

三维量子霍尔效应:复旦大学物理学系张成博士首次观察到

作者：writer 来源：研之成理微信公众号

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/topnews/3341.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

三维量子霍尔效应

复旦大学物理学系张成博士首次观察到三维量子霍尔效应。复旦大学物理学系修发贤课题组在拓扑半金属砷化镭纳米片中观测到了由外尔轨道形成的新型三维量子霍尔效应的直接证据，迈出了从二维到三维的关键一步。

北京时间12月18日零点，相关研究成果以《砷化镭中基于外尔轨道的量子霍尔效应》(“Quantum Hall effect based on Weyl orbits in Cd_3As_2 ”)为题在线发表于《自然》(Nature, DOI: 10.1038/s41586-018-0798-3)。修发贤为通讯作者，复旦大学物理学系博士生张成，复旦校友、康奈尔大学博士后张亿和复旦大学物理学系博士生袁翔为共同第一作者。



共同第一作者：张成，张亿，袁翔;通讯作者：修发贤;第一单位：复旦大学物理学系;论文doi：10.1038/s41586-018-0798-3。

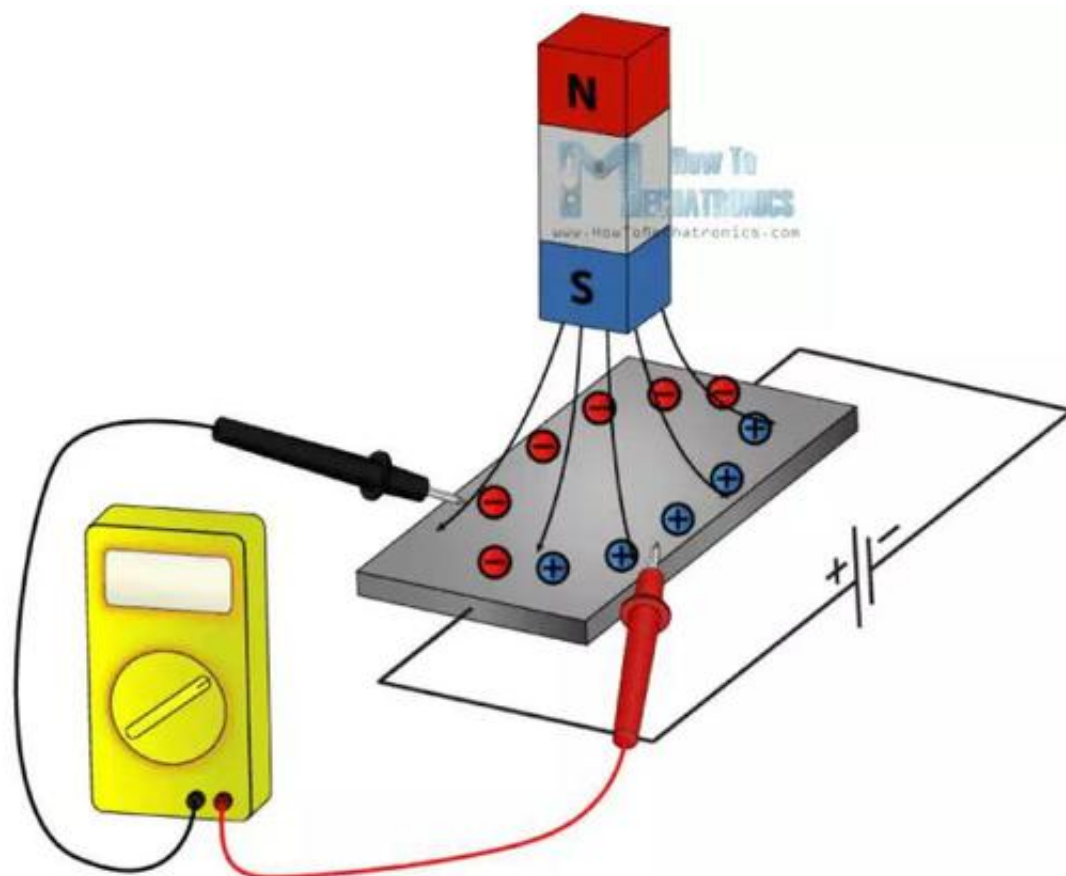
对于这次成果的诞生，修发贤觉得，在砷化镭的研究方面，这才刚刚开始。“这是一个作品，我们第一次提出了新的机制，也得到了认可。但还有可以深挖的，还有更具体的东西，我想得继续做细做好。这次我们发现了三维量子霍尔效应，为今后的进一步科研探索提供一定的实验基础。

