

“介观”物理中的量子弹道输运和相干输运

顾本源

(中国科学院物理研究所)

顾雷

(北京大学物理系)

随着分子束外延技术的进步以及光学和电子束微刻技术的日臻完善,目前人们已能制造具有高电子迁移率的亚微米尺度的微结构器件.在毫K的低温下,高迁移率材料中的电子,接连两次非弹性散射间所走过的平均距离,称作电子的相位相干长度,可达到微米以上,超过微结构的尺度.这种系统的物理性质完全受电子的量子力学相干性所支配.由此,物理学中又开辟了一个新的分支领域,即“介观”(mesoscopic)物理学.所谓“介观”系统,是指它的尺度与宏观系统相比显得足够小,但与原子-分子系统相比又足够大,是介于两者之间.“介观”系统中的电子输运过程,不能够用通常的求宏观系统的统计平均的方法来处理,而是表现为量子相干输运和量子弹道输运.电子在输运中保持“相位记忆”,因此导致种种不寻常的量子

干涉现象以及介观尺度范围内的量子化现象.

大家知道,电子具有粒子-波动二象性,应当十分类似于电磁波,会显示出干涉效应.那么,为什么电子波的量子干涉效应不是寻常可见的呢?追溯其缘由,至少有三点:第一,在固体材料中费米电子的波长只有50--100Å,与通常能够制成的器件尺度相比,太短了.只有当器件或样品的尺度能够与电子波长相比较时,波动性才会表现出来;第二,电子在固体中运动时会不断与其它电子、杂质缺陷,声子等发生非弹性碰撞,使电子丧失“相位记忆”,进而破坏电子波的相位相干性.高迁移率的半导体中电子非弹性散射的平均自由程可达10微米,如果器件的尺度小于微米数量级,则几乎不发生非弹性散射,电子的输运过程是弹道式的;第三,固体中电子波通常不是单色的,费米电子的

结束语

本文介绍了以地下实验为重点的新一代非加速器实验的兴起与发展.如从广义定义出发,把地面的和空间的有关实验也包括进来,非加速器实验物理这块园地就显得更加繁荣.就目前已经获得的实验结果而言,与其说在基本课题上取得了成果,不如说发现了许多问题、矛盾和“疑难”.但在科学研究中,发现问题就是发现机会,解决非加速器实

表 2 SN1987A 的中微子信号

实验	基准质量 (吨)	能阈(MeV)	宇宙时间 (UT)	事例数/持续时间(秒)
LSD	90	5	2:52:36	5/7
Kamio II	2140	7.5	7:35:35	11/12
IMB III	5000	20	7:35:40	8/6
BAKSAN	330	12.5	7:36:06	3/6

验所提出问题的过程就是我们走向新物理的过程.

表 3 大气中微子实验结果

实验	探测技术	辐照时间 (千吨·年)	R
Kamiokande II	水 Ce	4.90	$0.60 \pm 0.07 \pm 0.05$
IMB III	水 Ce	7.70	$0.54 \pm 0.02 \pm 0.07$
FRÉJUS	径迹量能器	1.56	0.87 ± 0.21
NUSEX	径迹量能器	~0.40	0.99 ± 0.40
SOUDAN 2	径迹量能器	1.01	$0.69 \pm 0.19 \pm 0.09$

表 4 ^{76}Ge 与 ^{136}Xe 的无 ν 双 β 衰变实验结果

实验	$T_{1/2}(0\nu)$ (10^{24} 年)	$\langle m_\nu \rangle$ (eV)
CPN, ^{136}Xe	>0.42	<2.3
Milano, ^{136}Xe	>0.02	<10.5
ITEP, ^{76}Ge	>1.0	<1.5
Heidelberg, ^{76}Ge	>1.8	<1.2

能量有一个分布,这种能级的展宽,倾向于抹掉干涉效应。然而如今科学的进步已能生长出高迁移率的半导体材料,同时又能加工出亚微米尺度的微结构样品,在低温和低电压下,“介观”系统中电子的量子弹道式输运和相干输运近年来已经被许多实验所证实,并且观察到许多令人惊奇的崭新的量子现象。

