

1998年诺贝尔物理奖

林 晓 满

(北京轻工业学院 100037)

根据瑞典皇家科学院 10 月 13 日发布的消息,瑞典皇家科学院已决定把 1998 年诺贝尔物理奖授予三位在美国任教的科学家:斯坦福大学的美国人罗伯特·劳克林教授、哥伦比亚大学的德国人霍斯特·施特默教授和普林斯顿大学的美籍华人崔琦教授. 这三位研究者是由于他们发现强磁场中共同相互作用的电子能形成具有分数电子电荷的新型“粒子”而获此奖的.

1982 年,施特默和崔琦用极强的磁场和极低的温度在实验中做出了这项发现. 一年内,劳克林对他们的结果作出了成功的解释. 劳克林通过理论分析,证明了强磁场中的电子能够凝聚成一种与超导电性和液氦中出现的量子液体相关的量子液体. 这种量子液体对研究者是特别重要的,因为少许量子液体中发生的事件能更加深入地认识物质内部的一般结构和物质动力学. 因此,这三位获奖者的贡献导致了量子物理认识上的又一突破,它发展了现代物理学许多分支中重要的新理论概念.

变得可见的量子效应

早在 1879 年,一位名叫埃德温·霍尔的年轻学生发现了一种意外现象. 他发现若把一个薄片放进磁场并让其表面与磁场垂直,那么沿着金片流动的电流会在与电流和磁场两者都垂直的方向上引起电势降落,这种现象被称为霍尔效应(见图 1). 霍尔效应发生是由于在磁

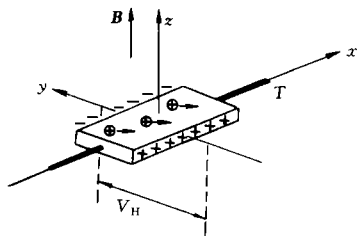


图 1 电压 V 产生沿 x 轴正方向的电流 I . 通常的欧姆电阻为 V/I . 沿 z 轴正方向的磁场使正电荷沿负 y 方向移动,这将在 y 方向产生霍尔电压 (V_H) 和霍尔电阻 (V_H/I).

场中运动的带电粒子(这里是电子)受到一种洛仑兹力的作用而作侧向偏转. 利用霍尔效应可以确定导体和半导体中载流子(负电子或正空穴)的浓度,它已成为世界各地物理实验室中的一种标准器具.

霍尔当时的实验是在室温和小于 1T (特斯拉)的中等磁场下完成的. 到了 20 世纪 70 年代末,研究人员已经常使用极低的温度 (-272°C 左右) 和很强的磁场(最大接近 30T) 进行实验. 他们用电子仪器厂为制造低噪声晶体管而使用的半导体来研究霍尔效应. 这种材料由不同性质的两部分组成,在它的内界面附近被捕获的电子沿这个界面具有高度的流动性.

在低温下,这一层界面上的电子就像只在一个平面上运动,也就是只在二维空间内运动,这一几何限制导致许多意外的效应. 其中之一就是霍尔效应改变了特性. 当人们测量霍尔电阻随外加磁场强度的变化时,这一点是显而易见的.

1980 年,德国物理学家克劳斯·冯·克利青在类似的实验中发现,霍尔电阻随磁感应强度的变化并不是线性而是“台阶式”的(见图 2). 出现台阶处的电阻值与材料的性质无关,而是由一个组合物理常数 h/e^2 除以某一整数 i 给出,我们说电阻是量子化的. 在量子化的霍尔电阻处,通常的欧姆电阻消失,从某种意义上说,材料已变成超导体.

克利青的这一发现被称为整数量子霍尔效应,他因此而获得 1985 年的诺贝尔物理奖. 尽管电子在磁场中表现得多么独特,只要人们承认量子物理规律,便可以理解这种效应. 简单地说,电子只能沿着确定的圆轨道运动,而轨道的基本大小则由磁场确定. 各式各样的台阶原来是说明有多少个最小轨道全部充满电子.

