

外尔家园

(中国科学院物理研究所 翁红明 编译自 Ashvin Vishwanath. *Physics*, September 8, 2015)

1929年，数学家赫尔曼·外尔通过简化狄拉克方程得到了外尔方程。它的解预言了一种具有手性的无质量费米子。但随后的80多年里，高能实验没有观测到任何可能是外尔费米子的粒子。如今，3个相互独立的研究小组报道称发现了外尔费米子的相似粒子。其中两个团队，分别由新泽西普林斯顿大学的Zahid Hasan和北京中国科学院的丁洪领导，在砷化铟中发现了与外尔费米子行为类似的低能激发。在另一篇文章中，剑桥麻省理工学院的Marin Soljačić与同事在光子晶体中观测到了相似的外尔态。

1937年，外尔方程以另一种完全不同的情形再次出现。Conyers Herring在研究固体中电子能带性质时问：在什么情况下，电子能带具有相同的能量？这样的能级简并态一般在有较高对称性的固体中出现，但他认为当两条能带在某些点(或节点)相互触碰时，就会出现偶然简并。这些点附近的能带，都可用本质上与外尔方程一致的方程描述。这些能带触碰点被称为外尔点，而这些点附近的准粒子就是外尔费米子的“影子”。

固体理论学家数十年来持续探

索外尔点与固体的相关性。1980年代早期一篇文章预言了一个跟手性反常相似的奇异效应——某种电场和磁场组合会导致特定手性粒子多余——这跟外尔费米子相似且可在固体中观测到。最近，随着对受“拓扑”保护材料认识的增加，这种相关性得到进一步确立。在这些固体中，电子就像在动量空间里的一个假想磁场中运动，其量子力学波函数会获得一个相位。跟物理存在的磁场不同，这个假想的磁场(贝里曲率)容许类似磁单极子行为的激发。这些激发是贝里曲率的拓扑缺陷，跟外尔节点是相同的。至此，两个非常奇妙的东西，手性费米子和磁单极子，被发现是相互关联的。它们可在具有某种拓扑特性的材料中存在。在拓扑绝缘体中，能带拓扑性质的表现就是奇特的表面态。通常固体表面的费米面是闭合的线圈，而在外尔半金属表面，这些线圈变成了开放的“弧线”，它们在其体内外尔点处终结。

实验确认具有这样表面态的真实材料落后于理论。一个原因是外尔点的能量要等于或接近费米能，另一个是它只在无时间反演或无中心对称的材料中存在。几年前，理

论学家指出外尔半金属可在没有中心对称且临近拓扑绝缘体态的材料中出现。根据这样的想法，研究人员，包括中国科学院和普林斯顿的小组，使用从头计算的方法预言了一些可能的材

料，其中就有两个团队共同研究的对象——砷化铟。

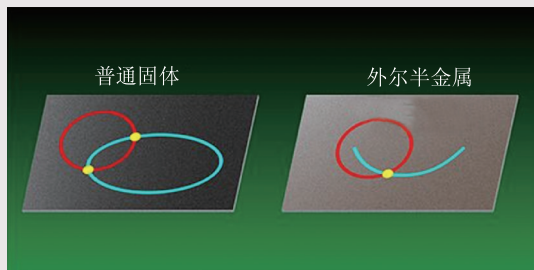
Hasan和丁洪及各自的同事使用角分辨光电子能谱(ARPES)在砷化铟表面探测外尔点的特征，即费米弧。丁洪的团队使用了一个有趣的方案来确认费米弧，把它从普通闭合费米面里区分出来。他们在表面动量空间定义了一个闭合的线圈，然后研究表面费米面穿过它的次数。普通闭合费米面穿过偶数次，而开放费米弧是奇数次。这给出了一个非常清晰的费米弧存在的标志性特征。

Soljačić等不是利用在周期晶体中运动的电子，而是在光子晶体中传播的光。他们在陶瓷薄板上刻蚀出精准排列的孔洞，再把它们堆积起来形成一个无中心对称的三维光子晶体。实现了由电磁波形成的与外尔相似的粒子，通过调节电磁波源的频率可接近外尔点所在的能量。

这些发现使得外尔方程最终进入实验领域，但还有许多工作需要做。在砷化铟中，所有的外尔物理只在很窄的能量窗口里表现出来，需要小心制备样品，以确保费米能在这个窗口里。而发现破缺时间反演对称的外尔半金属可实现跟量子霍尔效应相似电子态。

新物性通常导致新功能和新应用。外尔半金属具有磁场中电阻变小的反常疏运性质。光学外尔体系可用来做大体积单模激光器。如果这些效应和应用能够实现，将是开始于80多年前探求简单而美丽方程的令人意外的非凡结果。

更多内容详见：B. Q. Lv et al. *Phys. Rev. X*, 2015, 5: 031013。



固体表面上的两种费米面(蓝线)