

[快速导航 \(../ksdh/xs1.htm\)](#)

[首页 \(../index.htm\)](#) [院内门户 \(http://portal.phy.pku.edu.cn/\)](http://portal.phy.pku.edu.cn/) [旧网站 \(http://www2.phy.pku.edu.cn/\)](http://www2.phy.pku.edu.cn/)

SCHOOL OF PHYSICS,

[English \(http://english.phy.pku.edu.cn/\)](http://english.phy.pku.edu.cn/) |

<https://www.pku.edu.cn>

学院概况

[\(../xygk/\)](http://xygk.phy.pku.edu.cn/)

教职员

[\(../xygk/\)](http://xygk.phy.pku.edu.cn/)

新闻公告

[\(../xygk/\)](http://xygk.phy.pku.edu.cn/)

学术活动

[\(../xygk/\)](http://xygk.phy.pku.edu.cn/)

<http://www.phy.pku.edu.cn>

教育教学

[\(../jy.jx/\)](http://jy.jx.phy.pku.edu.cn/)

科学研究

[\(../kxyj/\)](http://kxyj.phy.pku.edu.cn/)

物理校友

[\(../wly/\)](http://wly.phy.pku.edu.cn/)

办公服务

[\(../bgs/\)](http://bgs.phy.pku.edu.cn/)



科学研究

科研成果

当前位置: [首页 \(../index.htm\)](#) >> [科学研究 \(../kxyj/yjfx.htm\)](#) >> [科研成果 \(../kxyj/kycg.htm\)](#) >> 正文

[研究方向](#)

[../kxyj/yjfx.htm](http://kxyj/yjfx.htm) +

[重大项目](#)

[../kxyj/zdxi.htm](http://kxyj/zdxi.htm)

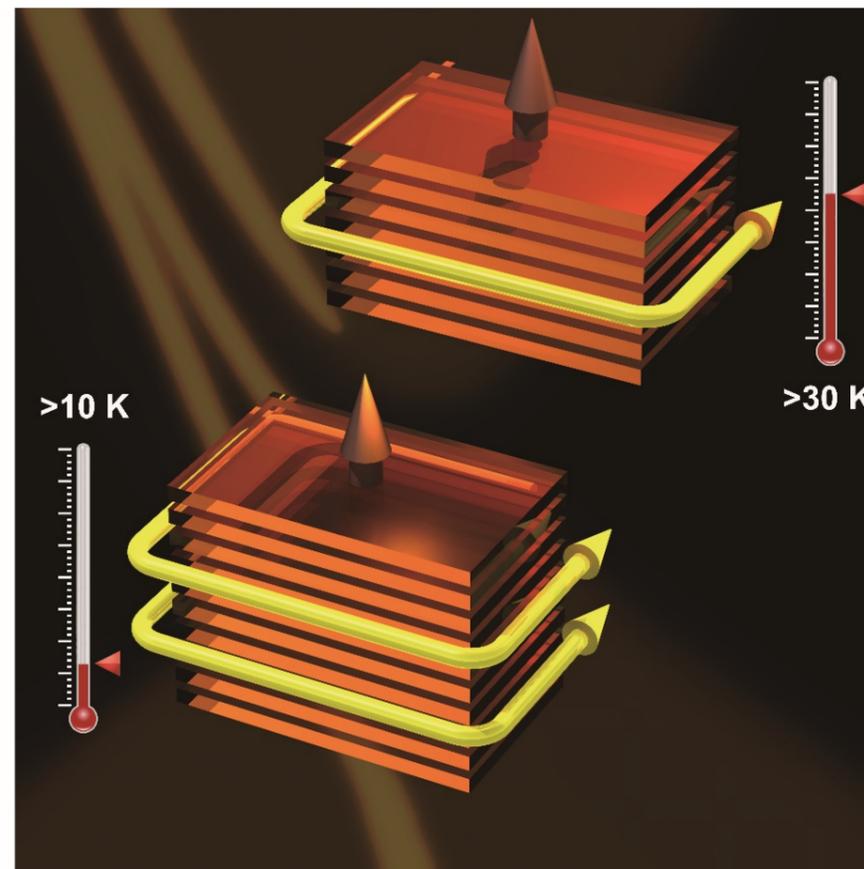
[科研机构](#)

[../kxyj/kyjg1.htm](http://kxyj/kyjg1.htm)

