

浅谈电子统计的“可变性”

阎学群

张家口大学物理系

长期以来,人们一直认为,诸如电子等同一类粒子组成的所谓全同粒子系统中,粒子间的相互作用的实现与量子统计规则有密切关系。由此,可把全同粒子分为两类:一类是费米子,具有强烈的排斥作用;另一类是玻色子,可以凝聚到能量最低态。实验发现,粒子的统计性与其自旋的大小之间具有深刻的联系。三维空间中,粒子自旋的大小只可能是整数(包括零)或半整数。当粒子的自旋是半整数时,它是费米子,服从费米统计;当粒子的自旋是整数或零时,它是玻色子,服从玻色统计。服从玻色或费米统计的粒子波函数在粒子的交换下是对称(+)或反对称(-)的,即

$$\psi(x_1, x_2) = \pm \psi(x_2, x_1)$$

电子的自旋为 $1/2$, 是半整数的,因此电子是费米子,服从费米统计,对于交换两个电子,波函数是反对称的,即

$$\psi(x_1, x_2) = -\psi(x_2, x_1)$$

但是,到了 70 年代末,在批判性地检验了量子统计的基础上,两位挪威物理学家莱雷斯和迈兹茵提出,在二维空间中可能存在介于玻色子和费米子之间新的全同粒子,这种粒子一般被称为“任意子”。它所遵循的统计规则叫分数统计。服从分数统计的粒子波函数满足

$$\psi(x_1, x_2) = e^{i\theta} \psi(x_2, x_1)$$

其中,统计位相 θ 取 0 (对应于玻色子)至 π (对应于费米子)之间的任意值。对于二维空间之所以能够出现服从分数统计的任意子,我们可以通过维度性和拓扑之间的关系来很好的理解。

任意子的概念并非针对电子而提出,然而,任意子被提出一年以后,人们真正从实验上确认存在任意子时,却发现这个任意子与电子有着密不可分的关系。

继德国物理学家冯·克利青等人发现整数量子霍尔效应之后,美籍华裔物理学家崔琦等人又在 GaAs 和 AlGaAs 界面中的电子气中发现了分数量子霍尔效应。随后,霍帕茵指出这个效应可能就存在任意子。实际上,在分数量子霍尔效应基态的能隙之上,存在着由许多电子组合成的复合粒子,即准粒子激发,它具有分数电荷,并且服从分数统计。其实,电子的这种并不奇怪。早在 50 年代末,当巴丁-库柏-施里弗提出了超导理论,从理论上解释了物质超导机制的时候,人们就已经明白了,电子是一种费米子,但是电子之间可以通过某种相互作用形成具有玻色子性质的孤立子,即库柏对,它表示具有相反自旋的电子之间,由于引力的作用形成具有电荷 $2e$ 的复合粒子。这种带电粒子虽然并不在所有方面都像玻色子,但它们在一定意义上也有玻色凝聚性质,这使得在宏观上表现出玻色子系统一样的超流性。

电子统计蜕变的例子并非只限于上述情形。80 年代初,美国物理学家魏尔扎克首先指出,通过给每个带电粒子束缚上磁束可以改变粒子的统计。试想根据费曼路径积分计算粒子-磁束复合体的配分函数,当我们计算某一定路径对作用量的贡献时,每交换一次两个复合粒子,必定包含一个位相因子,它由统计位相因子

$$e^{i\theta} = \begin{cases} 1, & \text{对玻色子} \\ -1, & \text{对费米子} \end{cases}$$

和贝里位相因子

$$e^{\pm i q \phi}$$

的乘积构成。式中, q 表示粒子的电荷, ϕ 代表磁束, $+$ ($-$) 分别表示逆(顺)时针方向交换。贝里位相因子能够改变带电粒子的统计。例如,如果原始的带电粒子是费米子,并且 $q\phi =$

超声波和超声场

刘藻

(承德石油高等专科学校)

声波是一种机械波。如果用频率来表征声波,并以人的感觉频率为分界线,可把声波划分为次声波($f < 20\text{Hz}$)可闻声波($20\text{Hz} \leq f \leq 20\text{kHz}$)及所谓超声波,它是指频率大于 20kHz 以上的声波。一般认为人耳所能听见频率的上限为 20kHz 。由于超声波的波长短,相同的振幅情况下,质点振动传递的能量就大得多,超声波在传播时就具有了与光传播时类似的特性,可以借助于光学的一些原理来研究它。计算表明,在液体中传播着超声波,其质点振动加速度的幅值可高达重力加速度的上百万倍!波长短的超声波的显著特征是方向性强,这样可用它采集信息,特别是材料内部的信息。因为超声波几乎能穿透任何材料。这对于某些其他辐射能量不能穿透的材料,超声波便显示出其独特的优越性。因之,超声波在工业、医疗等科技领域中有着重要的应用。

超声波不能在真空中传播,我们把充满超声波的介质所在空间称之超声场。产生超声波的探头,大多采用圆片状压电晶片,经电脉冲激发后辐射超声,在介质中形成超声场。

置于流体介质表面换能器的辐射,可以看作是一个带有障板的圆形活塞辐射,辐射面上各点作等振幅、等周相、垂直于表面的振动,只向半空间辐射,这种传播于介质中的超声波称

之活塞波。这个声源可认为是由无限多个发射子波的源所组成,每个子波源在声场中辐射球面波。整个辐射面在声场中某点产生的声压是所有子波源在该点产生声压干涉叠加的结果。该点的声压随与辐射面的距离、时间、方向而变化,并与介质密度和辐射面的特性有关。理论计算表明,在活塞辐射轴线方向,声场中声压振幅最大,其他方向声压振幅与轴线方向声压振幅之比与振动片的直径和超声波的波长有关,它决定着声场的指向性。其声场的空间结构如图 1 所示。其中白色的地方为声压高的地方,黑色的地方声压为零,在振动片附近的声场结构复杂。若定义主声束瓣和相邻付瓣间声压为零的那个方向与中心轴线间的夹角 θ' 为指向角,其值为 $\sin \theta' = \eta \lambda / a$, 式中 a 为振动晶片直径, λ 为超声波长, η 为常数,取决于声场边缘声压与轴线声压之比。

理论计算表明,在活塞波中心轴线上声压有若干极大和极小值,越靠近探头,声束轴线上



图 1 超声场的空间结构
(白色的地方为声压高的地方,黑色的地方声压为零。)

$(2n + 1)\pi$ (其中, n 为整数),则复合粒子服从玻色统计。1989 年,美国物理学家杰因等人为了了解分数量子霍尔效应提出了复合粒子理论。理论中的基本粒子,就是由电子加 m 个磁通量子组成的复合粒子。当 m 为偶数或奇数时,复合粒子分别为复合费米子和复合玻色子。在这里,我们看到了,通过束缚于电子上的磁通使电子的统计发生了蜕变。

如上所述,电子统计的“可变性”为我们展现出自然界中一幅幅丰富多彩的画面,诱使我们不断地开拓一块块未知领域。然而,电子统计的“可变性”,理论上并非电子所独有,更不是电子本身的属性发生了根本改变,那么,电子所表现出的这种统计的“可变性”,是否可以给我们更多的启示呢?