另外，在应用方面这个材料体系具有非常高的迁移率，电子的传输和响应很快，可以在红外探测、电子自旋方面做一些原型器件。

课题背景

量子霍尔效应是20世纪以来凝聚态物理领域最重要的科学发现之一，迄今已有四个诺贝尔奖与其直接相关。

但一百多年来，科学家们对量子霍尔效应的研究仍停留于二维体系，从未涉足三维领域。



早在130多年前，美国物理学家霍尔就发现，对通电的导体加上垂直于电流方向的磁场，电子的运动轨迹将发生偏转，在导体的纵向方向产生电压，这个电磁现象就是“霍尔效应”。如果将电子限制在二维平面内，在强大的磁场作用下，电子的运动可以在导体边缘做一维运动，变得“讲规则”“守秩序”。

但以往的实验证明，量子霍尔效应只会在二维或者准二维体系中发生。“比如说这间屋子，除了上表面、下表面，中间还存在一个空间。”修发贤用手上下比划着。人们知道，在“天花板”或者“地面”上，电子可以沿着“边界线”有条不紊的做着规则运动，一列朝前，一列向后，像是两列在各自轨道上疾驰的列车。那么，在立体空间中呢？

三维体系中存在量子霍尔效应吗？如果有，电子的运动机制是什么？

把“房子”放歪 发现来源于外尔轨道的运动机制

“我们在砷化镓纳米片中看到这一现象时，非常震惊，三维体系里边怎么会出现量子霍尔效应？”2016年10月，修发贤及其团队第一次用高质量的三维砷化镓纳米片观测到量子霍尔效应的时候，就像目睹汽车飞到空中那样又惊又喜。

很快，他们的这一发现发表在了《自然·通讯》上。随后，在样品制备过程中借鉴了修发贤团队前期已发表的经验，日本和美国也有科学家在同样的体系中观测到了这一效应。但遗憾的是，基于当时的实验结果，实际的电子运动机制并不明确。

课题组提出了他们的猜想：一种可能的方式是从上表面到下表面的体态穿越，电子做了垂直运动；另一种可能是电子在上下两个表面，即在两个二维体系中，分别独立形成了量子霍尔效应。

课题组决定，打破砂锅问到底。但面对千分之一根头发丝大小的实验材料，快如闪电的电子运动速度，这实验该怎么做？起初，他们也不知该如何下手。

“我们把‘房子’放歪了！”实验材料虽小，灵感却可以从日常生活而来。

修发贤课题组想了一个办法，他们创新性地利用楔形样品实现可控的厚度变化。“屋顶被倾斜了，房子内部上下表面的距离就会发生变化。”修发贤比划出一个“横倒的梯形”。

通过测量量子霍尔平台出现的磁场，可以用公式推算出量子霍尔台阶。实验发现，电子在其中的运动轨道能量直接受到样品厚度的影响。这说明，随着样品厚度的变化，电子的运动时间也在变。所以，电子在做与样品厚度相关的纵向运动，其隧穿行为被证明了。

“电子在上表面走一段四分之一圈，穿越到下表面，完成另外一个四分之一圈后，再穿越回上表面，形成半个闭环，这个隧穿行为也是无耗散的，所以可以保证电子在整个回旋运动中仍然是量子化的。”修发贤说，整个轨道就是三维的“外尔轨道”，是砷化镓纳米结构中量子霍尔效应的来源。

