

量子霍尔效应的发展历程*

韩燕丽 刘树勇

(首都师范大学物理系 北京 100037)

摘要 量子霍尔效应的发现是新兴的低维凝聚态物理发展中的一件大事,分数量子霍尔效应的发现更是开创了一个研究多体现象的新时代,并将影响到物理学的很多分支.这个领域两次被授予诺贝尔物理学奖,引起了人们很大的兴趣.文章介绍了量子霍尔效应发展的历程.主要内容包括1897年霍尔发现霍尔效应,1980年 Klaus von Klitzing 发现整数量子霍尔效应,1982年崔琦和 Horst L. Stormer 发现分数量子霍尔效应和分数量子霍尔效应的实验验证等过程.

关键词 量子霍尔效应,准粒子,激发

THE QUANTUM HALL EFFECT

HAN Yan-Li LIU Shu-Yong

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037)

Abstract The discovery of the quantum Hall effect was great event in the development of low-dimension condensed matter physics. The discovery of the fractional quantum Hall effect has opened a new era of research into poly-body phenomena and will affect many branches of physics. Two Nobel prizes have been awarded in this field, which has aroused the interest of many people. The discovery of the Hall effect by Edwin Hall in 1897, the quantum Hall effect by Klaus von Klitzing in 1980, the fractional quantum Hall effect by Daniel Chee Tusi and Horst L. Stormer, and the experimental verification of the fractional quantum Hall effect are reviewed.

Key words quantum Hall effect, quasi-particle, excitation

量子霍尔效应的发现是新兴的低维凝聚态物理中的一个重大事件.在人工微结构材料之中,例如场效应中的反型层、半导体异质结等,薄层内电子被势垒限制在二维方向上运动,构成量子阱中的二维电子气.在二维电子气中发现了一系列特殊的性质,其中最重要的是量子霍尔效应,这也是国际学术界的研究热潮所在.我们在这篇文章中回顾一下它的发展历程.

1897年,24岁的霍尔(Edwin Herbert Hall, 1855—1938)是马里兰的约翰斯 Hopkins 大学的一名研究生.当时,还没有发现电子,也没有人知道金属中导电的机理.霍尔注意到著名的英国物理学家麦克斯韦和瑞典物理学家埃德隆(Erik Edlund)在一个问题上的分歧,在罗兰(H. A. Rowland)教授的支持下,他做了实验来验证磁场到底对导线中的电流有没有影响.他的实验是在室温和一般磁场的条件下做的,他发现了霍尔效应.当电流通过一个放在与电流方向垂直的磁场中的导体薄膜时,在电流和磁场方向的垂直方向上出现一个电压——霍尔电压,这个霍尔电压正比于磁场的强度.霍尔效应提供了

一个简单的办法在实验中去测量各种材料中电荷载流子的密度.霍尔的发现在当时震动了科学界,许多科学家转向了这一领域.不久,就发现了埃廷斯豪森(Ettingshausen)效应、能斯特(Nernst)效应、里吉-勒迪克(Righi-Leduc)效应和不等位电势差等四个伴生效应.后来,人们在半导体材料中也发现了霍尔效应,因此,霍尔效应也成为测量半导体是电子型还是空穴型的标准办法.

我们现在所称的整数量子霍尔效应(IQHE)是1980年由 Klaus von Klitzing 等人从金属-氧化物-半导体场效应晶体管的氧化物表面上发现的.1985年的诺贝尔物理学奖也因这个发现而授予 Klaus von Klitzing.1974年, Tsuheyu Ando 和 Englert 等人就从理论上提出:对于二维电子气,当其费米能级处于朗道能级之间时,在所对应的栅极电压的某一范围内,样品的电阻水平分量可以为零,霍尔电阻可以出现台阶现象. Klaus von Klitzing 和他的同伴根据

* 1999-12-08 收到初稿,2000-01-20 修回

这个思想开展霍尔效应的工作,他们研究场效应管的半导体氧化物界面上二维电子气在低温(约几 K)和强磁场(大于 10 T)下的物理性质,发现,霍尔电阻的线形规律被打破了,电阻出现阶梯状的增长,电阻值非常接近于 $h/e^2 f$, f 在这儿称做填充因子, f 是一个整数, e 是一个电子的电荷, h 是普朗克恒量, f 由电子的密度和磁通密度来决定. 整数量子霍尔效应的事实十分令人意外,但它与载流子在二维电子态中的分布有关,这是确定无疑的. 紧接着,1981 年,美国贝尔实验室的崔琦等改用调制掺杂的 $\text{GaAs Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 异质结量子阱,很快就实现了 von Klitzing 实验的翻版,得到了更完美的曲线,支持了 von Klitzing 的实验结果. 这两个实验在半导体电子本性的历史上具有重要的意义. 为了解释这一点,在 IQHE 方面,曾有过好几个有影响的结果,较为让人接受的是 Robert B. Laughlin(那时在劳伦斯利弗莫尔国家实验室,现在是斯坦福大学的教授)在 1981 年提出的模型. 整数量子霍尔效应实验测量的精确度达 10^{-9} 量级,所以 1990 年后,国际绝对电阻标准改为由整数量子霍尔效应来定义. 另外,我们还可以据此来测定量子电动力学中具有特别重要意义的精细结构常数 $e^2/h = 258128$.

