

介观体系中的量子干涉现象

李苑喆 李冰欣

(华南师范大学物理与电信工程学院 广东 广州 510000)

(收稿日期:2017-07-24)

摘要:介观干涉器件中的量子干涉现象目前仍然是处于发展前沿的理论和技术应用问题.本文的创新之处在于运用对比的方法,如介观系统与宏观、微观系统的对比,经典干涉与量子干涉之间区别的阐述,向大众科普介观体系中量子独特的行为和物理特征.着重介绍了介观体系中的几种典型量子干涉现象并对其行为及特点进行了深入的探讨.

关键词:介观 量子干涉 现象 相位

1 在介观中量子相干输运的分类及特点

1.1 介观体系

1.1.1 基本概念

介观体系是指系统尺寸介于宏观体系和微观体系之间,其确切尺寸范围应视所研究的物性和系统温度而定^[1].介观系统的尺寸大多处于纳米量级,所以介观系统又被称为纳米结构^[2].

1.1.2 介观系统与宏观、微观系统的对比

若从尺寸的角度来分析,一方面介观系统已大致属于宏观范围,可以像宏观系统那样定义和测量,其特点是具有自平均性,即整个体系的量由小系统量的叠加得到.另一方面,介观体系具有量子力学的特性,由于电子运动所具有的量子相干性,会出现一系列新的与量子力学相位相联系的量子干涉现象,粒子波函数经相干叠加,其相位并未被系统统计平均掉,这方面又与微观体系极其类似.可见,无论与宏观系统还是与微观系统相比,介观系统独特的行为和物理特征都有明显的不同.

1.1.3 经典干涉与量子干涉的区别

(1)这两种干涉在数学上的表示都是波函数的相加,但经典波是实在的、可直接观察的、以实物为媒介的,发生干涉时表现为叠加区域中的强度分布;而发生量子干涉的波是描述微观粒子的几率波,它

表现为叠加态上的几率分布,其波函数不以实物为媒质,发生干涉时不能直接地观察到干涉图样,但可以通过大量微观粒子的集体表现,间接地得到与经典干涉相似的量子干涉图样.

(2)这两者的干涉项都可以带有信息.经典力学中的相干波的干涉直接反映了两波源到观察点的位相差;量子干涉中的干涉项反映了量子位的相干强度、位相等,反映了量子信息的保持程度^[3].

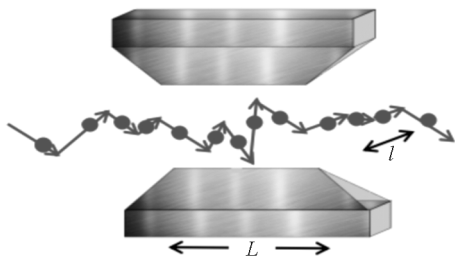
(3)经典与量子干涉最本质的区别是:经典干涉中光的干涉是在不同光子间发生的;而量子干涉认为所有微观粒子都具有波粒二象性,态的叠加原理是对“波的叠加性”与“函数完全描述一个微观体系的状态”两个概念的概括,干涉是一个微观粒子自己与自己的干涉,绝不是两个粒子互相干涉.这也是经典理论的局限性所在.

1.2 在介观中量子干涉的分类

由于介观是指介于宏观和微观之间的尺度,其输运过程不能用通常的统计平均方法来处理,而是表现为量子相干输运.根据低温下输运的两个特征长度,即非弹性散射平均自由程和电子弹性散射平均自由程,可以把介观系统中的量子相干输运划分为扩散输运和弹道输运两个输运区域,如图1和2所示.

