

磁性Weyl半金属的实现及其巨反常霍尔效应

刘恩克^{1,†} Claudia Felser²

(1 中国科学院物理研究所 磁学国家重点实验室 北京 100190)

(2 德国马普学会固体化学物理研究所 德累斯顿 01187)

2018-12-11收到

† email: ekliu@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20181206

作为一个重要的电输运现象，反常霍尔效应的发现已有近140年的历史。长期以来的研究表明，反常霍尔效应在不同的条件下呈现出迥异的主导机制^[1]。一是由杂质原子散射所引起的外禀过程，一是晶体能带的贝利曲率所驱动的内禀行为。作为动量空间里的赝磁场，贝利曲率源于布洛赫电子的带间相互作用，对其在整个布里渊区内的积分即为体系的反常霍尔电导^[2]。当贝利曲率由拓扑材料中具有拓扑保护特征的能带所产生时，体系内禀的大反常霍尔效应更能抵抗缺陷和热扰动的破坏，具有更高的稳定性，更有利于器件应用^[1-3]。本世纪之初，物理学家发现磁性材料动量空间中的磁单极子可以产生内禀的反

常霍尔效应^[4]。现在看来，其中的磁单极子就是人们后来发现的外尔半金属中的外尔点。这为反常霍尔效应的研究提供了全新的能带拓扑理论认识。

反常霍尔角是反常霍尔效应的一个重要参量，它反映了纵向驱动电流所能转换为横向霍尔电流的效率，在较低功耗下即可获得较高的霍尔信号输出。同时，具有大反常霍尔角的体系也更有希望在二维极限下实现量子反常霍尔效应。这对于新一代霍尔器件，尤其是量子反常霍尔器件尤为重要。为了获得大的反常霍尔角，物质需要同时满足两个条件：(1)高的反常霍尔电导；(2)低的载流子浓度。常规磁性材料难以同时满足这两个

条件，因而一直未发现兼有大反常霍尔电导和大反常霍尔角的材料体系。

近年来，在拓扑物理的研究进展中，人们发现了各种拓扑绝缘体和以Dirac、Weyl半金属等为代表的拓扑半金属。在Weyl半金属中，无质量的手性Weyl费米子作为一种准粒子于2015年被人们发现^[5, 6]，从而引发了人们对Weyl费米子准粒子行为以及Weyl材料的研究热潮。但在非磁性的Weyl体系中，时间反演对称性使得反常霍尔效应为零；而在磁性Weyl半金属中，Weyl节点所产生的贝利曲率则可能导致较强的反常霍尔效应。作为半金属(Semimetal)材料，

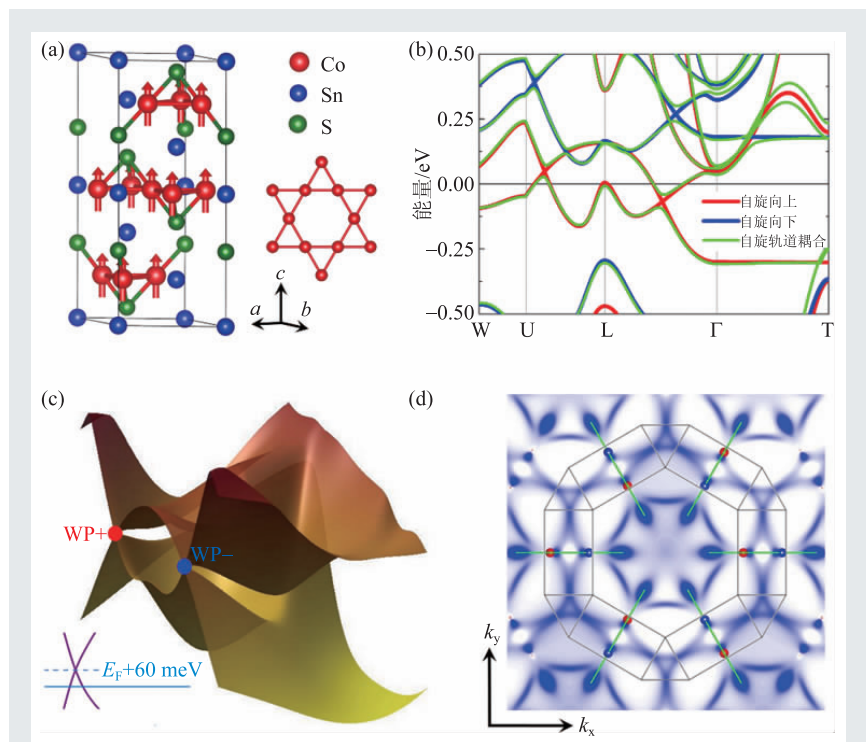


图1 磁性Weyl半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 的(a)晶体结构，(b)能带结构，(c)Weyl节点和(d)贝利曲率

