

三维拓扑磁振子在真实材料体系中的实现*

鲍嵩 李建新 温锦生[†]

(南京大学物理学院 固体微结构物理国家重点实验室 人工微结构科学与技术协同创新中心 南京 210093)

2018-07-09收到

[†] email: jwen@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20180907

将“拓扑”这一数学概念引入物理学后，一方面推动了基础物理学研究的发展，另外一方面也促使了大量新颖拓扑量子材料的出现，例如石墨烯^[1]、拓扑绝缘体^[2]、三维狄拉克半金属以及外尔半金属^[3]等，极大地丰富了材料科学，为低耗散、更稳定的下一代电子器件的发展奠定了材料基础。

在这类拓扑材料中，系统的对称性在拓扑电子能带的形成中发挥着极为重要的作用。例如在石墨烯或者三维的狄拉克半金属材料中，系统受到空间以及时间反演对称性的保护，使得两条二重简并的电子能带在费米面附近线性相交于一点^[4]。靠近该四重简并点的准粒子激发可以用狄拉克方程来描述，如图1(a)所示，对应着高能物理中的狄拉克费米子，而线性能带交点也因此被称为狄拉克点。

在凝聚态里面，如果破坏了狄拉克系统中空间或时间反演对称性中的任意一个，可以实现外尔态^[5]。拓扑相变的示意图如图1(a, b)所示：四重简并的狄拉克点分离为两个二重简并的线性能带交点。描述交点附近准粒子激发的方程也退化为外尔方程，用以描述零质量、具有手征性的外

尔费米子，线性能带交点也因此被称为外尔点。

在高能物理中，洛伦兹不变性仅能给出三种基本类型的费米子，分别为狄拉克费米子、外尔费米子以及马约拉纳费米子。而在非相对论情况下的凝聚态物理范畴，费米子不受到洛伦兹不变性的约束，仅需遵守230个空间群，这意味着更加丰富的物理即超越狄拉克—外尔框架的新型准费米子可能存在。

2016年普林斯顿大学Bernevig课题组在《科学》杂志上发表长文，理论预言了多种新型费米子的存在^[6]。其中一种新型费米子色散示意图如图1(c)所示，两条线性色散能带与一条平带相交于三重简并点，因此该点附近激发的准粒子被称之为三分量费米子。

前文所述的具有拓扑属性的粒子是满足费米统计的电子，即费米子。事实上，根据能带理论^[7]，玻色子体系也可以存在拓扑性。近年来，拓扑玻色子已经在一些人工材料，例如光子晶体^[8]及声子晶体^[9]中被发现，然而在真实材料体系中仍未有明确的证据。

磁振子作为自旋波量子——磁有序材料磁激发的准粒子，拥有玻色子的属性。

虽然大量的理论工作提出了各种磁振子拓扑态，然而在实验上一直鲜有报道。材料实现非常困难主要有以下三点原因：(1)正如前文所说，对称性对于材料的拓扑属性尤为重要。而寻找满足理论所设想对称性的真实材料远比设计一个人工材料困难；(2)当考虑磁性时，磁空间群的数目达到1651个，远超230个空间群，增加了材料选择的难度；(3)很

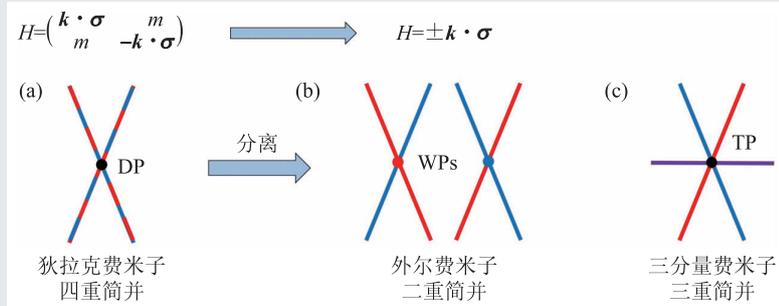


图1 (a)狄拉克费米子色散示意图和狄拉克方程；(b)外尔费米子色散示意图和外尔方程；(c)三分量费米子色散示意图。DP、WP以及TP分别表示狄拉克点、外尔点以及三重简并点