至此，三维量子霍尔效应的奥秘终于被揭开了。

全文亮点

基于三维拓扑半金属材料 Cd_3As_2 ，发现一种新型的量子霍尔效应，认为三维量子霍尔效应的来源于与外尔轨道。

利用楔形 Cd_3As_2 纳米片，发现样品厚度对量子霍尔输运产生极大的调制。

朗道能级与磁场强度以及方向，以及样品厚度的依赖关系，与理论预测符合。

图文快解

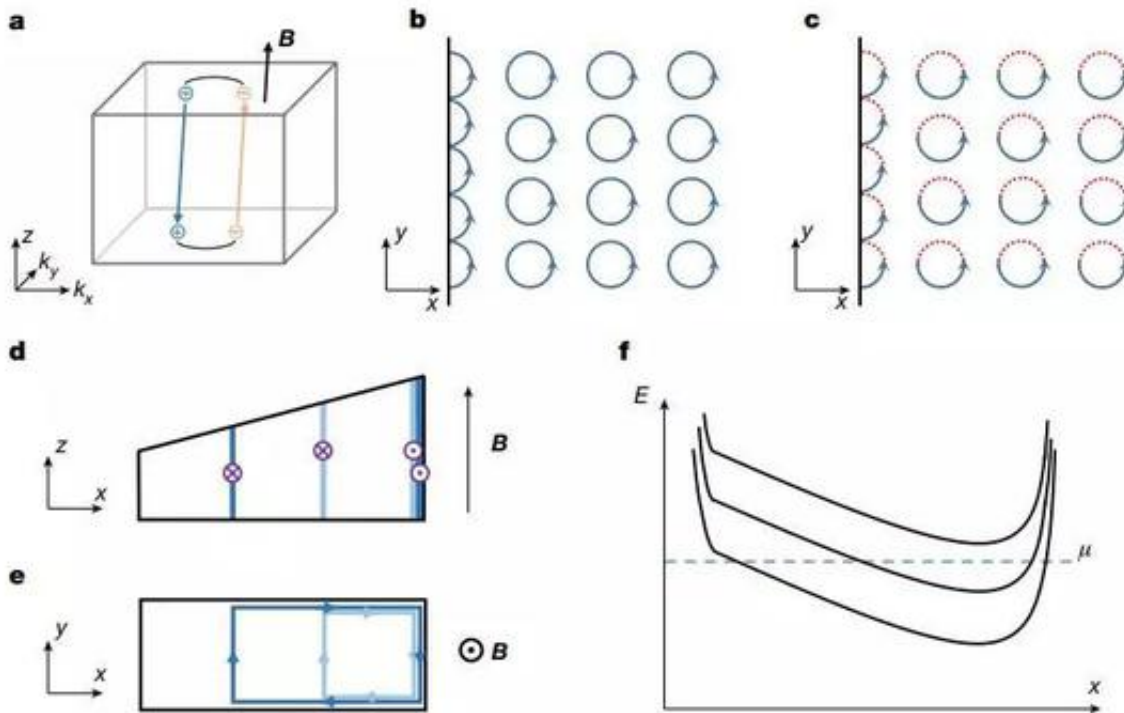


图1 外尔轨道中的量子霍尔效应。

b：二维量子霍尔效应图示。

c：基于外尔轨道的三维量子霍尔效应图示。

d, e：基于楔形样品，在不同厚度出测量输运性质图示。

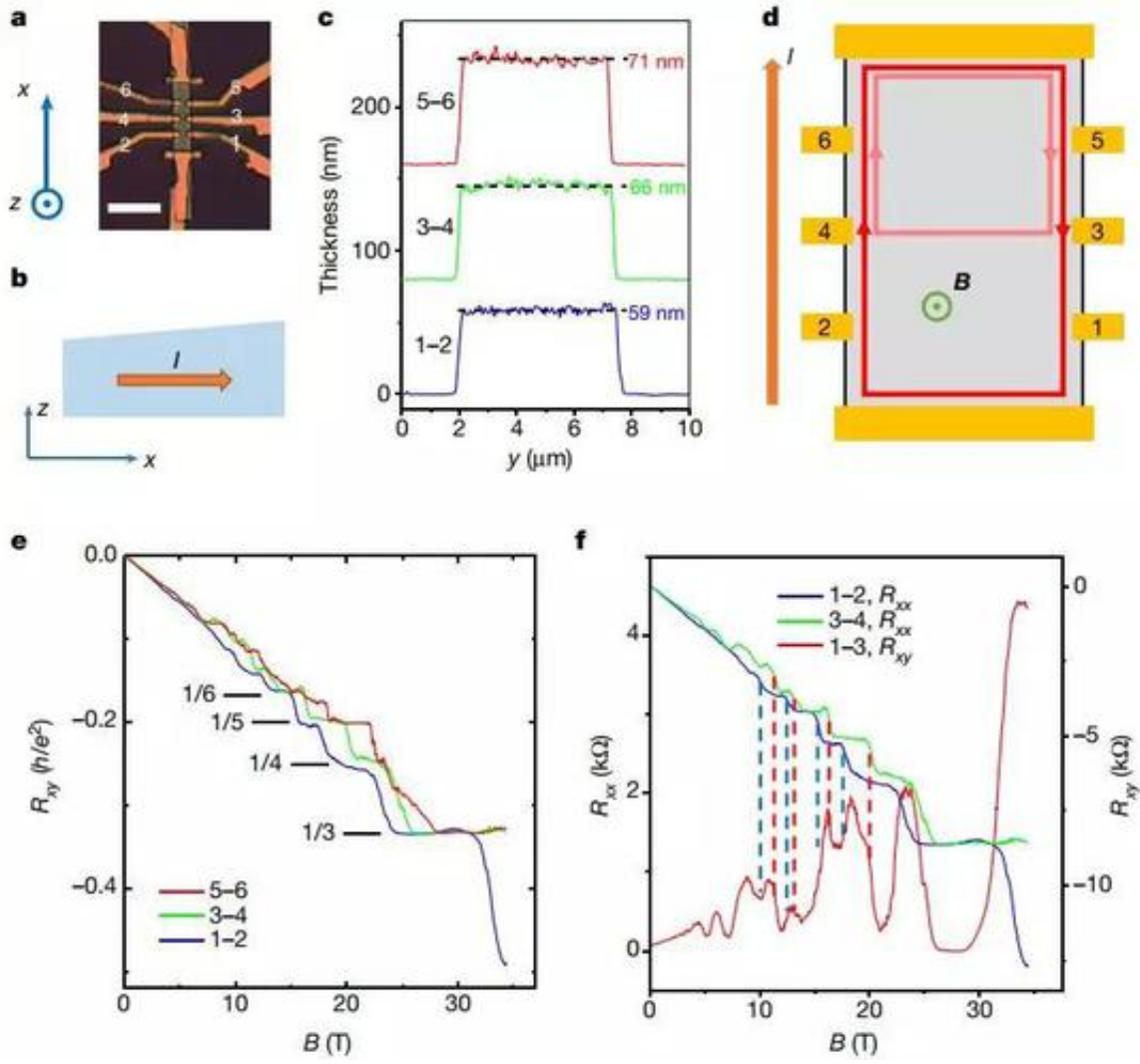