量子霍尔效应的另一个重要的进展是崔琦 (Daniel Chee Tsui, 当时在普林斯顿大学) 和 Horst L. Stormer(在贝尔实验室工作了 20 年后 1998 年进入哥伦比亚大学) 发现了分数量子霍尔效应. 这一发现使得崔琦和 Horst L. Stormer 以及后来对这一现象做出解释的 Robert B. Laughlin 获得了 1998 年的诺贝尔物理学奖. 1982 年,崔琦在新泽西的默里山的贝尔实验室用半导体 GaAs 做量子霍尔效应的实验,他用了更低的温度和更强的磁场. 他们建立了一个独立的实验环境,用一个量子阱去限制电子成为二维电子气:这是将两种不同的半导体材料夹在一起,一面是 GaAs,另一面是 GaAlAs,这样电子被限制在两种材料的接触面上. 下一步,研究人员将电子阱的温度降至绝对温度的 0.1 度,磁场加到几乎 30 T(是地球磁场的 100 万倍),使他们惊奇的是,崔琦和 Horst L. Stormer 发现霍尔电阻下一级台阶是 von Klitzing 的最高记录的 3 倍. 后来,崔琦和 Stormer 又发现了更多的台阶,即量子霍尔效应平台不仅在 f 为整数时被观察到,而且也出现在 f 为一些具有奇分母的分数的情况下,如 $f=1/3, 2/5$ 等等,因此称为分数量子霍尔效应(FQHE).

崔琦 1939 年生于中国的河南,1958 年到美国

伊诺斯州的 Augustana 学院学习,于 1961 年毕业,并获得了 Phi Beta Kappa 荣誉. 1967 年,获得芝加哥大学博士学位,并留校做博士后,一年后,他进入贝尔实验室. 崔琦 1982 年成为普林斯顿的教职员,并被选为国家科学院的成员,同时也成为美国科学发展组织的成员、美国物理学会成员,1984 年获得美国物理学会的 Oliver Buckley 凝聚态物质物理奖,1997 年他又获得 Benjamin Franklin 物理奖章. 崔琦现在在普林斯顿和他的妻子生活在一起,他是普林斯顿第 29 个诺贝尔奖获得者,第 18 个诺贝尔物理学奖获得者.

FQHE 这一新的实验给理论物理学家带来了难题,它不能用当时的理论来解释. 整数量子霍尔效应展现给人们一个全新的宏观量子现象,不过它的理论解释可以纳入已成熟的固体理论. 然而对于分数量子霍尔效应,则必须考虑电子间的相互作用. 否则,电子都处于最低的朗道能级,具有相同的能量,不可能发生 FQHE,因此 FQHE 是一种低维电子系统的强关联效应. 除了一维系统外,要想严格求解这种系统是很难的,比较可行的办法是设法找到系统的基态波函数,然后研究在此基础上的低能激发. Robert B. Laughlin 1983 年对自己的模型作了修正,以后他又发展了 FQHE 的理论解释. Laughlin 对于 FQHE 的重要贡献在于他发现了 $f=1/m$ 分数量子霍尔系统的与严格基态波函数非常接近的近似基态波函数,并从多电子系统基态波函数一般物理要求出发,写下了基态波函数的形式. 这个函数被称为 Laughlin 波函数. Laughlin 得到这种波函数是受到 ^4He 理论的启发,也涉及相关的多粒子的波函数 (Jastrow 波函数). 在用波函数计算他提出的基态的能量时,Laughlin 又引入等离子态的类比,他发现 FQHE 的电子间的相互作用类似于一种经典粒子的等离子态与对数势间的相互作用. 支持 Laughlin 的 Duncan Haldane 和他的同伴作了准确的计算. Laughlin 认为当元素从基态激发时,会产生涡列,像我们从系统里拿走一个整数电荷,会留下 m 个漩涡的准粒子,且每一个准粒子携有整数电荷的 $1/m$. $f=1/m$ 的量子态代表多电子基态,电子的位置是不固定的,这种量子态是一种新的量子流体,这种量子流体就叫做量子霍尔液体,是一种不可压缩的流体. 电子间的库仑相互作用为这种不可压缩性提供能隙.

