展出物理学的一个新分支——介观物理学。目前,介观物理学研究对象大多是一些处于低温下的线状和环状的小尺寸导电材料,既包括金属也包括半导体;而研究的内容主要在于输运性质方面。

## AB 效应——介观体系中量子干涉现象 重要的理论基础

在固体材料中观测到著名的 AB(Aharonov-Bohm)效应表明介观物理学发展到了一个新阶段。

所谓 AB 效应系指 1959 年 Y. Aharonov 和 D. Bohm 发表的一种理论,证明在电子运动的空间中不管是否存在电磁场,电子波函数的位相都会受到电子运动的空间中电磁势的影响。参看图 1(a),入射电子束在 A 点分为两支相干电子束。B 为一与纸面垂直的长螺线管,磁场仅存在于螺线管内。两束电子在观察屏 S 处相遇而形成干涉图样。无疑,在电子运动的路径上磁感应强度为零,但容易证明存在磁矢势。Aharonov 和 Bohm 指出,磁矢势的存在使两束电子得到附加的位相差,数值为电子路径所包围的磁通量  $\phi$ (这里也就是螺线管的磁通量)的  $e/\hbar$  倍。因此屏上出现的干涉图样就会随螺线管中的磁场而变化。如果螺线管中的磁通增加了  $h/e$ ,则两束电子的位相差恰好增加  $2\pi$ ,干涉图样正好变化一

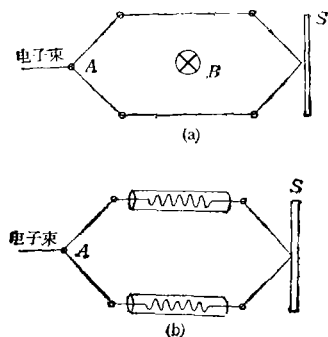
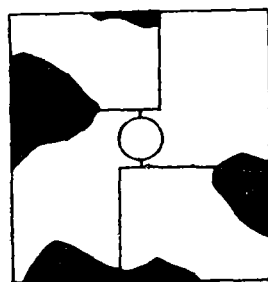


图 1 AB 效应示意图

个周期,常称之为完成一个 AB 循环。如螺线管内磁场不断增加,应当观测到屏上干涉图样的周期性变化。类似地,如在两束电子路径上各置一长金属筒,如图 1(b)所示,当电子进入筒后在两筒上加上不同的电势,而在电子越出筒前即将电势撤消,则可以证明屏上的干涉图样也会发生变化,即电子束也得到因电势所致的附加位相差。根据经典物理图 1 所示的两种情形中电子的运动都不受影响,因为并无洛伦兹力作用于电子。但是势却改变了电子波函数的位相,从而影响电子波的干涉。可见 AB 效应是一种量子干涉作用,因为经典物理看作粒子的电子的波动性质正是量子力学的基本观点。

理论发表后不久即从实验上观测到了真空中的 AB 效应。而对固体材料中 AB 效应的观察还是近五年的事。最初的观测对象是一个做在硅片上直径约  $0.8 \mu\text{m}$ 、线宽  $0.04 \mu\text{m}$  的金环,



(a)

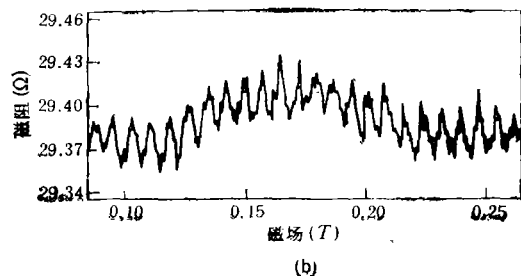


图 2 微金属环的磁阻

在金环直径方向接两个电极以便施加电流并测量金环上的电压,如图 2(a)所示。实验在  $0.06\text{K}$  的低温下进行,并沿与金环平面垂直的方向施加磁场。图 2(b)为实验测得的存在磁场时样品的电阻——磁阻随磁场的周期性变化。振荡周期与样品面积的乘积(金环磁通的变化)恰好与 AB 效应所要求的  $h/e$  相等,从而直接

证明了固体材料中电子波量子干涉的  $AB$  效应。电子从电极进入金环,在连接处分两路,各沿一个半环前进并在另一电极处汇合。汇合处两路电子波产生干涉,合振幅的模决定流过样品的电流。从而形成随磁场周期性变化的电阻。在这一实验与其他有关的实验中,或许是由于实验条件的限制,并未执意追求“有势无场”的特点。但有场必有势,而  $AB$  理论预言的势产生的位相差必对电子波的干涉有影响这一基本观点却在材料中得到了明白无误的验证。

