

科学家首次观测到三维量子霍尔效应----中国科学院

2019-05-15 来源：中国科学技术大学

【字体：大 中 小】

语音播报

从20世纪80年代初在二维电子体系中被发现至今，量子霍尔效应作为超导之外的另一个著名宏观量子现象在凝聚态物理中催生出了一个越趋活跃的研究领域。其内在本质，是将数学中的拓扑概念引入物理，超越了Landau根据对称性破缺理论对物质分类的传统标准，为近年的拓扑物态与拓扑材料的快速发展奠定了基础。

量子霍尔效应是否只存在于二维体系？这个基础问题从二维量子霍尔效应发现后不久即引起领域的关注。早在1987年，Bertrand Halperin从理论上就预言了三维量子霍尔效应的存在和它的测量特征。但要验证这个新奇效应，对材料体系与测量手段的要求都非常高；尽管已有诸多尝试，实验上仍缺乏可信的观测证据。

中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家研究中心国际功能材料量子设计中心（ICQD）和物理系教授乔振华与南方科技大学教授张立源、新加坡科技设计大学教授杨声远、美国佛罗里达州立大学教授杨昆、麻省理工学院教授Patrick A. Lee以及布鲁海文国家实验室教授Genda Gu等进行理论与实验合作，在碲化锆（ $ZrTe_5$ ）块体单晶体材料中首次观测到三维量子霍尔效应的明确证据，并指出该效应可能是由于磁场下相互作用产生的电荷密度波诱导的。这一研究成果5月9日在线发表在国际学术期刊《自然》上。

在层状碲化锆材料中，垂直磁场的出现使得体内电子在垂直磁场的平面中形成朗道能级，如图1正上方的圆圈所示；而在侧边界，存在手性传输的电流。在垂直磁场的平面内，边界电子形成单向传输的边缘态，如图1最上层的侧边所示。产生该效应的关键是电子之间的关联作用导致电荷密度波的形成。无论二维还是三维量子霍尔效应，系统的体相都必须是绝缘的。对于三维体系，由于沿着磁场方向的电子运动不受磁场影响，一个初始的金属态在弱电子关联效应下是无法变成绝缘体的。而当系统进入仅有一个Landau能级被占据的量子极限区域，电子之间的关联效应大大增强，导致费米面的不稳定。其结果是形成了一种奇特的量子态—电荷密度波，即电子的密度沿着磁场方向以一定的周期振荡，整个体系转化为三维量子霍尔绝缘体。

碲化锆是一种各向异性较强的三维层状材料，如图2（a）所示。碲原子和锆原子沿着x方向形成一维原子链，该原子链沿着y方向堆叠为一层，xy面内的原子层再沿着z方向堆叠成为体材料。费米面的形状尽管存在各向异性，但还是一个封闭的椭球面，如图2（b）所示，所以整个体系仍为三维系统。

当沿着z方向施加磁场时，该研究团队在实验上观测到一系列电阻振荡。尤其重要的是，当体系进入量子极限区域时，纵向电阻为零，而霍尔电阻的数值和z方向的费米波矢相关联，如图2（c）所示。这一奇特行为，与Halperin在1987年预言的三维量子霍尔效应的特征完全一致。

综上所述，这一工作终于将经历了30余年等待的三维量子霍尔效应这一预言展现于世人面前。在这个效应中，由于维度的不同，现象背后的微观物理机制也展现其新颖与诱人的方面。该发现有望为未来的凝聚态物理的发展注入新的活力。

张立源、乔振华和杨声远为论文的共同通讯作者；南方科技大学博士生汤方栋和中国科大物理系博士生任亚飞为共同第一作者。

上述研究得到国家自然科学基金委、科技部、中组部、中科院和安徽省的资助。

图1：三维量子霍尔效应及电荷密度波示意图。由于磁场效应，体内电子在面内的运动形成朗道能级，如上方圆圈所示。在仅有一个Landau能级被占据的量子极限下，更强的电子关联效应导致电荷密度波的形成，并进而使得体系转化为三维量子霍尔绝缘体。

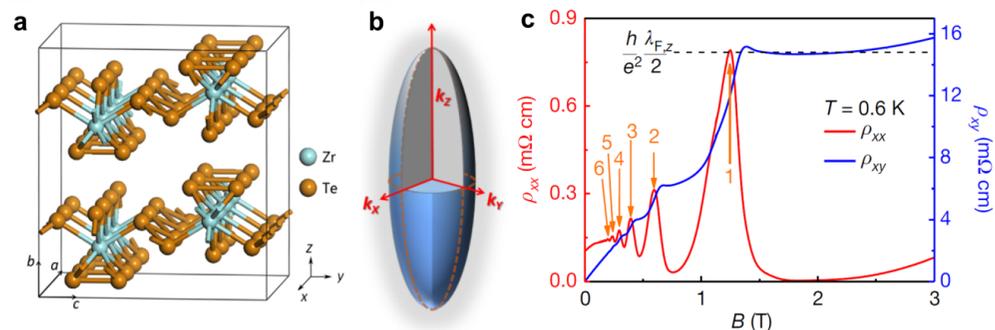


图2：a: ZrTe5的晶格结构。b: 实验测量的费米面形状。该费米面是封闭的，表征该电子体系的三维特性。c: 三维量子霍尔现象。

更多分享