* 国家自然科学基金(批准号：11674157, 11774152, 11374138, 11674158, 11525417)、国家重点研发计划(批准号：2016YFA0300401)、中央高校基本科研业务费专项资金(批准号：020414380105)资助项目

多情况下，系统中额外的作用项会使得真实材料体系偏离理论所期待的基态，并使其磁激发态变得平庸。

2017年，北京大学李源课题组与中国科学院物理研究所方辰课题组提出 Cu_3TeO_6 中磁激发具有拓扑属性^[10]。如图2(a)所示，该材料具有立方结构，是一个三维共线型的反铁磁体^[11]，磁矩方向指向体对角线方向，每个向上的自旋通过反演中心都与一个向下自旋相对应，使得体系具有联合的空间和时间反演对称性，在此对称性保护下，体系支持狄拉克磁振子激发。

我们利用非弹性中子散射的测量手段，对高质量 Cu_3TeO_6 单晶样品进行谱学研究，得到了完整、清晰的磁激发谱，部分结果如图2(c, d)所示^[12]。从磁激发谱上看，高对称点位置，例

如图2(c)的 H 点以及 Γ 点，能带交点清晰可见。结合对称性分析，这些交点具有稳定的拓扑属性。

基于线性自旋波理论，我们采用一个以最近邻磁相互作用 J_1 为主要项的模型进行计算，很好地描述了实验观测到的磁激发谱。理论计算所得到的能带见图2(c, d)白线部分。分析表明，图2(d)中，在动量空间 P 点的不同能量位置存在3个狄拉克点，靠近这些狄拉克点的线性磁振子激发可以用狄拉克方程描述，因此这些准粒子被称为狄拉克磁振子。该结果跟早前的理论预言吻合得很好^[10]。

除了观察到理论所预言的狄拉克磁振子以外，我们还发现了超越狄拉克—外尔框架的新型玻色子——三重简并磁振子。图2(c, d)中的 H 和 H' 点，每个点都分别在两个能量出现三重简并点。 Γ 点同时存在一个狄拉克点以及一个三重简