### 介观——一个特殊的物理领域,低温小尺寸样品

$AB$  效应的观测必须以电子波直到其相遇处都保持相干性为前提。对于真空,这一点是不成问题的,这就是真空中的  $AB$  效应早就观测到的原因。但在材料中由于存在各种散射因素,必然要严重影响电子波的相干性。两种典型的散射机理是电离杂质和晶格振动,都是使材料偏离理想的周期性结构的物理因素。众所周知,固体材料中尽管存在密集排列的原子,但只要保持严格的周期性就不会影响其中电子波的传播,即不产生散射作用。电离杂质对电子的散射是由于静电相互作用;因其质量远大于电子,散射前后电子的能量基本保持不变,散射只改变电子运动的方向,因而是弹性散射。在电离杂质的散射作用下,电子在空间的运动并不沿固定的直线,而是扩散型的。晶格振动对电子的散射涉及声子的发射与吸收,伴随着与电子交换能量,因而是非弹性散射。现在已经证明,电离杂质的弹性散射虽然使电子波的位相变化,却不改变电子波的相干性,经过弹性散射之后电子波仍然是相干的。晶格振动的非弹性散射则摧毁电子波的相干性。由此可见在材料中观测  $AB$  效应并不要求极高的纯度,而是必须使电子在受到非弹性散射之前就能越过样品,在端点处产生干涉并进入探测电路。或者说要求电子渡越样品的时间须不大于连续两次非弹性散射之间的平均自由时间  $\tau_\phi$ 。在存在杂质的情形下,电子在  $\tau_\phi$  时间可越过的距离为相应的扩散长度  $L_\phi = (D\tau_\phi)^{1/2}$ ,  $D$  为弹性散射对应的扩散系数。 $L_\phi$  专门称为位相相干长度,其意义是电子波在  $L_\phi$  的距离上可不遭遇非弹性散射而保持其相干性。于是观察材料中的  $AB$  效应及其他量子干涉效应的条件应当是样品的线度  $L$  不大于位相相干长度,  $L \leq L_\phi$ 。为此应将样品做得充分小,使  $L_\phi$  尽量大。由于晶格振动散射的跃迁几率与声子密度成比例,降低温度会增加  $L_\phi$ 。通常的金属在  $1K$  以下  $L_\phi$  可达  $\mu m$  量级。随着现代科技的发展,制造长度在  $\mu m$ 、线宽在几十  $nm$  量级的线状或环状样品现在已不太困难,这就是近年这一领域发展迅速的原因。图 2 的样品  $L_\phi$  明显大于金环半周长,因而呈现出介观物理学的重要现象—— $AB$  效应。

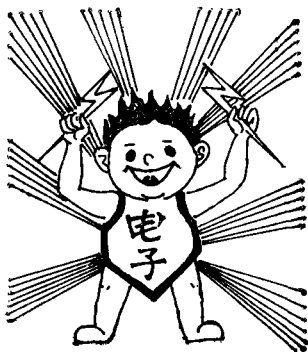
通常用  $L \leq L_\phi$  来不太严格地规定介观物理学的

范围,其含意是,通常介观物理的研究对象包含  $10^8 \sim 10^{11}$  个原子,即样品一般而言仍基本上属于宏观范畴,并且用宏观的手段测量研究(例如作电流、电压等电学测量);但是测量结果却反映出量子力学的电子的波动特性。量子力学是研究微观粒子的学科,说明这种体系呈现出微观物理的规律。这就是“介观”——介于宏观与微观之间——的含义。有人比喻说介观物理学犹如将电压计和电流计直接连到原子上去测量电子的电阻和霍耳效应,这在一定程度上表达了介观物理学所涉及的领域。

### 奇特的输运性质

在介观范围,经典的物理规律不再适用。一个突出的现象是所谓随样品而异的普适的电导起伏。如果将图 2(b) 的结果在大多多的磁场范围下来考察,可以发现迭加在  $\hbar/e$  的  $AB$  振荡之上的背景,也呈现出在大磁场标度上的起伏,如果转化为用电导表示,则电导起伏具有某种普适性。在  $L \sim L_\phi$  的条件下,与样品采用的材料、平均电阻、是否含有弹性散射的杂质没有明显的关系,而且电导起伏的数值都在  $e^2/h$  左右。但电导随磁场变化的具体函数关系则对每个样品都各不相同。这种起伏可以用电子的不同路径会在金属中围成封闭曲线来说明。这种内部的封闭曲线所包围的面积一般要比图 2(a) 所示金环的面积小得多,因而由于量子干涉效应引起的磁阻起伏所对应的磁场标度就要大得多,常在  $10^{-1}T$  的数量级,而图 2(b) 中的  $AB$  振荡周期则在  $7 \times 10^{-3}T$  左右。

