

看到了II型狄拉克费米子

(中国科学院理化技术研究所 戴 闻 编译自 Alexey A. Soluyanov. *Physics*, July 5, 2017)

粒子物理的标准模型描述了所有已知的基本粒子，如电子和夸克。这些粒子在凝聚态物质中，通常具有类似物，其表现形式为集体态或准粒子。一个例子是在石墨烯中的电子态，它的行为像一个无质量的狄拉克费米子——粒子自旋为1/2，反粒子不是它自己。与标准模型相比，凝聚态物理可以提供为数更多的“基本粒子”。这是由于这样的事实：不同于基本粒子，固体中的准粒子不受所谓的洛伦兹不变性约束。违反洛伦兹不变性的准粒子，其动量—能量关系取决于它前进的方向。最近，三个研究组收集到II型狄拉克费米子存在的首批证据，这些准粒子破坏了洛伦兹不变性。这些电子态在标准模型中没有对应物，它们可能与一种新型超导电性相联系。

相对论量子场论为我们理解基

本粒子提供了研究框架。近年来，物理学家们转向低能量的凝聚态系统，作为研究量子场论的替代路径，省去了高能粒子对撞机所要求的高额费用。这些研究揭示了大量元激发，如II型狄拉克费米子，它出现在固体材料中，但不出现在标准模型中。最近的例子还包括几个拓扑相，其中之一是所谓的II型Weyl费米子。一个Weyl费米子是无质量的自旋为1/2的粒子，它的反粒子具有相反的手征。Weyl费米子与狄拉克费米子密切相关：狄拉克费米子可以被看作是两个手征相反的Weyl费米子的叠加，而非混合（因为有晶体对称性的约束）。Weyl费米子没有在粒子物理中看到，但在凝聚态物质中，两种不同的Weyl风格准粒子已在过去几年被观察。

为了理解II型狄拉克费米子和Weyl费米子，我们可以首先考虑I型

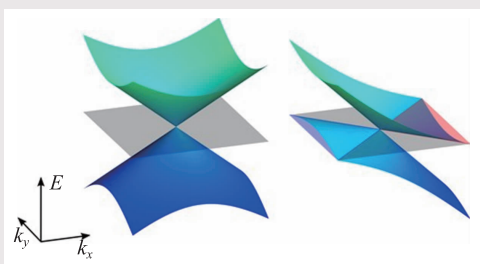
材料，如石墨烯。石墨烯的电子结构其价带和导带表现为圆锥形状，两者在一个单点(称为狄拉克点或Weyl点)相会(见图)。这个锥表示，传导电子的“口袋”是在能量—动量图中，交会点上方的一个小的封闭区域。同样，在价带中空穴口袋是在交会点下面一个紧凑的区域。

对于II型材料，能量方程(或Hamiltonian)是由I型线性哈密顿和一个附加的常数项(但动量依赖)组成，它打破洛伦兹不变

性。违背洛伦兹不变性，在Weyl和狄拉克两种情况下，在能量—动量空间可以由一个倾斜的圆锥表示。在线性近似下，这些开放的口袋导致：II型金属与具有封闭口袋的I型材料相比，其行为差异显著。例如，暴露于磁场的II型材料，它的导电只发生在晶格与磁场电场间有特定取向关系时。

有趣的是，PdTe₂超导温度低于1.7 K。超导电性是另一个凝聚态物质现象，与高能物理有直接模拟。在常规超导体中，电子配对通过声子中介的耦合，生成玻色库珀对(准粒子)，这可以看作是玻色子模拟，就像在标准模型中W粒子和Z粒子。在凝聚态领域，长期的兴趣是超导和电子能带拓扑结构之间的相互作用。库珀对的能带结构是有能隙的，但按照固体能带论，承载超导电性的材料是无能隙金属。

PdTe₂是一种金属材料，它以II型狄拉克费米子的形式，承载超导电性和拓扑态。这可能意味着PdTe₂是“拓扑超导体”。世界各地的研究人员正在试图创建拓扑超导体，因为它们被预期具有在常规超导体中未被发现的独特性能。它们可以沿其表面导热，这可能对热电装置很有用。拓扑超导体还可以派生出称之为任意子的准粒子。凝聚态物质中Majorana费米子就是一例任意子，任意子服从特殊的统计规则，这些规则允许它们执行运算，作为拓扑量子计算机之构件。拓扑量子计算机，与其他类型量子计算机相比，不易于环境退相干。



对于单晶样品进行角分辨光电子能谱(ARPES)测量，可以导出固体中电子能量对波矢的依赖关系。锥形带结构在狄拉克点附近的图：I型材料(左)和II型材料(右)。在I型的情况下，电子和空穴的口袋有点像一对上下顶对顶的雨伞(空穴—蓝色，电子—绿色)。相比之下，II型锥的伞顶是倾斜的，形成了开放的口袋，二者在狄拉克点接触。在右图中，空穴口袋是蓝色伞顶包围的紫色阴影三角区域，而电子口袋是绿色伞顶包围的粉红色阴影三角区域