

在石墨烯中实现手征对称性破缺

(北京大学 王树峰 编译自 Christopher Gutiérrez. *Physics*, May 19, 2021)

石墨烯的迷人特性源于其原子排列成二维蜂窝晶格(图(a))。其具有的对称性导致在能量-动量结构中导带和价带相遇形成两个无间隙点,即“狄拉克”点。它们附近的电子能带呈圆锥形,这意味着电子的行为如同无质量的相对论费米子。除了本征自旋外,电子还具有赝自旋——它描述了两个不同子晶格上的电子振幅,可类比于自旋的量子特性。在布里渊区对角的两个不等价狄拉克点上,赝自旋绕着这两个狄拉克锥体或“谷”以相反的手性旋转(图(b))。在石墨烯中,手性是一个守恒量,因此载流子可以标记为纯右手或左手。当电子穿过石墨烯时,它们的赝自旋和运动方向保持锁定在一起。这类类似于近一个世纪前保罗·狄拉克预测的相对论费米子的动量和内禀自旋之间的关

系,这就解释了为什么石墨烯可成为探讨相对论量子效应的令人振奋的研究对象。

手征对称性如何被打破?在二维石墨烯中,较低的维度允许额外的对称性,因此可以通过多种方式打破手征对称性。一种方法是直接耦合相反手性的谷。这种耦合打破了石墨烯的平移对称性,并导致了一种称为“凯库勒(Kekulé)畸变”的石墨烯键合模式(图(c))。

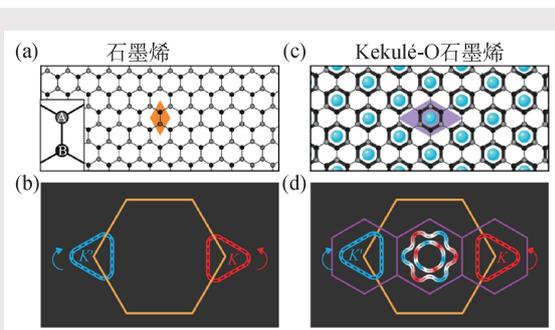
石墨烯中 Kekulé 畸变的直接实验观察很少见。清华大学物理系周树云教授带领的团队报道了通过将锂原子放置在石墨烯层之间来诱导 Kekulé 畸变。锂原子自组装成具有扩大的晶胞的三角形晶格,将 K 和 K' 谷完美耦合,并在布里渊区中心将它们折叠在一起(图(d))。由于这些新的“折叠”狄拉克锥体所

描述的电荷载流子是左右手等价的,因此不再具有手性。嵌入原子的选择在这里至关重要:锂原子更喜欢位于石墨烯空心位置的

中心,而其他原子更喜欢碳的位置。以空心位点(Kekulé-O)为中心的键合模式打开了能隙,并使石墨烯载流子产生质量,而那些以碳位点为中心的键合方式则没有。

为了直接探测石墨烯这种新的对称性破缺相的存在,周树云团队及其合作者采用了多种互补的表面科学实验技术。通过原子级分辨的扫描隧道显微镜,他们直接观测到了交替的大小碳环构成的 Kekulé-O 键合模式。为了探测手征对称性破缺,他们使用了偏振依赖的角分辨光电子能谱(ARPES)。通过调整入射激光源的几种偏振设置,他们直接观测到了石墨烯 Kekulé 相的手征对称性破缺,揭示了混合手性的新狄拉克锥。

周树云团队及其合作者的这些新结果证实了长期以来预测的石墨烯 Kekulé 相的混合手性性质,并强调了 ARPES 探测复杂材料拓扑性质的独特能力。使用嵌入原子在石墨烯光谱中打开能隙并诱导 Kekulé 相,类似于量子色动力学中上夸克和下夸克质量的显式手征对称性破缺。在自然界中,显式对称性破缺导致大约 2% 的质子质量的产生,其余部分来自动态或自发对称性破缺。一个有趣的问题是,类似的自发手征对称性破缺是否会导致 Kekulé 石墨烯中的能隙。在改变锂和电子浓度的同时仔细测量能隙可能有助于回答这个问题。因此,带有插入原子的超晶格为石墨烯中的能带工程产生新的物相提供了一个十分有趣的平台。



(a) 石墨烯晶格和晶胞(橙色菱形),插图显示了A和B子晶格;(b)石墨烯布里渊区(橙色六边形)中每个狄拉克点(K 和 K')周围的石墨烯赝自旋手性示意图;(c)具有锂原子晶格的石墨烯产生新的Kekulé-O键模式(紫色菱形);(d)Kekulé模式导致狄拉克锥叠加在新的、较小的Kekulé布里渊区(紫色六边形)上。新的狄拉克锥同时具有左右手性,因此不再具有确定的单一手性