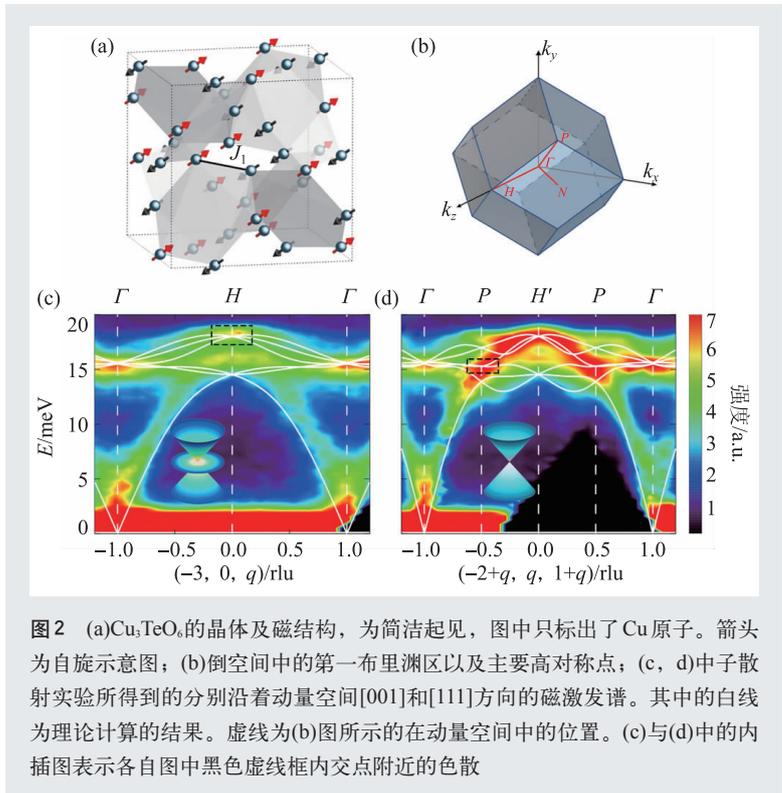


图2 (a) Cu_3TeO_6 的晶体及磁结构，为简洁起见，图中只标出了Cu原子。箭头为自旋示意图；(b)倒空间中的第一布里渊区以及主要高对称点；(c, d)中子散射实验所得到的分别沿着动量空间 $[001]$ 和 $[111]$ 方向的磁激发谱。其中的白线为理论计算的结果。虚线为(b)图所示的在动量空间中的位置。(c)与(d)中的内插图表示各自图中黑色虚线框内交点附近的色散

并点，但是在能量上比较接近，难以分辨。理论计算表明，在每一个三重简并点附近，磁振子能带由两条线性色散能带和一条平带交叉组成，因此，这些磁振子为三分量磁振子。

上述提及的磁振子能带高对称点上的线性交点，包括狄拉克点和三重简并点，均不依赖于理论模型，受到材料本身的对称性保护。

该工作首次在一个真实的三维磁性材料中观测到拓扑磁振子激发，丰富了材料科学；发现了一种狄拉克和三重简并磁振子共存的新颖拓扑态，加深了人们对于拓扑能带理论的理解。这些结果对于拓扑量子领域的发展具有重要意义，已于近期发表在*Nature Communications*上^[12]。

致谢 作者感谢与于顺利和万贤纲等同事的合作。

参考文献

- [1] Novoselov K S *et al.* *Nature*, 2005, 438: 197
- [2] Hasan M Z *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2010, 82: 3045
- [3] Armitage N P *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2018, 90: 015001
- [4] Young S M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 108: 140405
- [5] Wan X *et al.* *Phys. Rev. B*, 2011, 83: 205101
- [6] Bradlyn B *et al.* *Science*, 2016, 353: aaf5037
- [7] Bansil A *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2016, 88: 021004
- [8] Lu L *et al.* *Science*, 2015, 349: 622
- [9] Li F *et al.* *Nat. Phys.*, 2018, 14: 30
- [10] Li K *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2017, 119: 247202
- [11] Herak M *et al.* *J. Phys. Condens. Matter*, 2005, 17: 7667
- [12] Bao S *et al.* *Nat. Commun.*, 2018, 9: 2591



大连齐维科技发展有限公司

CHI-VAC Research & Development Co., Ltd.