《科学》编辑精选评价王健及合作者高陈数和高温陈绝缘体态的发现

发布日期: 2020-06-04 浏览次数: 306





高陈数和高温陈绝缘体态的发现

量子霍尔效应因无耗散的一维拓扑边界态表现出霍尔电阻为量子电阻 (h/e^2 , h 是普朗克常数, e 为基本电荷) 的整数倍而纵向电阻为零的特殊输运性质, 是物质科学和精密测量领域最为重要的发现之一。要产生量子霍尔效应, 需要体系形成显著的能隙和强烈破坏时间反演对称。通常这需要三个不可或缺的前提条件: 物质材料极高的迁移率、强外加磁场、极低温。这些苛刻的条件极大限制了量子霍尔效应的实际应用。在此背景下, 1988年美国物理学家霍尔丹 (Haldane) 理论上首次提出了一种无需外磁场的量子霍尔效应 (同一物态也被称为陈绝缘体态或量子反常霍尔效应) 实现方案。2013年, 薛其坤院士领导的研究团队在磁性原子Cr掺杂的(Bi,Sb)₂Te₃拓扑绝缘体磁性薄膜中首次实验上观测到了陈数为1($C=1$)的陈绝缘体态, 即量子反常霍尔效应。随后, Haldane因量子反常霍尔效应的早期理论工作等荣获了2016年诺贝尔物理学奖。陈绝缘体的一维无耗散边界态为大规模集成电路中不可避免的器件发热问题提供了一种可能的解决方案。然而磁性掺杂的量子反常霍尔效应体系通常只能提供单个无耗散的导电边界态 (陈数为1), 且需要极低温的工作环境, 离应用需求相去甚远。因此, 如何实现更多的无耗散导电边界态, 如何提高陈绝缘体态的工作温度, 不仅是物质科学领域最为重要的研究方向之一, 也有望推动无耗散或低耗散电子器件与集成电路的发展。

最近，北京大学物理学院量子材料科学中心王健教授、清华大学物理系徐勇副教授、清华大学机械学院吴扬副研究员等组成的合作团队在磁性拓扑材料的量子霍尔效应研究上取得了重要突破，在MnBi₂Te₄器件中发现了非朗道能级引起的高陈数和高温度量子霍尔效应。MnBi₂Te₄是一种新型的层状磁性拓扑材料，如图1a所示，单层MnBi₂Te₄包含7个原子层，形成Te-Bi-Te-Mn-Te-Bi-Te七重层，可以将其看作是将Mn-Te双层插入到了Bi₂Te₃五重层的中心。在每个七重层内，Mn原子的磁矩铁磁排列，而在两个七重层之间，Mn原子磁矩反铁磁排列，最终形成体相的反铁磁拓扑绝缘体态。理论计算表明，这种独特的磁结构会使材料呈现出极其丰富的奇异拓扑量子物态：其层厚为奇数个“七重层”的薄膜处于量子反常霍尔相，层厚为偶数个“七重层”的薄膜处于轴子绝缘体相，三维体相是具有拓扑轴子表面态的反铁磁拓扑绝缘体，而在外加磁场下又可转变为最简单（只有一对外尔点）的磁性外尔半金属。丰富的拓扑物态、极易剥离的层状结构使得MnBi₂Te₄成为绝佳的观测和调控拓扑量子物态的

研究人员制备出了多个不同厚度的MnBi₂Te₄电输运器件。在9层和10层的器件中，霍尔电阻在约5 T的垂直磁场下形成了一个值为1/2个量子电阻($h/2e^2$)的平台（图1b），这代表着两个无耗散边界态的出现（图1e）；与此同时，纵向电阻趋近于零（图1b），这是陈数为2的陈绝缘体态的典型特征。其中，10层器件的高陈数陈绝缘体态可以一直保持到10 K以上的温度（图1c, d）。这是首次在液氮温度以上观测到具有多个无耗散手性边界态的陈绝缘体态。

