

中国科学院物理研究所 N04组供稿  
北京凝聚态物理国家研究中心

第81期

2019年12月13日

## 铁基超导体中马约拉纳电导的近量子化平台

马约拉纳费米子是由物理学家埃托雷·马约拉纳 (Ettore Majorana) 预言的一种基本粒子，其具有电中性且反粒子是自身。在凝聚态物理的材料体系中，被拓扑缺陷上束缚的马约拉纳准粒子，其产生湮灭算符满足自共轭关系，通常呈现出零能电导信号，被称为马约拉纳零能模。理论证明，马约拉纳零能模满足非阿贝尔任意子统计规律，是实现容错拓扑量子计算的主要路径之一。

过去的几年里，中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心、中国科学院大学(国科大)高鸿钧研究团队与丁洪研究团队合作，利用自主设计组装的国际顶尖水平的极低温强磁场扫描隧道显微镜/谱 (STM/S) 联合系统精确测量了 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 单晶样品的超导涡旋，得到了铁基超导中的马约拉纳零能模的实验证据 (D. Wang *et al.*, *Science* **362**, 333 (2018))。随后，他们针对马约拉纳零能模只在部分磁通涡旋中存在这一问题，对铁基超导中的马约拉纳零能模进一步研究，发现 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 单晶样品表面同时存在两种不同类型的磁通涡旋，根据马约拉纳零能模的存在与否，磁通涡旋束缚态的量子化能级序列存在半整数位的嬗移。他们给出了 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 样品表面马约拉纳零能模存在的微观物理机制，澄清了马约拉纳零能模的拓扑本质 (L. Kong *et al.*, *Nature Physics* **15**, 1181 (2019))。

已有的实验通过研究零能模的波函数、准粒子中毒 (*Science* 2018) 以及全局束缚态的能级序列 (*Nature Physics* 2019) 提供了马约拉纳零能模存在的大量实验证据，也解释了马约拉纳零能模存在的微观物理机制，但是先前的实验并未对马约拉纳零能模的本质特征 (电子空穴等价性) 做出直接观测。在新奇物理现象丰富的凝聚态材料中，仍需要更强的实验证据证明零能模信号来源于马约拉纳准粒子，尤其是对其电导行为的实验观测。对于一般超导体，一个入射的电子会产生一个反射的空穴，这一过程称为Andreev反射，其电导是与隧道结大小有关的任意值。然而得益于马约拉纳准粒子的电子/空穴组成等价混合，在马约拉纳零能模上发生的Andreev反射的电子与空穴隧穿概率本征相等，从而导致了马约拉纳对称性保护的电子-空穴共振隧穿条件，其电导是与隧道结大小无关的量子化值 ( $2e^2/h$ )。这一马约拉纳零能模参与的共振Andreev反射可以看作是半导体中等价双势垒共振隧穿的“超导版本”。在实验上可以通过连续改变测量极与马约拉纳零能模之间的隧道结大小的方法，观测到独特的 $2e^2/h$ -量子化的马约拉纳电导平台特征。该特征是马约拉纳零能模电子空穴等价性的直接表现，也是马约拉纳零能模存在的关键性实验证据。

最近，高鸿钧院士研究团队与丁洪研究员团队进一步合作，利用其极低温强磁场STM/S联合系统，开展了相关研究。他们通过连续可控改变针尖与 $\text{FeTe}_{0.55}\text{Se}_{0.45}$ 单晶样品之间的隧穿耦合强度，观测到了马约拉纳零能模的近量子化电导平台特征 (图一)。大量的实验观测表明，该电导平台特征是受到马约拉纳本征电子/空穴对称性保护的马约拉纳零能模所特有的，其他非零能磁通涡旋束缚态并不存在这种电导平台特征 (图二)。通过设计严谨的对照实验，研究团队测量了零磁场超导谱随隧穿耦合强度的变化，超导能隙内外的隧穿电导均呈现平庸的单调增长行为，这排除了量子化弹道输运产生电导平台的可能性。通过对磁通涡旋统计分析，他们发现了平台电导值近量子化的分布规律，并进一步分析了可能导致平台电导值小于量子化电导 $2e^2/h$ 的影响因素，系统能量展宽和准粒子中毒效应 (图三)。整个测量过程保证了样品与针尖状态不会发生改变，测量过程可重复。证明了平台电导特征在马约拉纳零能模中普遍存在。