在通常金属和其它固体材料中,电子的运动是无规的,不断地与各种散射中心发生弹性和非弹性碰撞。在长达20年之久的时间内,理论物理学家们一直对下面这个问题争论不休:到底引起电子动量状态改变的弹性散射会不会破坏电子的“相位记忆”?占上风的观点认为那是理所当然、无可非议的。但是以IBM的朗达尔为首的少数科学家坚持认为,引起电子的能量状态发生改变的非弹性散射,才是电子“相位记忆”致命的谋杀者,是它毁掉了电子波的相干性。最近几年的精确实验结果,支持他们的看法。

最近,在量子点接触中观察到的电导量子化现象,清楚地表明了电子的量子弹道输运的特性。所谓点接触,是指由一个窄短的沟道将二个宽的导电区域连通起来的结构。在弹道式输运范围内,剩余电阻主要来自电子沟道入口处遭受到的反射。金属中费米电子的波长 λ_F 约为0.5毫微米,远小于实际能够制作出的点接触的宽度,所以量子效应并不重要。但是在用电子束外延生长出来的高迁移率半导体异质结材料中,电子构成二维电子气,费米电子的波长比上述值大上百倍。同时,目前微刻技术已经能够加工出可与 λ_F 相比较且宽度可调的量子点接触结构。

1988年荷兰的迪尔夫技术大学的威斯小组和英国剑桥大学的卡文迪许实验室的沃拉姆小组,首次报道了在高迁移率的GaAs-AlGaAs二维电子气中,毫K低温下,量子点接触的电导测试结果。他们惊奇地发现电导随着沟道宽度的改变呈现阶跃式的变化,出现一系列相当平坦的平台,亦即电导是量子化的。他们使用Ga-As-AlGaAs异结材料,制成棒状,然后应用电

子束微刻技术在异质结的顶部设置一对分开的金属门极。量子点接触的形成是靠加一负电压于门极上,使门极底下的电子气被抽空,形成高阻的耗尽层,好象二道闸拱一样,迫使电子通过一条窄短的沟道。改变门电压就能够改变沟道的宽度。随着门电压的改变,量子点接触的电导出现分立的改变,呈量子化。

零磁场下,量子点接触的量子化效应能够应用半经典的理论来解释。由于沟道是又窄又短,在沟道的横方向上,电子的动量取值是分立的,但沿着电流方向,电子的动量保持连续取值。所以,沟道中的电子态是构成一系列的子能带,电子依次占据它们,直到费米能级。费米能级以下被填满的子能带对电流都有贡献,且每一子能带对电流的贡献都是一样的。随着门电压改变,沟道的宽度发生变化,使电子在子能带上分布情况出现变化,电子从子能带上被挤走或重新填充新的子能带。每当填满或抽空的子能带跨越费米能级时,对电流有贡献的子能带数目就会有所增减,使电导发生一次跳跃,出现一个平台。由于沟道是有限长且两端是敞开的,而且与宽的导电区接壤处存在突变的界面,好像开腔的风琴管一样,存在纵向的共振态。正因为有这些共振态的存在,使得每一级电导平台上出现许多小的振荡峰。由这些峰的位置可以确定沟道的纵横比。

在二维电子气以及电流的垂直方向上加磁场时,沟道中会有杂化磁电子带产生。电导的量子化仍然存在,不过在给定的二个门电压之间的电导平台数目减少了。同时,在强磁场下,电子的自旋简并被解除,会产生额外的电导平台。众所周知,在磁场中电子在与场的垂直平面上是沿一系列朗道量子化圆周轨道运动的。由于沟道的横向尺度受限,朗道的轨道可能会被边界切断,形成三种轨道。完整的闭合圆形轨道,沿单边界行进的蹦跳式轨道以及Z型弹道。因为在磁场下沟道中电子的运动轨道多种多样,使得量子输运现象既丰富又复杂。