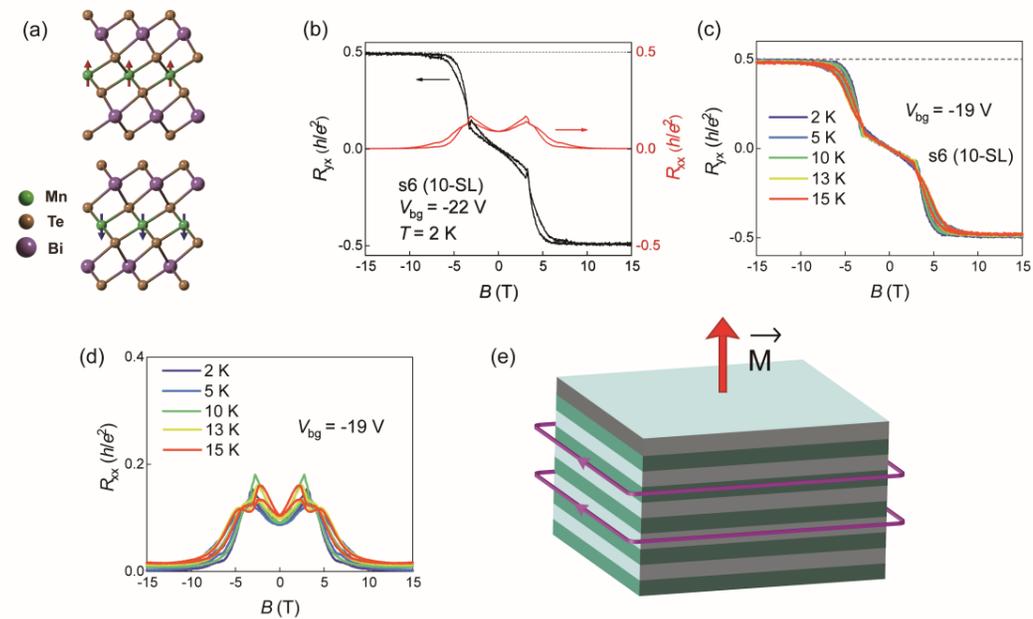


图1: (a) 两层MnBi2Te4的原子结构与层间反铁磁态示意图; (b) 非朗道能级引起的高陈数 (C=2)量子霍尔效应; (c), (d) 非朗道能级引起的高陈数 (C=2)量子霍尔效应变温结果; (e) 具有两个无耗散边界态的陈绝缘体态示意图。图改编自: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa089> (<https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa089>)

研究团队进一步研究了厚度对陈绝缘体态的影响。在7层和8层的器件中, 通过施加一定的垂直磁场, 观测到了值为1个量子电阻(h/e^2)的霍尔平台和同时趋近于零的纵向电阻, 也就是陈数为1的陈绝缘体态。更重要的是, 7层器件中的量子化温度高达45 K (45 K时, 霍尔平台超过90%的量子电阻, 且纵向电阻小于霍尔电阻, 见图2a, b); 8层器件中的量子化温度也超过了30 K (30 K时, 霍尔电阻为97%的量子电阻, 且纵向电阻接近于零, 见图2d, e), 显著高于器件的反铁磁转变温度(奈尔温度, 在器件中约22 K)。图2c, f所展示的相图清晰的表明了7层和8层的器件中陈绝缘体态随着温度变化的演变过程。