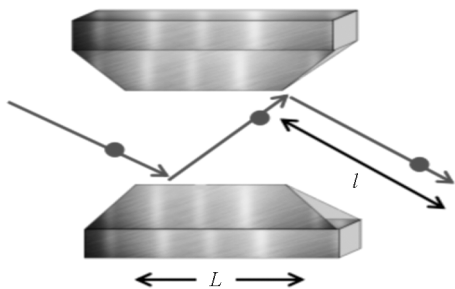
当系统的尺寸接近或小于弹性散射平均自由程 l_m

时,电子在运输过程中保持相位相干性,其运输区域属于弹道运输区域,如图2所示.电子的运输主要决定于样品的边界条件.这个区域中电子的相干效应最明显.



系统的尺寸远远大于电子的平均自由程,电子在运动过程中受到无规则的散射,从而损失相位记忆.因此,所走的路径是无规则的

图1 扩散运输的示意图



系统的尺寸小于电子的平均自由程,电子在运输过程中保持相位相干性,其主要受到边界散射的影响

图2 所示的是电子弹道运输的示意图

1.3 在介观中量子干涉的特点

为了使读者对介观物理系统中的量子相干现象有深刻理解,本节简单地从以下几个方面阐述在介观中量子干涉的特点.

(1) 量子力学中的波函数的相位是个微妙的概念.考虑含时哈密顿量的薛定谔方程的解,方程中的哈密顿量的参数做周期演化的过程中,出现了与时间有关的相位因子.

(2) 当介观尺寸小于相位相干长度 l_ϕ 时,系统具有相位相干性.当两列波干涉时,如双缝干涉实验的结果是 $|A_1 + A_2|^2 \cdot \text{Re}[\exp(ik_F(L_1 - L_2) + i(\varphi_1 - \varphi_2))]$,这就和相对相位 $(\varphi_1 - \varphi_2)$ 有了关联.如果这个相位是随机的,那么随着时间平均的干涉效应就为零,也就是说它丢失了相位相干性.

(3) 随着热涨落的增强以及受杂质散射的影响,经典描述的粒子现象会很快地消失.杂质原子的数量、种类、位形的改变都会改变无规则行走式的费

曼路径,导致电子波函数的干涉效应发生变化.受杂质散射的不同程度的影响,电子在比圆环尺寸小得多的尺度上就已经失去了相干性,所以也就观测不到类似于原子理论中玻尔的量子现象了.

(4) 只要有电磁矢势的存在,电子波函数的相位就会发生改变,从而影响电子波的干涉效应和概率密度.最典型的例子就是 Y. Aharonov 和 D. Bohm 设计的电子束双缝干涉实验.

2 介观体系中的量子干涉现象

2.1 AB 效应

在电磁场强度为零但电磁矢势和标势不为零的区域中运动的两束相干的带电粒子,波函数会发生不同的相位变化.当两束带电粒子重新相聚后,就会出现干涉现象,这种干涉现象被称为 AB 效应^[4].其基本简化实验结构如图3所示.

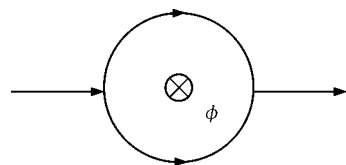


图3 AB效应基本简化实验结构

当电子波从介观环左边入射时,会在环的两侧分裂成上下两束波束.这两束电子波经过两个半圆环后,会在出口相遇(干涉).从左电极到右电极的透射波的性质决定于环周长与电子波长的相对大小.通过改变垂直于环面的磁场或者改变其电场分布,可以调制上述结构出口处两束电子波的相位差.

2.1.1 磁 AB 效应

如图4所示,荷电 q 的粒子束在 A 点分成两束,它们经过双缝后分别经历了空间中的两条不同路径,最后在 F 点汇聚^[5].

