

李源课题组与合作者在三维反铁磁材料中观测到拓扑自旋波

日期：2018-07-23 信息来源：量子材料科学中心

自从十多年前拓扑绝缘体的发现以来，能带拓扑在凝聚态物理的研究中一直受到高度的关注。这一概念发展到今天，已经涵盖了各种电子和非电子的体系，后者包括了人工材料中的电磁波和机械波。这些具有拓扑性质的经典波动，加深了人们对能带拓扑的理解，并产生了广泛的应用前景。然而，它们在实际晶体材料中的对应物，即具有拓扑性质的玻色型元激发，除了少数仅有的几个例子之外，还未被充分地研究。其中的部分困难来自于固体散射谱学实验，这些实验是人们用于探测晶体中玻色型元激发的最有效手段，但它们对材料体系和样品质量等都有很高的要求。

在过去的一段时间里，量子材料科学中心的李源课题组与中科院物理所的方辰课题组合作，致力于推动使用中子散射谱学技术来研究玻色型元激发的能带拓扑。他们进行了理论研究并发展了有关的实验和分析方法，并主要针对实际晶体材料中的玻色型“拓扑半金属”式的能带结构开展了工作。相比起玻色型的“拓扑绝缘体”“拓扑半金属”在体能带结构中就已经具有和拓扑属性直接相关的实验可观测量，例如在所有动量方向上都呈现线性色散的能带交点或结点线式的局部能带结构。这对于中子散射实验而言非常重要，因为体能带结构正是中子散射最擅长探测的物理对象。

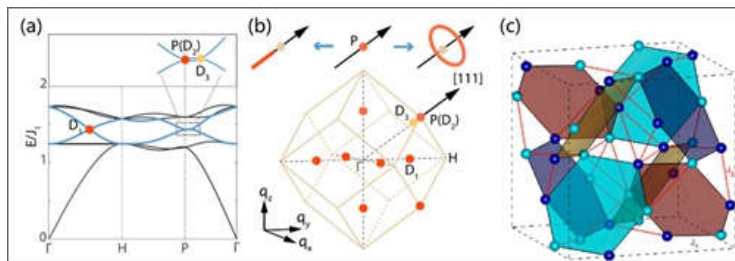


图1：（a）基于J1-J2模型的自旋波色散（b）布里渊区以及布里渊区中的狄拉克点，同时展示了U(1)对称性移除后狄拉克点演化为结线的过程（c）材料中Cu²⁺离子J1-J2交换网络。

李源和合作者们重点关注了Cu₃TeO₆这种材料，它的每个原胞内有12个磁性的Cu²⁺离子。在61K以下，Cu₃TeO₆成为反铁磁体，原胞中6个Cu²⁺离子磁矩方向大致平行，而另外6个Cu²⁺离子与它们反向。利用线性自旋波理论，研究团队发现Cu₃TeO₆中的自旋波具有线性的能带交叠，而进一步的分析表明这种能带交叠具有拓扑性质：它们带有整数形式的拓扑电荷，该属性不依赖于模型的细节，只和体系的对称性有关。具体而言，只要材料中具有磁性材料里最常见的PT对称性（时间反演和空间反演），那么自旋波的线性能带交叠就有可能存在。如果体系同时具有全局的自旋旋转U(1)对称性，拓扑能带交叠将具有狄拉克点的形式（图1a），而如果不具有U(1)对称性，则狄拉克点将退化为更一般的结点线（图1b）。这两类拓扑能带交叠的方式都是新的——此前它们都没有在具体的材料中被预言出来。此外，Cu₃TeO₆具有很高的晶体对称性（第206号空间群，图1c），由此保证了在U(1)对称性存在的前提下，布里渊区P点位置的自旋波总是狄拉克点，因而特别有利于实验的观测。这些理论结果于2017年12月在《物理评论快报》上发表，李源课题组的黎晨远和李源分别是共同第一作者和通讯作者。

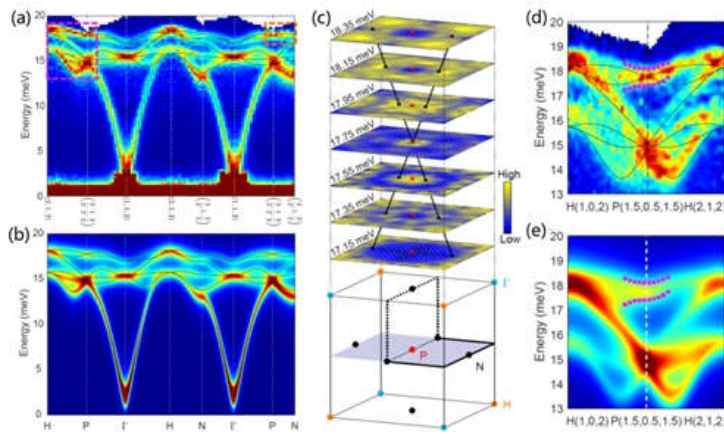


图2: (a和b) 沿着图1 (b) 高对称路径的实验和计算的自旋波信号强度图, 布里渊区中心是(1, 1, 2) (c) 布里渊区P点的狄拉克锥型色散 (d和e) a和b虚线框中自旋波的细节, 虚线包络表明了P点的狄拉克锥型色散。

为了在实验上研究上述自旋波的拓扑能带, 研究团队又对Cu₃TeO₆晶体阵列样品进行了非弹性中子散射实验。在实验中, 他们观测到了四维空间中清晰的自旋波信号。为了将实验结果和理论计算进行对照, 他们对材料中的磁交换相互作用进行了细致的建模, 发现Cu²⁺离子之间最主要的磁交换作用存在于最近邻、以及第九近邻的离子对之间, 前者是由于距离近, 而后者则是由于离子之间相对笔直的交换路径。从图2a和b可以看到实验和计算结果符合得相当好: 数据不仅表明在布里渊区的P点存在狄拉克锥型的色散(图2c), 而且散射信号的强度与计算也几乎是一致的(图2d和e)。散射信号的强度反映了动力学结构因子S(Q, ω), 其中包含了自旋波波函数的重要信息, 所以实验和理论的一致性可以认为是材料中自旋波拓扑属性的直接验证。

李源和合作者的上述发现丰富了人们对玻色型拓扑能带的理解, 将拓扑能带推广到了具有自旋波激发的一大类反铁磁材料中。非弹性中子散射能够直接探测四维的色散关系以及背后的准粒子波函数, 这些可用于研究拓扑能带结构的技术优势也在实验中得到了很好的体现。自旋波的能带拓扑也会带来其他实验中的可观测量, 这些效应在将来的研究工作中有可能被观察到。

上述实验结果近期在线发表于《自然-物理》杂志。工作得到了国家自然科学基金、科技部、中国科学院战略重点研究项目等多个基金的支持。中子散射实验在日本大型质子加速设施完成。李源课题组的学生姚伟良、黎晨远、王立晨、薛尚捷、淡洋参与了此项工作。

相关链接: <https://mp.weixin.qq.com/s/5uBP37jWBDSSMvhZjNv5SQ>

编辑: 凌薇

北京大学官方微博



北京大学新闻网



北京大学官方微信



[打印页面] [关闭页面]

转载本网文章请注明出处

友情链接

合作伙伴