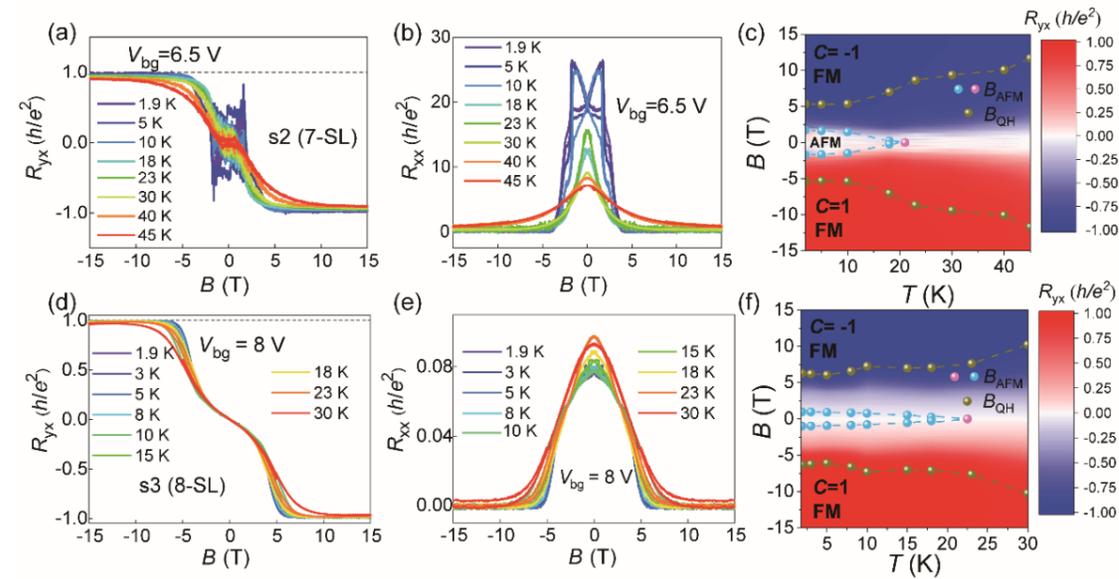


图2: (a), (b) 7层MnBi2Te4器件中非朗道能级引起的C=1的高温量子霍尔效应; (c) 7层MnBi2Te4器件中非朗道能级引起的C=1的高温量子霍尔效应相图; (d), (e) 8层MnBi2Te4器件中非朗道能级引起的C=1的高温量子霍尔效应; (f) 8层MnBi2Te4器件中非朗道能级引起的C=1的高温量子霍尔效应相图。图来自: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa089> (<https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa089>)

研究团队观测到的高温和高陈数的量子霍尔效应需要外加弱磁场才能实现, 这是因为MnBi2Te4在零磁场下为反铁磁相而非铁磁相。由于传统的量子霍尔效应同样可以产生量子化的霍尔平台, 所以有必要排除这一可能性。研究人员分析了被测试器件的迁移率, 发现器件的迁移率在100-300 $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ 范围内。在这样的迁移率下, 要想看到由外加磁场下朗道量子化导致的量子霍尔效应, 通常需要施加30 T以上的磁场, 远大于实验中观测到量子化霍尔平台所需的磁场值。研究人员进一步通过栅压调控等手段改变了器件中的载流子类型,

发现量子化的霍尔平台值与器件的载流子类型无关，排除了量子化的霍尔平台来自传统量子霍尔效应的可能性。这些发现表明，如果能够选取合适的材料与参数，未来有望实现更高温甚至室温的陈绝缘体态或量子反常霍尔效应，在真正意义上构筑无耗散或低耗散的信息高速公路，带来信息科学与技术领域的变革。

通过理论计算，研究人员揭示了实验中观测到的陈绝缘体态的来源。面外铁磁排列的MnBi₂Te₄块材可以实现理论上最简单的磁性外尔半金属，仅在费米面附近存在一对外尔点。将其剥离为薄膜器件材料时，由于量子限域效应的存在，少层的MnBi₂Te₄器件表现为陈绝缘体，并且器件的陈数随层厚变化，在体能隙中可以容纳多个无耗散的导电通道。理论计算的结果与上述实验观测结果吻合。而高陈数陈绝缘体的实验发现也为MnBi₂Te₄中存在磁性外尔半金属态提供了间接证据。

在磁性拓扑材料中发现高陈数以及高温陈绝缘体态，必将激励面向更高温度甚至室温的量子反常霍尔效应研究，为未来物理、材料、信息科技领域的重大突破奠定基础。

该工作在线发表于《国家科学评论》(National Science Review) , <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa089> (<https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa089>), 北京大学王健教授与清华大学徐勇副教授为文章共同通讯作者，北京大学博士生葛军、刘彦昭与清华大学博士生李佳恒、李昊为共同第一作者。这一工作得到了国家重点研发计划、国家自然科学基金、北京市自然科学基金、量子物质科学协同创新中心、中科院卓越创新中心等支持。文章在线发表后，国际顶级学术期刊《科学》(Science) 的编辑精选

(Editors' Choice) 以“调控陈数” (Tuning the Chern number) 为题对这一成果进行了高亮报道。(Science 368, 962 (2020)):

<https://science.sciencemag.org/content/368/6494/twil>
(<https://science.sciencemag.org/content/368/6494/twil>)

注：Science每期的编辑精选会收录7篇其余学术期刊上的论文高亮报道，该期物理领域收录1篇。

Editors' Choice

Science 29 May 2020:
Vol. 368, Issue 6494, pp. 962

PHYSICS

Tuning the Chern number

Jelena Stajic

The material MnBi_2Te_4 is an antiferromagnet that can, in thin-film form, support interesting topological states. Ge *et al.* investigated the transport properties of MnBi_2Te_4 films 7 to 10 layers thick in the presence of a magnetic field. The authors showed that the films were in the so-called Chern insulator state, exhibiting quantized conductance that could not be explained by the ordinary quantum Hall effect. The thinner, seven-layer samples had a Chern number of 1, whereas the 9- and 10-layer samples were in an even more exotic state with a Chern number of 2. The tuning of the Chern number with sample thickness was also supported by numerical calculations.

Natl. Sci. Rev. 10.1093/nsr/nwaa089 (2020).