

关于拓扑费米子与其手性朗道能带的指标定理

发布日期: 2021-02-09 访问量: 2369

拓扑物态和拓扑材料是过去十几年间横跨多个学科的一个研究热点。特别是对拓扑半金属的研究更是在凝聚态/材料物理, 高能物理, 和相对论的领域之间构建了之前意想不到的联系。在拓扑半金属中, 电子的能带在费米能附近存在一些受对称性和拓扑保护的交叉点。受到这些点的影响, 费电子态遵循着与自由电子截然不同的模型, 进一步导致了各种奇特的物理性质。例如在外尔半金属(Weyl semimetal)中, 两个能带相交后形成在动量方向都是线性交叉的外尔点。外尔点附近的低能电子的行为就类似于量子场论中的外尔费米子, 由外尔哈密顿量所描述。

拓扑能带交点的一个重要性质是其拓扑电荷。比如一个外尔点的拓扑电荷是 ± 1 , 由包裹这个点的一个球面上的陈数所定义。当然, 在材料中, 我们还可以有其他古怪的点, 具有更高的拓扑电荷 $N \neq \pm 1$ 。拓扑电荷对物理性质有什么影响? 怎么探测拓扑电荷呢? 在之前的研究中, 一个主要手段是看系统在 μ 响应。我们知道: 在强磁场下, 电子垂直于磁场方向的运动会量子化为朗道能级, 其沿着磁场方向的运动则不受影响, 所以三维系统的电子能带在磁场中会演朗道能带结构。普通半金属的朗道能带结构一般都会出现能隙, 分开导带与价带。在1983年, Nielson和Minomiya通过具体的计算, 指出对应于外尔点的朗道能带在一条特殊的手性朗道能带。如图1所示, 这个能带贯穿能隙, 连接了上下。所谓手性, 指的是这个能带具有特定的群速度方向(也就是这条线的斜率), 要么都是正的。这个特殊的手性朗道能带可以通过红外光谱或者扫描隧道谱的方法直接探测。同时, 它也是所谓手征反常(chiral anomaly)所导致的负磁阻效应的原因。过去十年中, 可以说对拓扑半金属的无数理论和实验研究都是基于这个奇特的手性朗道能带。

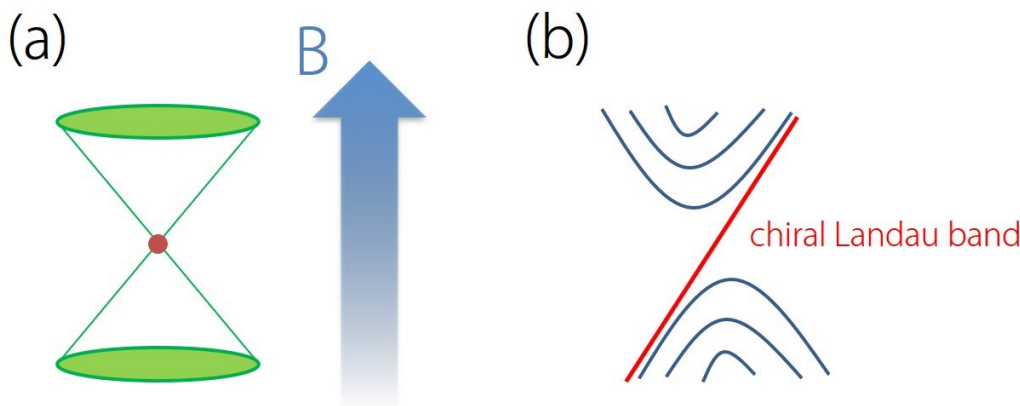


图1: (a)一个外尔点的示意图。在外加磁场下, 其朗道能带结构会有一个上下贯穿的手性朗道能带, 如(b)所示。

大家注意到这个手性朗道能带的数目 ν 似乎对应着外尔点的拓扑电荷 N , 即 $\nu=N$, 这里 ν 的正负对应着朗道能带的手性。在后续的很多模型研究中, 这个对应发现是满足的。比如一个 $N=4$ 的点会有四条正手性的朗道能带。那么问题是这个关系总是对的吗? 在研究中, 尽管很多研究者已经默认了它的正确性, 但是迄没有对这个对应关系的证明。