与电子的相干输运紧密相关的一个重要效应,是阿哈罗洛夫-玻姆效应。1959年阿哈罗洛

夫和玻姆曾经构思一个实验,唤醒人们注意一个令人难以置信的量子力学结果。虚构的实验方案是这样的:假设有一束电子,由左端注入迴路,然后分叉成二束,环绕一磁通区分别沿顺时针和反时针方向行进,最后再汇聚在一起。如果迴路中不存在任何散射中心,根据量子力学原理,与磁场相对应的电磁矢量势的存在,会引起波函数产生一个相位移动。由于电子波动性,沿不同路径运动的电子将获得超前或滞后的相移,最后二束电子波有不同的相位,汇合后产生干涉,导致电流随磁通的变化呈现周期性的振荡。这称作阿哈罗洛夫-玻姆振荡。从经典观点上看,简直无法理解这一结果。电子在离开磁通贯穿范围的无场区中运动时,电子“看不到”磁场,因此没有受到洛仑兹力的作用。在阿哈罗洛夫-玻姆设计的实验中,电子波是与场空间分隔开的,电磁矢量势导致可观察的效应,表明它本身是真正的物理量。这一点似乎有悖于相对论量子力学中熟知的朗道规范不变性原理。量子力学中,磁场强度和电磁矢量势,哪一个更基本的物理量,尚有争议。

1981年,苏联莫斯科物理问题研究所的夏文父子二人首次报道了在镁制圆柱体中观察到电阻随磁场变化出现周期性的振荡。观察到的电导振荡周期为 $h/2e$,是正常的阿哈罗洛夫-玻姆振荡周期的一半。这是由于圆柱体这一具体的几何形状造成的。1983年IBM的韦布小组,在很小的金制单环迴路中观察到磁阻的振荡,周期恰为 h/e ,同时还观察到非周期的磁阻增量尺度更大的背底电阻振荡。这是由于环线本身有一定宽度,电子沿环运动,无规地偏离

轨道,它们的弹道路径所围成的面积是在平均值上下涨落的,从而使得穿过迴路的磁通量有涨落,造成背底电阻的振荡。这些实验清楚地表明:电子是量子相干运输的。

最近,在硅的金属-氧化物-半导体三极管中和由 GaAs-AlGaAs 二维电子气材料制成的双连导电微结构器件中,都观察到阿哈罗洛夫-玻姆振荡。施加静电场,也能引起电子波的相移,这种静电的阿哈罗洛夫-玻姆效应也已经在实验上观察到了。

当电子运输是相位相干时,欧姆定律不再成立。电子通过含有无规势的导体时所形成的电流,漂忽不定地依赖于电势差的平均斜率。同时,由于势的不具有镜面反射对称性,不能再期望当电流以正反两方向通过导体时,所测得的电阻值会相等。在低温下,梯线中非欧姆型的电导涨落已经观测到。电导的非定域性也是量子相干运输的结果。如果构造二个等同的四探针的量子迴路,在第二个迴路外悬挂一个金属环,测量其电导,结果会发现,虽然二者的电导都表现出无规涨落,但仔细分析振荡谱,发现对于带环的回路会有附加的高频“噪声”;对应于 h/e 振荡。从经典的观点上看,外加一环不会对电阻有什么影响。这个实验结果纯属量子相干效应的产物,给电阻带来了“非定域”的贡献。

量子弹道运输和相干运输是“介观”系统中普遍存在的过程。“介观”物理学的开创,将揭示与电子波的量子相干性有关的许多新现象和新效应,对验证量子力学基本原理和设计新型量子器件起着重大的作用,其科学意义和潜在的实用价值,是不言而喻的。

[306—730⑨] 斥力在宇宙学中的应用

物理学类 冯天岳著

32开 58千字 84页 平装 定价 2.90元

1994年1月出版 ISBN7-80554-206-6/N.1

自从爱因斯坦提出宇宙斥力之后,在宇宙学中开辟了对斥力的研究。本书给出斥力的计算公式和斥力常数的数值。应用斥力建立起后星系宇宙模型,从而解释了类星体的高红移;计算出类星体哈勃图中的拟合曲线,并且预言类星体的红移值不大于8。附录给

出使用袖珍程序计算器的详细计算方法和全部数据,读者可自行验算。

读者对象:理工科大专学生

邮购地址:北京朝内大街135号,科学书店

邮 编:100704 电话:4017892