这项研究工作利用STM/S技术，观测到了磁通涡旋中马约拉纳零能模的近量子化电导平台特征，给出了铁基超导体中存在马约拉纳零能模的关键性实验证据，为研究马约拉纳零能模和推动未来拓扑量子计算起到了重要的推动作用。相关研究结果于11月12日在*Science*杂志在线发表。中科院物理所、国科大博士生朱诗雨、孔令元、曹路和陈辉博士为共同第一作者，张余洋 (国

科大)、丁洪、高鸿钧为共同通讯作者。美国布鲁克海文国家实验室顾根大研究员提供了高质量的单晶样品,麻省理工学院傅亮教授提供了理论支持。该工作得到了科技部(2015CB921000, 2015CB921300, 2016YFA0202300),国家自然科学基金委(11234014, 61888102),和中国科学院(XDB28000000, XDB07000000, 112111KYSB20160061)的支持。

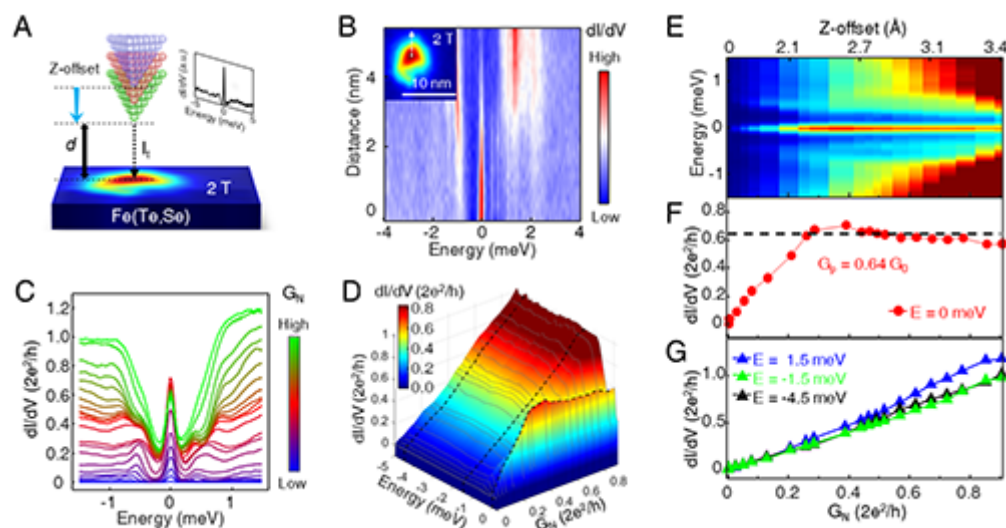
延伸阅读:

[http://www.iop.cas.cn/xwzx/kydt/201808/t20180817\\_5056877.html](http://www.iop.cas.cn/xwzx/kydt/201808/t20180817_5056877.html)