图 3(a) 为一典型的测量一段导线  $PQ$  的磁阻的样品几何布局及实验结果。与  $PQ$  相连的四根引线分别用作电流与电压探针,实验结果表明上述普适电导起伏。图 3(b) 则为完全类似的样品,只是附加了一个与导线相联结的、处于电流路径之外的小环,其直径约为  $0.7 \mu m$ 。同样的实验测量显示磁阻的“高频噪声”。分析表明这种噪声正是与小环相应的  $AB$  振荡! 然而,从经典角度来看这完全是不可思议的,因为电流的路径根本不涉及附加环。可是根据量子干涉作用则很容易加以说明。电子由于其波动性质完全可以进入小环的弯道,而且沿相反方向进入小环的电子波可以相遇发生干涉,影响电子在相遇点出现的几率,从而使通过导线的电子密度(电流)发生变化,并表现为磁阻的“高频噪声”。实验证明



我平时阅读自己专业的文献，常嫌时间不够，更无暇涉及其他物理分支学科，苦于不知道它们的进展情况。现在在《现代物理知识》，涉及面广，内容新颖，它就能满足我对于自己专业以外的物理发展梗概的了解。这对于我有很大的好处。相信像我这样的人很多。

# 《我与〈现代物理知识〉》征文比赛

自 1990 年《现代物理知识》第六期刊载《我与〈现代物理知识〉》征文比赛通知以来，陆续收到不少读者来稿。本刊将有选择地刊登部分作品，以便从中评选优秀文章。这里选登我国著名科学家王淦昌先生亲笔撰写的短文，作为新栏目首篇奉献广大读者，以引起各界朋友对这次征文比赛的重视。——编者

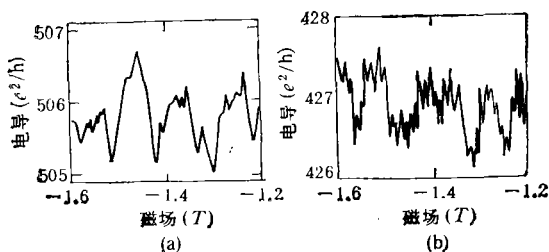
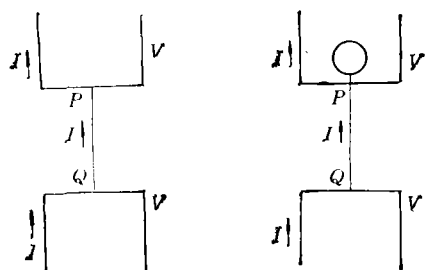


图 3

了电子的波动行为使其能进入经典理论所不允许的电流路径之外的区域，呈现出异于我们所熟悉的通常经典行为的“特异功能”。这也就是本文开头提到的情形。毫无疑问，这类现象的观测是以电子波在样品中维持相干性为前提的，样品的线度应小于电子波的位相相干长度。因此这类奇异现象的研究也就成为介观物理学的重要内容。

这类现象显然不符合经典的欧姆定律。欧姆定律表明导体中某点的电流密度应与该点的电场强度成比例，因而具有“局

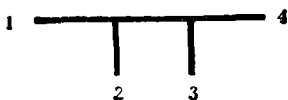


图 4

域”的性质，而上述介观体系则表现出非局域性。另一个例子是如图 4 所示意表出的一段导线，当电流在引线 1 与 2 之间流过时，竟能在引线 3 与 4 之间测到电压，虽然引线 3 与 4 是和电流路径上的同一点相连接的。实验还发现一段处于介观范围的导线的电压与电流的比值竟同电流的方向有关，不具有通常电阻关于电流方向应有的对称性。所有这些现象的物理基础都与量子的干涉现象有关。

## 方兴未艾，前景灿烂

崭新的物理现象往往会吸引物理学家的注意并开辟出新的研究领域。介观物理学正是又一个典型的例证。介观物理学研究除其本身所具有的科学意义而外，对电子学未来的发展也具有很重要的应用价值。随着集成度的提高，现在微电子学已发展到线宽小于 1000 个原子间距的程度。除非发展出新一代低功耗、性能可靠的器件、元件尺寸进一步的缩小与器件工作速率进一步的提高除了受芯片单位面积的功耗制约而外还会受到原理性的限制。实际上目前元件尺寸已进入介观范围，介观物理学研究有可能给新一代电子元件的研制以正确的引导。事实上现在已经出现了在低温下工作、基于量子效应的新一代器件的试验性原型，其工作原理系利用电势控制电子的波动特性以影响电阻、电压。可以预期未来会出现高得多的温度下呈现量子力学特性的器件。从而目前的电子器件的工作速度可成百倍的增加。无疑，在这方面的技术发展中，介观物理学的作用是不可或缺的。

目前，介观物理的研究蒸蒸日上，方兴未艾。在 1990 年 3 月美国物理学会 (APS) 年会上专门为介观物理学安排了五次分组会议，便可见其受国际科学界之重视于一斑。其发展的灿烂前景当在意料之中。