图2 楔形样品1的量子霍尔效应。x轴方向上，厚度变化。

图3 楔形样品2，y轴方向上的量子霍尔效应。

通过测量量子霍尔平台出现的磁场，可以用公式推算出量子霍尔台阶。

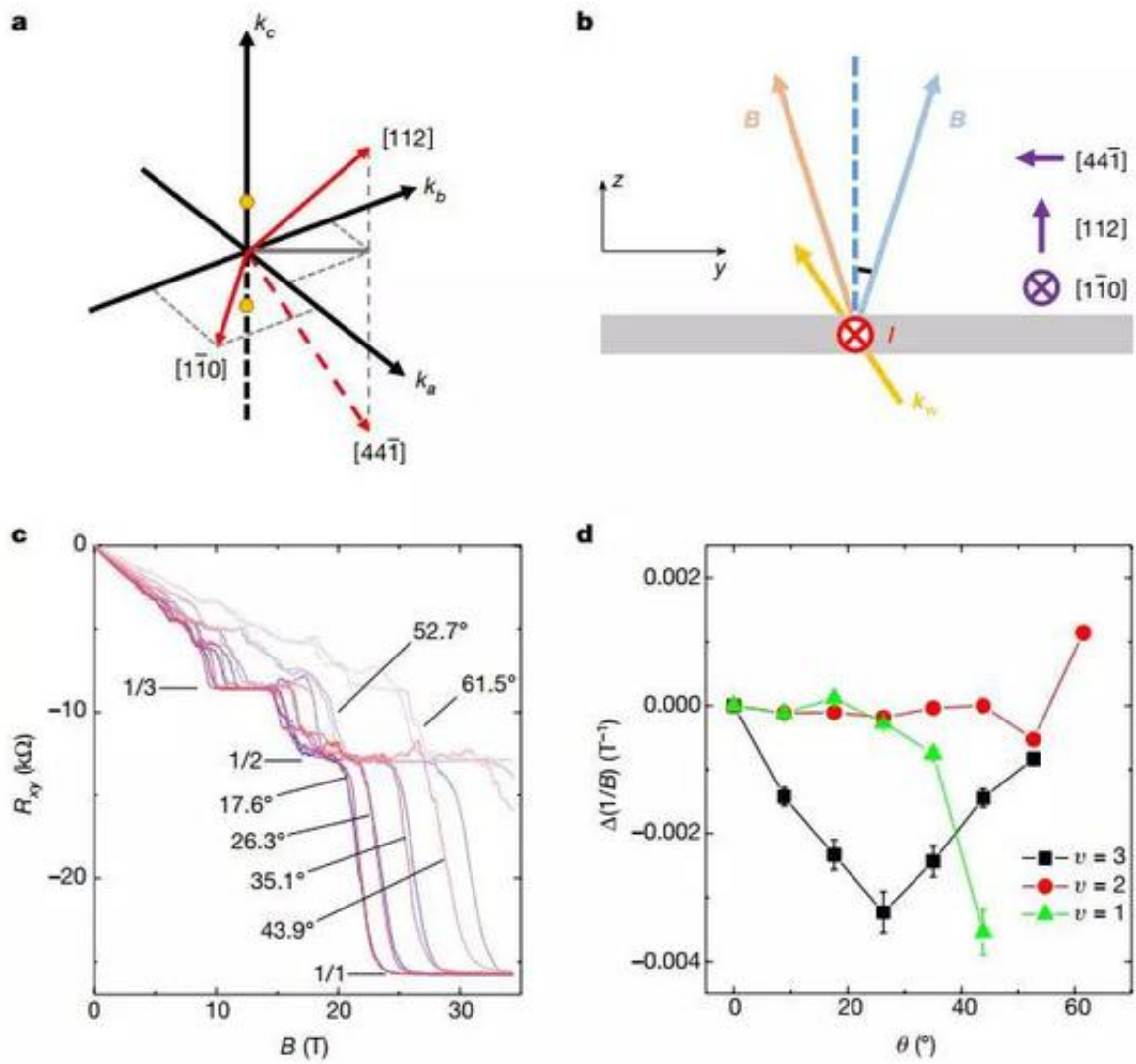


图4 将样品在y-z平面内倾斜，产生的不对称的霍尔电阻。

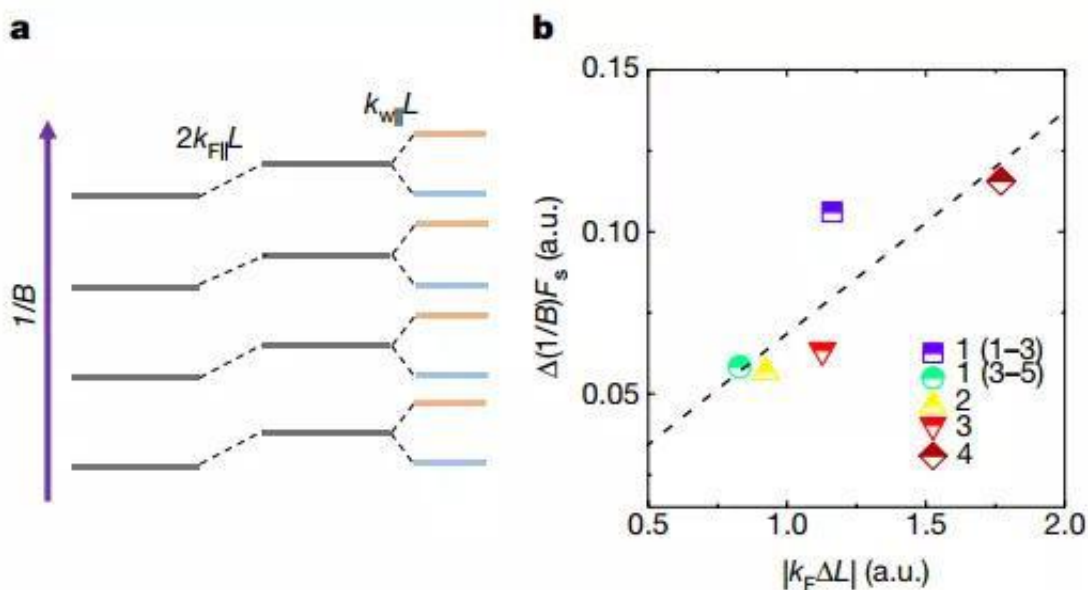


图5 外尔轨道内朗道能级偏移的分析。

作者介绍



修发贤，于2007年获得加州大学河滨分校博士学位。2008至2011年在加州大学洛杉矶分校做博士后研究。2011年担任爱荷华州立大学助理教授。2012年入选青年千人计划，2013年入职复旦大学并获得优青和浦江人才计划支持。

修发贤课题组主要从事拓扑狄拉克材料的生长、量子调控以及新型二维原子晶体的器件研究。在狄拉克材料方面致力于新型量子材料的生长、物性测量以及量子器件的制备与表征。在二维材料

的器件方面主要研究其电学、磁学和光电特性。

在过去的十余年中，在学术期刊Nature Materials，Nature Nanotechnology，Nature Communications，JACS，Nano Letters等发表SCI论文100余篇。目前工作重点是新型狄拉克材料的生长、量子调控以及新型二维原子晶体的器件研究。

更多 科研头条 请访问 <https://www.iikx.com/news/topnews/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发