在最近的一个工作中, 南京大学赵宇心老师和新加坡科大杨声远老师首次提供了一个严格的证明, 将 $\nu=N$ 这个对应关系从一个猜想提升为了一个定理。

这个证明独辟蹊径，通过构造一个映射，把一个电子在磁场中的朗道能级结构映射为一个没有磁场的一维紧束缚模型。于是，通过这个映射，一个在拓扑半金属可以映射为一个没有磁场的二维拓扑绝缘体，而原先的那个拓扑电荷正对应着刻画这个二维拓扑绝缘体的拓扑数（见图2）。我们知道二维拓扑绝缘体对应着它边界上无能隙边界态的数目，这是所谓的bulk-boundary correspondence。而这些无能隙边界态映射回我们初始的三维拓扑半金属恰恰正是穿越能隙的那些带。因此，通过一个映射，作者巧妙的将一个三维的有磁场的复杂问题化归为一个二维的没有磁场的熟悉体系，再利用已知的体边对应关系解决了这个难题。

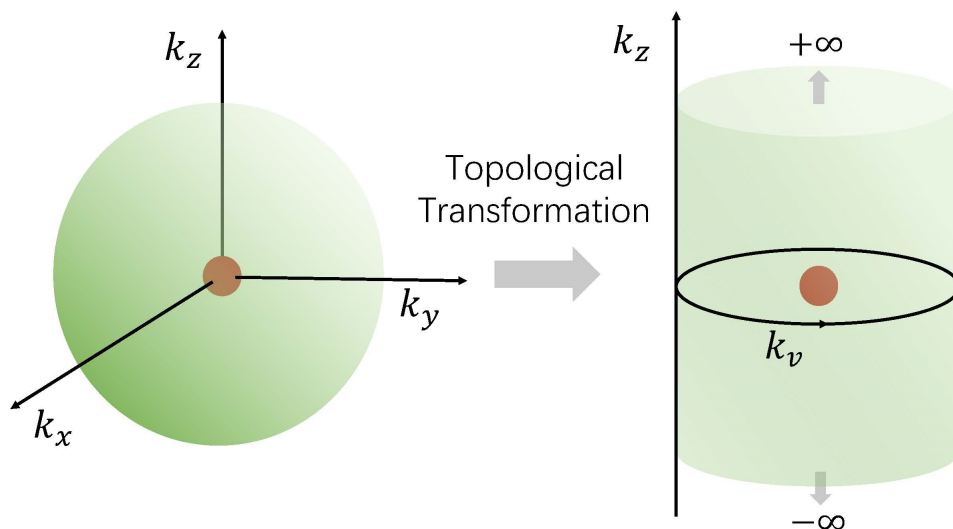


图2：在构造的映射下，三维的拓扑电荷正好对应二维绝缘体的拓扑数。因为两者其实对应着同一个电荷在两个不同的封闭曲面上的flux。左边是球面，右边是圆柱面。具体分析见原文。

这个工作在发表过程中得到了审稿专家的高度评价，例如“**the paper presents an enveloping result, which can envelop what has known from case-by-case studies, the conjecture into a solid equality.** Also one needs to remember that **such general formula or proof in condensed matter physics are quite rare.**” PRL的专家顾问编辑(Divisi Editor)Sumathi Rao教授也指出“This is definitely an interesting result as agreed by all the referees. Although it has been conjectured and assumed to be true, there was no general proof before.” 此项研究为拓扑半金属和拓扑费米子的研究打下了一个坚实的基础。相关论文在线发表在Physical Review Letters 126, 046401 (2021) (doi: 10.1103/PhysRevLett.126.046401)上。

分享:    

上一篇: Nature communications 刊登吴兴龙教授团队“新型氮化碳纳米片高效光催化产氢”工作

下一篇: 《Nature Photonics》发布新闻介绍彭茹雯、王牧和美国NEU刘咏民合作团队的超构表面研究

南京大学

研究生院

本科生招生网

小百合物理版

邮件系统

就业信息网

物理学进展

npj Quantum Mat