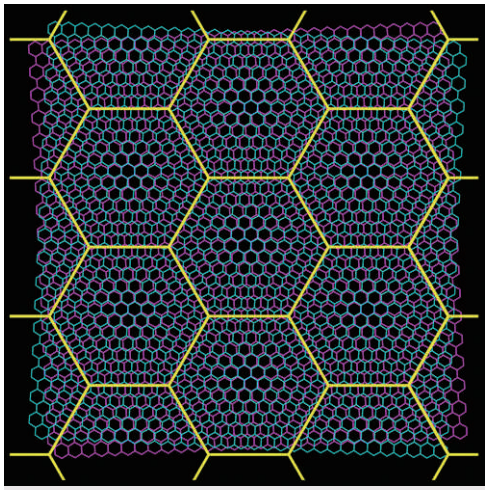
拓扑超导电性可能是一种扭曲

(中国科学院理化技术研究所　戴　闻　编译自 Balázs Dóra. *Physics*, August 23, 2018)

没有人会质疑石墨烯是一种令人兴奋的材料，或许它的发现者值得获诺贝尔奖。如果你是一个强关联电子材料爱好者，石墨烯的单层碳原子原本没有多少吸引力。这一印象在今年早些时候发生了变化，当时有两项关于“扭曲石墨烯”的新实验报道。这种非典型形式的石墨烯由一对紧靠的单层石墨烯片组成，扭转使它们的碳原子稍微偏离上下对准(见图)。第一个实验表明，一个小的扭转角使传导电子形成Mott绝缘体，其中电荷通过强的电子—电子相互作用，“冻结”在特定的晶格格点上。第二个实验表明，利用不同的外加电压控制石墨烯层中的电子密度，可以将绝缘体转变为超导体。这种从Mott绝缘体到超导体的转变表明，石墨烯具有超导电性的非常规形式，就像高温超导体(高T_c)中所发生的那样。



扭曲的双层石墨烯由一对紧靠的单片组成，其中一片相对于另一片略有扭转。扭转对传导电子产生了一个超晶格，其周期远大于单层碳原子之间隔。对于本图所示的扭曲，传导电子可以被看作是在六方超晶格(黄线)或三角超晶格(由黄色六边形的中心连接)中运动

在这些发现的启发下，理论家们现在正把他们的强关联电子模型工具包带到扭曲的石墨烯上，做出预测，反过来预测又会激励实验者。加州大学圣巴巴拉分校的Cenke Xu和圣巴巴拉分校卡弗里理论物理研究所的Leon Balents预测，扭曲石墨烯中的超导电性不仅是非常规的，而且是拓扑的，这是某些量子计算方案感兴趣的性质。

2011年理论科学家探讨了扭转角对材料电子能带的影响。对于一定的扭转角，两层碳原子的某些区域排列得更好，从而导致电子密度的周期性调制。这种“莫尔模式”(moiré pattern，见图)其周期比碳原子之间的间隔长得多，形成了传导电子超晶格。2011年的论文预言，在某些“魔法”扭转角(如1.1°)下，与两个简并超晶格结合的能带，将变得平坦，超晶格中每个格点有两个电子。对于强关联的电子行为来说，这是一种理想的情况：平带中的电子几乎没有动能，电荷之间的相互作用支配着它们的行为。

新的模型假设电子位于平坦的能带内，并且它们通过排斥力相互作用。在两个蜂窝层几乎完全重叠的区域，平带电子的密度最高。对于某些扭曲角，形成了三角超晶格，电子沿有效三角晶格跳跃。模型中的每个电子都可以是四种“口味”中的一种：它可以自旋向上或向下，也可以处于两个可能的能带“谷”轨道之一。电子互相排斥，但只有当它们位于同一格点时才发生。从上述角度，Xu和Balents等在强排斥相互作用的限制下，计算了不同电子密度下材料的基态。

在较高的电子密度下，自旋和谷轨道自由度之间的耦合有利于两种可能的超导基态，它们都对应于非常规的超导电性，因为它们具有d波对称能隙。这些状态中哪一种出现在实际材料中，必须通过实验来确定。但值得注意的是，预言的这两种状态也是拓扑的。例如，一个超导相有8个所谓的Majorana模，它们局限于材料的边缘。这些低能激发是量子计算的兴趣所在，因为与其他量子比特系统相比，它们可以存储对环境扰动不那么敏感的量子信息。研究人员解释了如何在传输测量中区分这两种奇异的基态。

这个新的模型家族给了我们很多探索的机会。如果像预言的那样存在Majorana边缘态，那么它们将可以作为拓扑量子计算和技术的坚实平台。至少，我们可以学会在一个简单的固态系统中操纵状态。另一件有趣的事情是靠近Mott绝缘体的超导电性。将正确的模型与可以调整重要参数的实验结合起来，可以帮助我们更详细地分析这一场景，从而解开高温超导的奥秘。