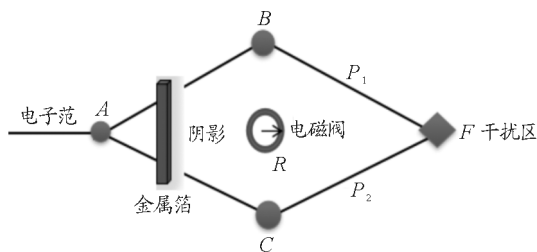


图4 磁 AB 效应

2.1.2 电 AB 效应

如图 5 所示,同样的入射电荷 q 的粒子分解成两束,分别经过两条路径 p_1 和 p_2 ,最后在 F 点汇集.在这两条路径上,分别放置了两个 Faraday 筒(空心金属圆柱形筒,筒内无电场),筒上电势差 $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$,经历两条路径的荷电粒子的波函数有一个相差 $\delta_\varphi = \frac{q\tau\Delta\varphi}{\hbar}$,因此也会观察到干涉条纹^[6].

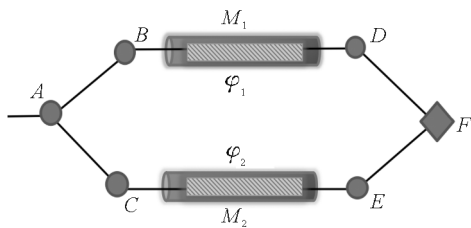


图 5 电 AB 效应

2.1.3 标量 AB 效应

利用中子干涉仪测量磁场对中子束相位的影响,尽管中子不带电,但它具有内禀磁矩 μ .在磁场 B 中,中子受到的磁场作用为 $-\mu \cdot B = -\mu\sigma \cdot B$,是一种标量相互作用.其 Hamilton 量表示为: $H = \frac{1}{2m}p^2 - \mu\sigma \cdot B$.这项作用对相位的影响即为“标量 AB 效应”^[6].

实验示意图如图 6 所示.

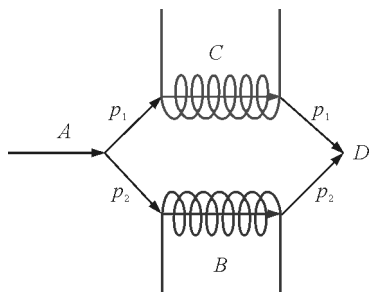


图 6 标量 AB 效应

入射中子束被分裂成两束,分别经过两条放置有不同性质电流的螺线管的路径后,在 D 点又重新汇合.经历两条路径而到达 D 点的中子波函数将出现一个相差.实验上已经观测到这种相差引起的干涉现象,称为标量 AB 效应.

2.2 普适电导涨落

除了 AB 效应外,普适电导涨落也是介观体系中量子干涉的现象之一.人们曾在测量处于金属扩散区 ($l \leq L \leq L_\varphi$) 的介观样品的电导实验中发现,

小的金属样品在低于 1 K 的温度下由于受到磁场或栅压的影响而使样品的电导呈现出非周期性的涨落^[7].

普适电导涨落来源于介观金属中的量子干涉效应.在导电电子通过样品时,会经历多次与杂质散射,走着无规则行走的路径,不同路径之间由磁场引起的相位差是不规则的,导致随即干涉效应以相应的电导涨落.

2.3 AAS 效应与弱局域化

磁场的存在将导致电子在场中产生回旋运动从而增大电子在体系中受到散射的几率,使电阻上升.这一现象称为磁致电阻.通过测量超薄金属圆筒的磁致电阻显示出的磁阻振荡以及负磁阻效应周期为 $\frac{h}{2e}$,此周期的磁阻振荡来源于电子波的相干背散射.

当电子在体系中运动时,在其各种可能的无规行走路径中存在一种自相交路径.由于无规行走,电子能以一定的概率沿这样的路径顺时针方向经多次散射而返回原点,同时电子也会以相同的概率沿此路径逆时针方向以相反的顺序散射而返回原点.这两条路径的顺序具有时间反演对称性.若电子在时间反演路径上的散射为弹性散射,则两束电子波函数在返回原点时会具有相等的相位,二者在原点的干涉结果为^[7]

$$|\Psi_1 + \Psi_2|^2 = |\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2 + \Psi_1^* \Psi_2 + \Psi_1 \Psi_2^* = 4|\Psi_1|^2$$