Weyl半金属具有较低的载流子浓度，其拓扑保护的电子态可以主导体系的输运行为。因此，磁性Weyl半金属为大反常霍尔效应及大反常霍尔角的获得提供了理想的载体。然而，目前已提出的几种磁性Weyl半金属($\text{Re}_2\text{Ir}_2\text{O}_7$ 、 HgCr_2Se_4 、Co基Heusler化合物等)^[7-9]在实验上还在确认中，尚未观察到理想的拓扑行为和反常霍尔效应。

最近，德国马普固体化物所(德累斯顿)与中科院物理所(北京)等单位，偕同多个国际研究团队，在Shandite化合物家族中发现了一类具有Kagome晶格的磁性Weyl半金属 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ ，观察到了Weyl费米子相关的奇异输运行为，并测量到了内禀的大反常霍尔电导和巨反常霍尔角^[10]。

Shandite化合物具有 $M_3M'_2X_2$ 化学式(M 为过渡族金属， M' 为主族金属， X 为硫族元素)，含有由过渡族金属所构成的Kagome二维晶格结构。磁性Kagome晶格是凝聚态物理中自旋液体、量子反常霍尔效应、磁性Skyrmion等新物态产生的一个重要平台，而磁性Shandite化合物 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 也被认为是单自旋铁磁体(half metal)，本工作对该体系进行了深入研究。该体系在Shandite家族中具有最高的居里温度(175 K)，其磁性来自于Co原子所构成的Kagome晶格，且磁矩垂直于该二维格面，具有非常强的磁晶各向异性。电子带结构的计算表明，自旋向下通道于费米能级处出现能隙，在自旋向上的通道中存在强的能带反转和线性交叉，这是磁性Weyl态可能存在的关键特征。

实验采用自助溶剂等方法生长了高质量单晶样品。在150 K的宽温区内观察到了大反常霍尔电导($\sim 1130 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$)和巨反常霍尔角($\sim 20\%$)，均比常规磁性材料高出一个数量级。电输运测量表

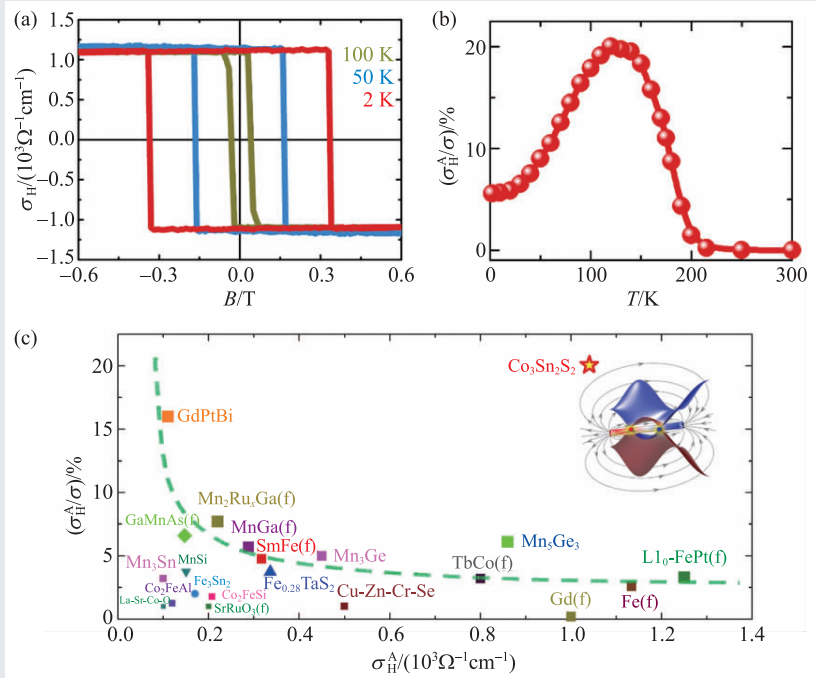


图2 实验测量的(a)反常霍尔电导, (b)反常霍尔角及(c)其与常规磁性材料的对比关系

明, $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 具有非饱和的正磁电阻和低的载流子浓度,表现出近补偿型半金属特征。同时,反常霍尔电导对温度和纵向电导均无依赖关系,使得该体系在反常霍尔效应的统一模型中居于内禀的“贝利相位”区,表明该体系中的反常霍尔效应来源于动量空间的贝利曲率。在较宽的温区内稳定存在的贝利曲率与低载流子浓度半金属特性使得 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ 获得了巨大的反常霍尔角。