地址: 大连市高新园区龙头分园龙天路27号

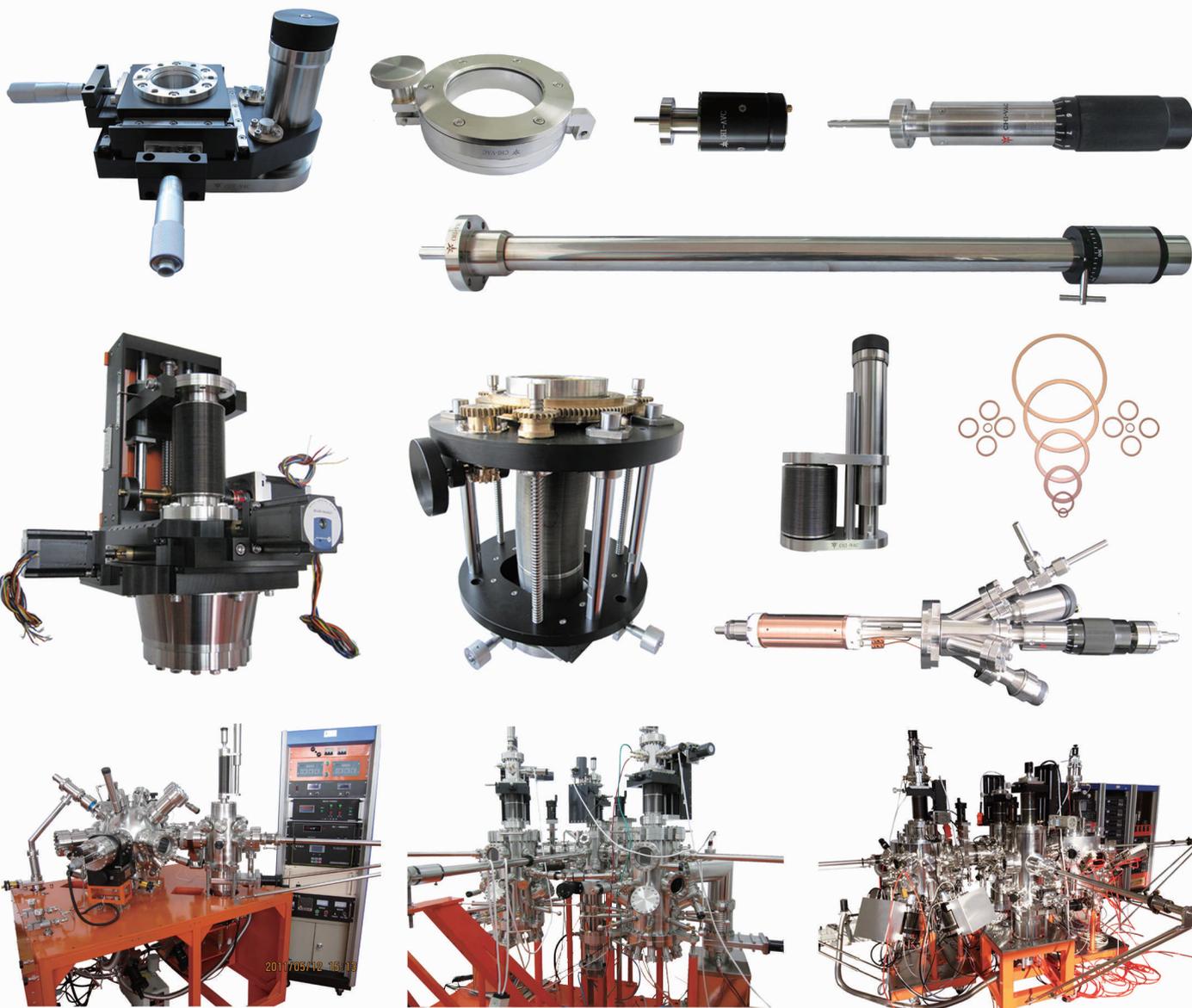
电话: 0411-86286788

传真: 0411-86285677

E-mail: info@chi-vac.com

http://www.chi-vac.com

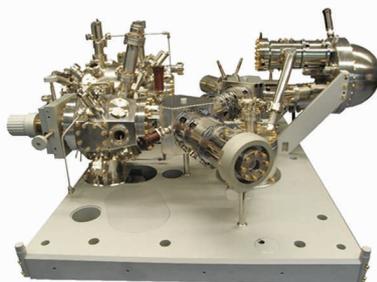
自主研发的超高真空驱动器和系统



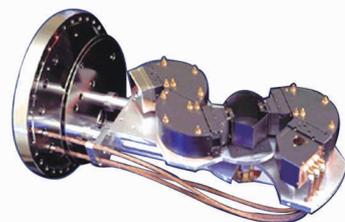
全权代理国际先端分析仪器



日本R-DEC公司的RHEED
和分析软件



德国Elmitec公司低能量/
光电子显微镜



美国LK Technologies公司高分辨
电子能量损失谱仪