

纳米线中 Majorana 费米子的证据¹⁾

在 2012 年 6 月出版的 *Physics Today* 杂志上,资深编辑 Mark Wilson 撰文回顾了凝聚态体系中探索 Majorana 费米子的历程,其中特别介绍了荷兰 Delft 理工大学的 Leo Kouwenhoven 研究组最近在 InSb 纳米线中发现 Majorana 费米子踪迹的实验.现摘译如下:

没有人知道 Majorana 粒子是否真正存在.这类费米子是其本身的反粒子,不可思议地没有质量、没有电荷、没有自旋,并且处于零能量态,就像后来 Kouwenhoven 的同事 Sergey Frolov 在其博客中描述的:“比任何东西都更虚无缥缈”.1937 年,当意大利理论粒子物理学家 Ettore Majorana 把复数形式的 Dirac 方程写成实数形式,并得到了对应于这种奇异粒子的解后²⁾,他猜想中微子就是这样一类粒子.然而,这一猜想至今仍然是粒子物理领域悬而未决的重要问题.

即使 Majorana 费米子不以基本粒子的形式出现在这个世界上,人们仍可能在凝聚态体系中以集体运动模式的准粒子激发形式将其制备出来.超导体就是一个产生 Majorana 费米子的理想母体,因为伴随着 Cooper 对的凝聚,费米面上的电荷激发和作为其反粒子的空穴激发是等同的.过去几年中,这方面已经有过一些可能与 Majorana 费米子有关的实验报道,比如拓扑绝缘体表面的超导电极之间的 Josephson 效应,但这些结果尚不能归结为来自于单个 Majorana 费米子的信号.最近,荷兰 Delft 理工大学的 Kouwenhoven 研究组通过把电子注入到充满 Cooper 对的 InSb 纳米线中,看到了零偏压电导峰.这或许是迄今关于 Majorana 费米子最强的实验证据.

Majorana 费米子之所以激起人们的热情,很大程度上是由于人们有望借助它来构筑拓扑量子计算机.束缚在超导体量子磁通芯内外或者超导纳米线两端的每个 Majorana 粒子实际上只是半个费米子. Majorana 费米子总是成对出现,其整体状态可以被用于定义一个量子比特.而两个粒子在空间上的分离又保护了这种量子态不受每个粒子局部环境扰动的影响.此外,与通常的费米子和玻色子不同, Majorana 费米子服从非阿贝尔分数量子统计,借此可以实现拓扑量子计算³⁾.

在上世纪 90 年代,Grigori Volovik 意识到,为了得到能容纳 Majorana 粒子的零能量模,必须抑制零点振动能.这一点无法在常规的 s 波超导体中得到满足,必须借助由相同自旋的电子配对而成的 p 波超导体. Sr_2RuO_4 很可能就是 p 波超导体,但怎样用其开展实验,还没有解决方案.2008 年,宾州大学的傅亮和 Charles Kane 意识到,可以利用 s 波超导体与强自旋-轨道耦合材料之间的邻近效应,在两者的界面附近人工制备出 p 波超导体.强自旋-轨道耦合赋予了电子轨道波函数一个 Berry 位相,使得感应出的超导电性具有 p 波超导的特征.由于拓扑绝缘体是一种强自旋-轨道耦合材料,傅亮和 Charles Kane 预言,在其二维表面的邻近效应超导区的量子磁通芯中,就存在着 Majorana 费米子.2010 年,马里兰大学的 Sankar Das Sarma 等人意识到,借助超导邻近效应,在具有强

自旋-轨道耦合的半导体中也同样会出现 Majorana 费米子,只不过这种情况下还需要额外加一个磁场,以去除粒子的自旋自由度.同一年晚些时候, Das Sarma 研究组和以色列魏兹曼研究所的 Yuval Oreg 研究组分别给出了更为具体的预言:在平行于纳米线的磁场中,因邻近效应而超导的 InAs 或 InSb 纳米线的两端会存在一对 Majorana 费米子,导致零能量处电子态密度峰的出现.

这一简洁的实验方案正中 Kouwenhoven 的下怀,因为几年前他的研究组就已经研究过 InAs 纳米线与超导体界面上的超流问题.这次他们重拾实验,一方面用 NbTiN 超导电极在 InSb 纳米线中感应出超导电性,另一方面用电极调控纳米线中电子的浓度和与外界耦合的势垒高度,然后测量纳米线端点处电子的态密度.在加磁场抑制了自旋自由度、又尚未破坏超导电性的时候,他们确实观察到了能隙中央的零偏压电导峰(见图 1).

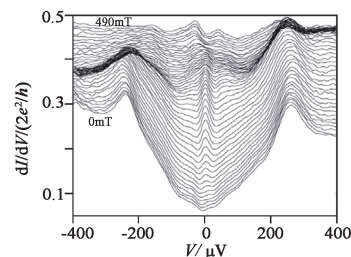


图 1 InSb 纳米线端点的微分电导随偏置电压的变化关系.不同的曲线代表不同强度的平行磁场下的测量结果.在一定的磁场范围内,在能隙中央出现了零偏压电导峰,支持纳米线中出现 Majorana 费米子的物理图像

这一电导峰能作为 Majorana 费米子的证据吗? Kouwenhoven 承认, Kondo 效应、反弱局域化、无反射隧穿等其他机制也可能导致出现零偏压电导峰.通过分析,他们排除了这些可能性.但并不是每个人都信服他们的观点.哈佛大学的 Charles Marcus 指出:“尽管并不是不可能,但想用实验证明一个想法的正确性是很困难的,要比否定一个想法难得多.所以,对于这一重要实验结果自然会有一系列理论和实验工作的跟进.这仅仅是一个开始,今后会有更多结果涌现出来”.

(中国科学院物理研究所 吕力 编译自 Mark Wilson, *Physics Today*, 2012, (6):14, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)

1) 在 Kouwenhoven 研究组 2012 年 4 月 12 日发表于 *Science* 的文章中,标题和摘要分别用了“signatures”和“hypothesis”,文中用到了“evidence”一词.——译者注

2) Majorana 一生文章不多.据说这一结果是 Fermi 在征得 Majorana 的同意后,以 Majorana 的名义写成文章发表的.参见 Antonino Zichichi 写的传记“Ettore Majorana: Genius and Mystery”, http://www.ccsem.infn.it/em/EM_genius_and_mystery.pdf.——译者注

3) 通过对多个 Majorana 费米子在空间位置上的交换操作,可以在其简并基态子空间内的酉变换,从而实现拓扑量子计算.拓扑量子计算是一种原则上不出误码的量子计算方案.——译者注