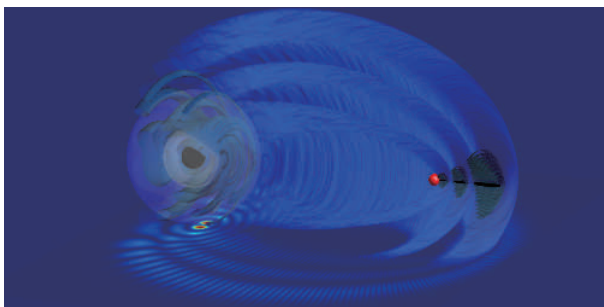
理论计算结果表明,体系在能带反转导致的节线环上打开小能隙,但在其附近产生了3对手性相反的Weyl节点。节点距离费米能级仅有 $\sim 60 \text{ meV}$,易于对Weyl相关的电输运行为进行观测。Weyl节点及节线环产生了强烈的拓扑相关的贝利曲率。基于贝利曲率计算的内禀反常霍尔电导($\sim 1100 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$)与实验测量高度一致。进一步的实验观察到了强磁场下磁电阻的Shubnikov-de Haas量子振荡和手性异常(Chiral anomaly)所导致的负磁电阻现象。ARPES和STM也清晰地观测到了理论预期的拓扑表面态(费米弧)和Weyl节点^[11]。这些结果为该体系中存在磁性Weyl费米子提供了有力的实验证据。

该工作结合理论计算、电输运测量、能谱学观测等手段，实验上发现了第一个磁性 Weyl 半金属。获得了同时具有大反常霍尔电导和巨反常霍尔角的拓扑磁体，紧密地将拓扑物理与自旋电子学关联起来，为基础研究和器件应用提供了重要基础。该研究也是首次在磁性 Kagome 晶格上发现了 Weyl 费米子的存在，为高温量子反常霍尔效应的实现提供了理想的载体。目前，该磁性 Weyl 半金属体系已迅速得到拓扑物理学和自旋电子学等领域的广泛关注，将在不同方向上促进拓扑物理新物态、新性能的涌现，并推动基于新原理的电子学器件应用进程。

如何产生幽灵化学键

施加到原子上的一系列电和磁脉冲可以导致其中一个电子表现得好像“键合”到空间中的一处空白。

以常识而言，化学键的形成至少需要两个可成键的原子。但是，一项实验展示出也许可以将这个要求降低到只有一个原子。这提供了新视角，使研究人员可以去探索异常的化学键形式。印第安纳州西拉斐特的普渡大学 Matthew Eiles 及其同事提出了构建一种称为三叶虫的键的方法。他们所操纵的是里德伯原子，这是一种电子处于高激发态的原子。而这个名字则是



参考文献

- [1] Nagaosa N *et al.* Rev. Mod. Phys., 2010, 82: 1539
- [2] Xiao D *et al.* Rev. Mod. Phys., 2010, 82: 1959
- [3] Burkov A A. Phys. Rev. Lett., 2014, 113: 187202
- [4] Fang Z *et al.* Science, 2003, 302: 92
- [5] Weng H *et al.* Phys. Rev. X, 2015, 5: 011029
- [6] Lv B Q *et al.* Phys. Rev. X, 2015, 5: 031013
- [7] Wan X G *et al.* Phys. Rev. B, 2011, 83: 205101
- [8] Xu G *et al.* Phys. Rev. Lett., 2011, 107, 186806
- [9] Wang Z *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 117: 236401
- [10] Liu E K *et al.* Nat. Phys., 2018, 14: 1125
- [11] Chen Y L, Liu E K. under review

物理新闻和动态

源自电子波函数的空间分布和这种早已灭绝的节肢动物很相似。

一般来说，科学家会在一些特别类型的双原子分子中观察到三叶虫键，比如铷和铯的双原子分子(Rb₂和Cs₂)。此时，其中一个原子位于里德伯态，另一个则处于基态。由于里德伯原子的高能级电子占据的轨道离原子核很远，于是这些“三叶虫分子”就格外巨大，比通常的双原子分子要大1000倍。利用数值模拟，Eiles和同事们发现，如果精细地控制一个电场与磁场脉冲交替出现的序列，那么里德伯氢原子的波函数可以被塑型并与三叶虫分子相似。这导致被激发的电子被定位于空间的一点，与原子核相聚几十纳米。这个波函数可持续至少200 μs，这种效应就像里德伯原子暂时性的与一个不存在的幽灵原子成键。

实验科学家则需要想办法去实现这些严格的条件，获得同步的脉冲并屏蔽外场。如果能跨过这些障碍就能产生幽灵键。这个结果可以通过电子或X射线散射来观察和证实，而其应用则还在思索之中。他们猜测也许这种键可以用来改变化学反应的速率。

(王树峰 编译自 *Physics*, September 12, 2018)