施特默、崔琦及其同事们在实验中采用更低的温度和更强的磁场对霍尔效应进行了细致的

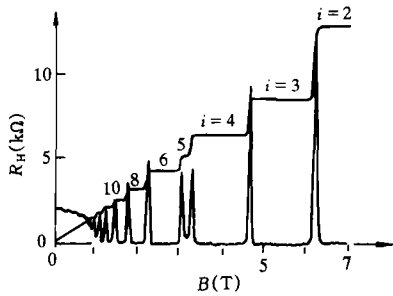


图2 霍尔电阻随磁场 B 的改变而作台阶式变化。台阶高度由物理常数 h/e^2 (其数值大约为 $25k\Omega$) 除以某一整数 i 给出。图中标出了 $i = 2, 3, 4, 5, 6, 8$ 和 10 的各个台阶。这个效应产生了电阻的新国际标准。1990 年以来用 1 克利青为单位来表示, 它定义为第四个台阶处的霍尔电阻 ($h/4e^2$)。下方的带尖曲线表示欧姆电阻, 它在每一个台阶处就都消失了。

研究。他们在霍尔电阻中发现了一个使他们非常惊奇的新台阶, 它的高度是克利青所发现的最大高度的三倍。随后, 他们又在整数的上面和整数之间都找到了越来越多的新台阶, 并且所有这些新台阶的高度都能表示为早先的同一常数 h/e^2 除以不同的分数。这些新发现被称为分数量子霍尔效应。对于不能解释如何发生这些新台阶的研究人员来说, 这是一极大的奥秘。

一种新型的量子液体

分数量子霍尔效应发现一年后, 劳克林提出了理论解释。按他的理论, 低温和强磁场迫使电子气凝聚成一种新型的量子液体。由于电子是最难以凝聚的(它们是费米子), 从某种意义上说, 它们首先要与磁场的“磁通量子”结合。对于施特默和崔琦发现的第一个台阶, 每个电子都捕获三个磁通量子组成一种不再反抗凝聚的复合粒子(它们变成了玻色子)。

量子液体早已出现在很低温度下的液氦中(1962 年诺贝尔奖授予朗道; 1978 年授予卡皮查; 1996 年授予戴维·李、奥谢罗夫和理查森)以及超导体中(1913 年诺贝尔奖授予昂内斯; 1972 年授予巴丁、库珀和施里弗; 1987 年授予贝德诺兹和缪勒)。量子液体有着一定的共性, 例如超流性。但是, 它们的特性也有着重要的差别, 如劳克林液体就是由复合粒子组成的。

劳克林提出的量子液体所具有的超流性解

释了在霍尔电阻台阶处欧姆电阻消失的现象。除此以外, 它还有许多不寻常的性质, 其中最值得注意的是: 如果增加一个电子, 液体就会被改变(被激发), 并且产生若干具有分数电荷的“准粒子”。这些准粒子并不是通常意义的粒子, 而是量子液体中大量电子共舞的结果。劳克林首先论证了准粒子正好具有用来解释施特默和崔琦的实验结果所符合的分数电荷。后来的测量结果验证了霍尔效应中越来越多的分数电荷台阶(见图 3), 而劳克林的量子液体都能解释实验上找到的所有台阶。

这种新量子液体强烈地反抗压缩, 也就是说它是不可压缩的。这是因为它是通过形成更多的准粒子来反抗压缩的, 而形成准粒子需要花费能量。

准粒子的直接验证

在 1982—1983 年间发现并解释的分数量子霍尔效应可以说是对新量子液体及其分数电荷准粒子的一种间接验证。最近, 有几个研究小组已经在直接观察这些新粒子方面取得了成功。例如, 在由个别准粒子通过回路而引起电流微小变化的实验中观察新粒子的工作已经在进行。测量这些微小变化量, 就好比下冰雹时辨别各颗雹子的声音及确定它们仅是自身正常大小的一小部分那样。由于 1998 年度这三位获奖者所做的开创性贡献, 借助于微电子学的惊人研究成果, 这类测量已成为可能, 而这些测量结果又可以看成是对他们这些发现的决定性检验。

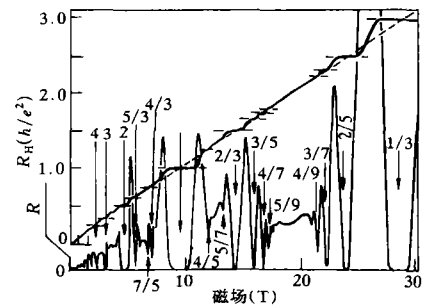


图3 对角的虚线表示经典霍尔电阻, 对角的台阶形实线表示实验结果。引起台阶的磁场用箭头标出。特别注明了施特默和崔琦在最高磁场处首先发现的台阶 ($1/3$) 以及冯·克利青早些时候在较弱的磁场中发现的台阶(整数)。