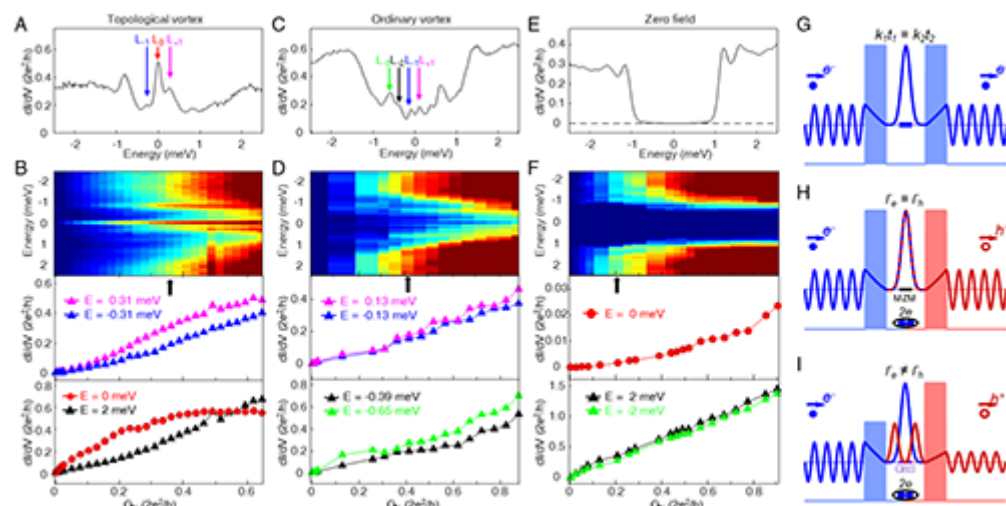
[http://www.iop.cas.cn/xwzx/kydt/201908/t20190821\\_5367346.html](http://www.iop.cas.cn/xwzx/kydt/201908/t20190821_5367346.html)

文章链接:

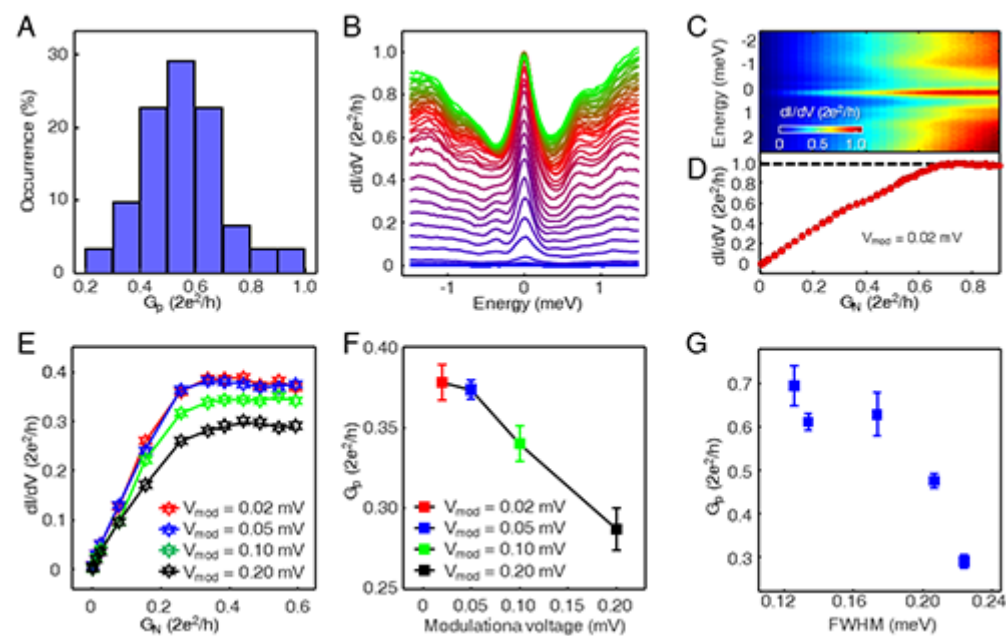
<https://science.sciencemag.org/content/early/2019/12/11/science.aax0274>



图一, FeTe<sub>0.55</sub>Se<sub>0.45</sub>表面磁通涡旋中的零能电导平台



图二, 马约拉纳零能模的Andreev共振反射。



图三, 马约拉纳平台电导值的变化规律。

[science.aax0274\(2019\).pdf](#)



版权所有 © 2015-2020 中国科学院物理研究所 京ICP备05002789号 京公网安备1101080082号 主办：中国科学院物理研究所 北京中关村南三街8号 100190