

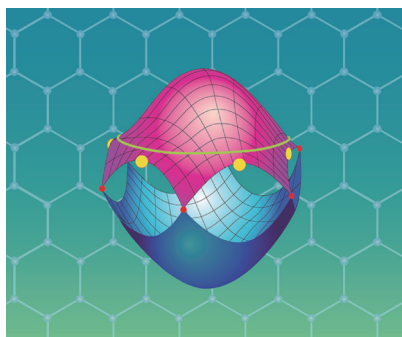
# 石墨烯掺杂研究达到新水平

(中国科学院理化技术研究所 戴 闻 编译自 Michael M. Scherer. *Physics*, October 19, 2020)

关于掺杂石墨烯的新实验，令这种二维材料超越了“Van Hove 奇点”，进入到可能会存在奇异物质态的区域。

石墨烯以其独特的电子特性而闻名，例如狄拉克点，在材料能带结构中的这个点，电子行为类似于高能粒子。一个载流子通过狄拉克样式的石墨烯，就会像一个粒子，几乎不与它的许多同类相互作用。现在，Philipp Rosenzweig 和他来自德国马克斯·普朗克固体研究所的同事们，在石墨烯中添加了过量的电荷载流子，将载流子的能量从上述狄拉克点移动到范霍夫(Van Hove)点，甚至更高。据报道，这是第一次。

Van Hove 点具有大量的态，这为电荷载流子提供了充分的相互作用、协同，以及形成集体物质态的机会，如磁性和超导电性。这种集



石墨烯的电子能带结构展现出所谓的 Van Hove 奇点，即态密度发散的点。这种发散发生在多个 Van Hove 点(黄色点)，它们的能量高于众所周知的狄拉克点(红色点)。当石墨烯被掺杂时，费米能级(绿线)向上移动，到达 Van Hove 奇点或更高的位置，导致增强的多体效应，从而产生集体态，诸如超导电性和磁性的非常规形式

体态不能用单粒子图像来描述。令人兴奋的是，理论预测的掺杂石墨烯包括的奇异态，如高温手征拓扑超导，现在可以用 Rosenzweig 演示的可控掺杂技术来探索。

在石墨烯等二维材料中，它们能带的特征是电子态密度存在发散的点——称为 Van Hove 奇点。如此多的状态集合，增强了多体相互作用的影响，并支撑物质集体态的形成。但是，具体是哪一种集体态是不确定的，因为在 Van Hove 奇点，磁性和超导电性(以及其他有序相)之间存在着微妙的竞争，而“赢家”取决于能带的精细形状。这种类型的竞争，可能有助于解释高温超导体和魔角双层石墨烯中观察到的超导电性。在非常规超导体的 Van Hove 场景中，人们认为电子之间的排斥相互作用会引起涨落——例如导致自旋波——这反过来又会引起吸引相互作用。这些吸引成分可以促进库珀对的形成，从而促进产生超导电性。测试这种情况，是将石墨烯掺杂到高水平的主要动机之一。

石墨烯是研究 Van Hove 超导电性的一种很有前途的候选材料。它的六方对称性，在磁性和超导电性之间的平衡中，绝对地有利于后者(即超导)。在原始单层石墨烯中，费米能级(在零温下表征最高填充电子能级)，与 Van Hove 点相对较远(几个电子伏特)。然而，Van Hove 点可以通过化学掺杂而达到，例如通过插层。通过在石墨烯单层和衬

底之间插入某种类型的原子，使电荷载流子从插层原子转移到石墨烯。根据插层原子的选择，转移电荷的数量是不同的。这种化学掺杂技术可以使石墨烯中的费米能级接近 Van Hove 点。

在新实验中，Rosenzweig 和同事们通过镱(Ytterbium)插层来研究掺杂石墨烯单层。为了从电子能带结构的角度分析掺杂的结果，他们使用了角分辨光电子能谱(ARPES)，其动量分辨率高，工作于低温 20 K。实验观察到，镱和石墨烯之间的电荷转移导致石墨烯的能带被填满，将费米能级从狄拉克点移动到 Van Hove 点。光电子能谱数据还表明，石墨烯的导带被强烈地扭成了一个平坦的带，延伸到宽范围的晶体动量空间。此外，费米能级被钉在 Van Hove 点上，产生了一个扩展的 Van Hove 奇点。

然而，研究人员并没有止步于 Van Hove 奇点。他们通过继续沉积钾在石墨烯片上，提供了额外的电荷转移。这种混合掺杂过程导致了电荷载流子密度的进一步增加，最终使费米能级从 Van Hove 奇点退钉扎。这些掺杂技术为在 Van Hove 点附近系统地探索石墨烯奠定了基础。

此外，扩展的 Van Hove 奇点可能导致比预期更高的态密度，这有可能使超导态具有更高的转变温度。什么样的超导电性可能存在于 Van Hove 掺杂的石墨烯宿主？答案可能是手征拓扑超导。这对于未来的技术应用，例如量子计算，前景广阔。