

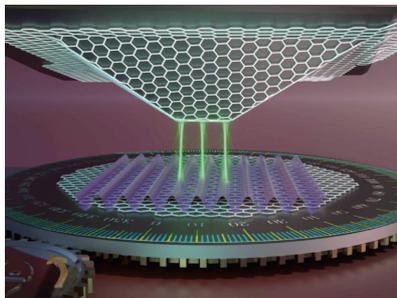
# 量子转角显微镜

(北京大学 王树峰 编译自 Susan Curtis. *Physics*, November 5, 2024)

一种新型的“转角”显微镜可能会为研究层状二维材料的奇异电子行为提供新的手段。

将两层石墨烯叠在一起，并在它们之间保持一个“转角”，就会形成一种表现出一系列新奇电子现象的材料，例如具有无阻抗电流的超导体和具有特殊电流传导方式的奇异金属。物理学家只需改变转角石墨烯(TBG)双层之间的相对取向，就可以探索这个内涵丰富的电子学世界，从而创造一个全新的研究领域，称为转角电子学。

这种新奇的现象在2018年首次被观察到，它被认为源于电子与声子的强耦合(声子是晶格的量子化振动)。然而，由于缺乏直接探测转角石墨烯中声子的实验工具，理解这种相互作用的努力一直难有进展。最近，一个国际研究团队提出了一种新型显微镜，展示了一种研究转角石墨烯和其他转角二维晶格(统称为莫尔系统)中电子—声子耦合的方法。这类研究可能有助于揭示转角石墨烯中超导性的起源，同时也为开发诸如超导开关等新型器件提供指导。



量子转角显微镜使电子能够在二维材料的相邻层之间的多个位置同时隧穿

DOI: 10.7693/wl20250210  
CSTR: 32040.14.wl20250210

这项研究关注的是一种名为量子转角显微镜(QTM)的装置，该装置于2023年由以色列魏茨曼科学研究所的 Shalal Ilani 领导的团队首次展示。电子具有波动性，这种量子特性使它能够在多个位置。与其他在单一位置检测电子的成像工具不同，QTM 探测电子的这种波动行为。

这种装置基于原子力显微镜，但尖锐的探针被替换为顶端平坦的金字塔形探针，探针表面覆盖了一层二维材料(如石墨烯)，样品则是放置在基板上的同种或异种二维材料。当探针表面与样品接触时，它会形成一个平坦的界面，电子可以通过多条不同的路径在其间隧穿。Ilani 解释说：“通过为电子提供多条进入样品的路径，尽管不知道它实际穿过的位置，但我们让电子保持了其脆弱的波动性质。”而且，像其他波一样，电子可以产生干涉效应。

在 QTM 中，干涉的结果是隧穿只发生在探针和样品中的电子波函数具有相同动量时。它由依赖于两种晶体结构之间角度的特定电子态来满足，这个角度可以通过旋转 QTM 中的探针进行改变。在他们的实验中，研究人员可以连续地改变转角角度以及探针和样品之间施加的偏压，同时记录隧穿电流的变化。这些测量允许电子态的能量作为其动量的函数被绘制出来，从而展现出材料的关键量子特性之一：能带结构。

初步实验表明，在室温下，QTM 可以用来可视化单层石墨烯和

转角双层石墨烯中的电子能带，甚至可以研究在施加大局部压力时转角石墨烯中低能带的逐渐平坦化。在最新的研究中，由柏林自由大学 Felix van Oppen 领导的理论团队与 Ilani 合作，探索了在低温下 QTM 如何用于研究转角石墨烯和其他莫尔系统中电子与声子的耦合。

他们的想法是将偏压保持在电子可以直接从探针隧穿到样品的阈值以下。在这种状态下，隧穿只能在通过声子提供额外的动量时发生。这些声子与双层系统中存在的各种振动模式相关，每种模式都有其特征能量。这种技术将揭示声子能量的谱，再通过理论框架提供的方法来分解不同过程对声子谱的贡献。他们的分析表明，应该可以量化每种声子模式的电子—声子耦合强度，而这对于其他表征技术来说则非常具有挑战性。

“这对于理解声子在转角双层石墨烯等莫尔系统中的物理过程至关重要”，哥伦比亚大学的理论学家 Hector Ochoa 评论道。他认为这项工作中开发的理论模型，不仅对于从 QTM 测量中提取有用的数据很有价值，而且为物理学家思考转角二维晶格中的声子构建了框架。

初步实验表明，低温量子转角显微镜可以用来探测转角双层石墨烯中的电子—声子耦合机制。这些早期发现已经为与转角石墨烯中的超导和奇异金属行为相关的耦合过程提供了见解，并且这些新的实验和理论技术可能会用来研究其他莫尔系统。