对 FQHE 的验证是验证:(1) 在激发谱线中存在能隙;(2) 能获得带有分数电荷的准粒子. 对于准

粒子的激发,能隙 Δ 的值能从欧姆电阻对温度的依赖性中获得. 以下几个小组做了早期的实验: 日本的 Hiroyaki Sakaki 小组、德国的 Klaus von Klitzing 小组和贝尔实验室小组. 他们的实验结果只和理论有定性的相似, 这是因为样品不是足够的纯, 不规则性会阻碍 FQHE 的产生. 1989 年, 贝尔实验室的 R. L. Willett, J. H. English 和 Stormer、崔琦、A. C. Gossard 合作, 成功地得到了好的样品, 并测得 Δ 的实验值. 除准粒子激发外, 新的量子流体在密度涨落的形式下还存在集体激发. 印第安纳大学的 Steven Girvin、Allan MacDonald 和贝尔实验室的 Philip Platzman 通过和 Feynman 的超流 He 理论的类比, 发展了这种集体激发的理论. 这个理论以 Laughlin 的基态描述为基础, 预言了在激发谱中有一个有限的能隙. 这个能隙的值在 1993 年被 Aron Dinczuk 和他在贝尔实验室的同事们测量到. 根据理论, 随着 m 的增加量的减少, 能隙将消失在 $m = 7$ 或 9 处, 电子实产生, 这种相变在实验中被观测到. FQHE 第二个验证被三个小组用两种方法获得成功: 纽约州立大学的 Vladimir Goldman, B. Su 在 1995 年通过测量谐振的隧道流的方法得到了带有 $1/3$ 电荷的准粒子; 以色列韦茨曼科学研究所的 Mordehai Heiblum 和法国原子能委员会的 Christian Glattli 两个小组在 1997 年通过测量隧道流的散粒效应也获得了成功.

在很多情况下, 对 FQHE 的理解采用另一种不耗散的超流体作类比, 例如 Helium, 这是一种由玻色子组成的液体, 并通过玻色-爱因斯坦凝聚成为一种肉眼可见的超流液体, 而电子和准粒子在 FQHE 中是费米子. Laughlin 认为, 这是因为极强的外磁场强迫奇数个单位磁通量子与电子复合成为玻色子, 复合玻色子在接近零度时发生玻色-爱因斯坦凝聚, 形成量子霍尔液体. 由于复合玻色子由电子和磁通组成, 这种量子的准粒子激发就具有很奇特

的性质. Laughlin 指出这种准粒子带有分数个电子电荷, 满足分数统计. 后来, 人们又发展了从费米-狄拉克到玻色-爱因斯坦统计的二元性玻色子 (boson) 图景, FQHE 的理论被 Girvin 和 MacDonald 公式化. 在这个二元性图景中, 人们对 Laughlin 的波函数和对 FQHE 有了一个很好的了解, 在某种意义上说, 已经抓住了物理的本质.

FQHE 无论在实验上还是在理论上在今天都是很活跃的领域. 1989 年, 人们又发现了“偶分母”的量子霍尔效应, 这进一步说明电子在强磁场中的丰富的物理效应. 最近几年里, 人们新的兴趣集中在分数量子霍尔器件上, 接着电子在量子霍尔磁场中的自旋又成为研究领域的主题. 分数量子霍尔效应开创一个新的研究多体现象的新时代, 将影响到物理的很多分支. 分数量子霍尔效应的发现和 Laughlin 波函数的提出开创了凝聚态物理强相关系统研究的一个崭新领域. 在以后的年代里, 一个个激动人心的新实验发现和理论进展不仅把 FQHE 的研究发展成为凝聚态物理的主流领域, 而且也现代物理许多分支中的新理论发展起了借鉴作用.

参 考 文 献

- [1] Daviss B. New Scientist, 1998, 31 :36
- [2] Anderson P W. Phys. Today, 1997(10) :42
- [3] MacDonald A H. Science, 1995, 17 :977
- [4] Kivelson S, Lee D H, Zhang S C. Scientific American, 1996, 3 : 64
- [5] 中国科学院. 科学发展报告. 北京: 科学出版社, 1999. 52 [CAS. Reports of the Progresses in Science. Beijing: Science Press, 1999. 52(in Chinese)]
- [6] Tusi D C, Stormer H L, Gossard A C. Phys. Rev. Lett., 1982, 48 :1559
- [7] Von Klitzing K, Dorda G, Popper M. Phys. Rev. Lett., 1980, 45 :494
- [8] Laughlin R B. Phys. Rev. Lett., 1983, 50 :1395