若发生的是非弹性散射时,两束波函数在迭加时并不相干,电子返回原点的几率为 $2|\Psi_1|^2$.这意味着电子在输运过程中在某一点停留的几率比经典值大了一倍,从而导致电阻的增大或电导的下降,这一现象称为弱局域化.若时间反演路径包围了磁通,则两个波函数在返回原点时的相位差为

$$\Delta\varphi = 4\pi \frac{\Phi_m}{\Phi_0}$$

对应的干涉项为

$$\Psi_1^* \Psi_2 + \Psi_1 \Psi_2^* = 2|\Psi_1|^2 \cos \frac{4\pi\Phi_m}{\Phi_0}$$

上式表明,磁致电阻会以 $\Phi_0 = \frac{h}{e}$ 为周期随 Φ_m 做振荡.振荡又被称为 AAS 振荡,以区别于 AB 效应.

3 应用

量子干涉现象作为量子理论的重要效应,被应用于很多方面.

3.1 超导体

超导体中的载流子的超导关联作用对超导结构的介观器件电子输运影响也会产生一些奇特的物理现象.在许多不同的输运系统中,Fano干涉效应对纳米结构器件中的电子输运起着十分重要的作用,介观结构中的微型超导体更是依附于这种效应而具有独特的输运现象.超导体近邻效应产生于超导性场中,描述了超导体附置在正常导体上时所发生的现象.由超导体中的Cooper对以及超导体中电子的激发在正常导体端的扩散所引起的超导隧道结的邻近效应,在理解许多基本物理现象上都具有很重要的意义.

3.2 电子器件

随着纳米技术的迅速发展,人类制造出越来越多尺寸比电子小的器件.这些介观尺度的超小电子器件的出现,使得运用量子干涉效应研究电子波的相位相干性及其相关效应成为可能.量子干涉效应在电子器件中起着非常重要的作用,最典型的例子就是上文提到的AB干涉仪.另外,碳纳米管、表面杂质、相位探测、无反转的激光和自旋过滤器等也涉

及此理论.

3.3 量子信息和量子计算

量子干涉在量子信息和量子计算中有着及其重要的应用.在经典的电子学中,开关、整流、放大和数据储存等基本过程都是通过操纵数以百万计的电子实现的.近几年,科学家们在量子干涉的基础上提出了高速计算机模型和量子算法,并在量子信息和量子计算的理论和实验上取得了重要进展,使信息科学似乎看到了光明的前景.

参考文献

- 1 苏耀恒.介观干涉仪中的量子输运:[学位论文].重庆:重庆大学,2012
- 2 隋小燕.受节点及缺陷调制的量子线中电子输运性质:[学位论文].沈阳:东北大学,2013
- 3 关洪.量子干涉效应.物理,1983(04)
- 4 张玉强.介观体系中的量子效应:[学位论文].贵阳:贵州大学,2008
- 5 Y. Aharonov, D. Bohm, Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory. Phys. Rev., 1959, 115(3), 485 ~ 491
- 6 历建刚.两个介观环在AB效应下的电导振荡:[学位论文].长春:东北师范大学,2007
- 7 王瑞.简单介观体系中的量子输运:[学位论文].太原:山西大学,2007

Quantum Interference Phenomenon in the Mesoscopic System

Li Yuanzhe Li Bingxin

(School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006)

Abstract: The quantum interference phenomenon in mesoscopic interference devices is still a theoretical and technical application problem at the forefront of development. Innovation of this paper lies in using the method of comparison, such as the mesoscopic system and macro and micro system comparison, difference between classical and quantum interference interference, popular science to the public on quantum in the mesoscopic system unique behavior and physical characteristics. This paper introduces several typical quantum interference in the mesoscopic system and we thoroughly discussing the behavior and characteristic.

Key words: mesoscopic; quantum interference; phenomenon; phase