

# 科技前沿信息

第16期 (总第136期)

上海科技成果转化促进会  
上海科学技术情报研究所 主办

2019年8月 下旬刊

## 【专题报道】

### 魔角石墨烯开启全新的神奇领域

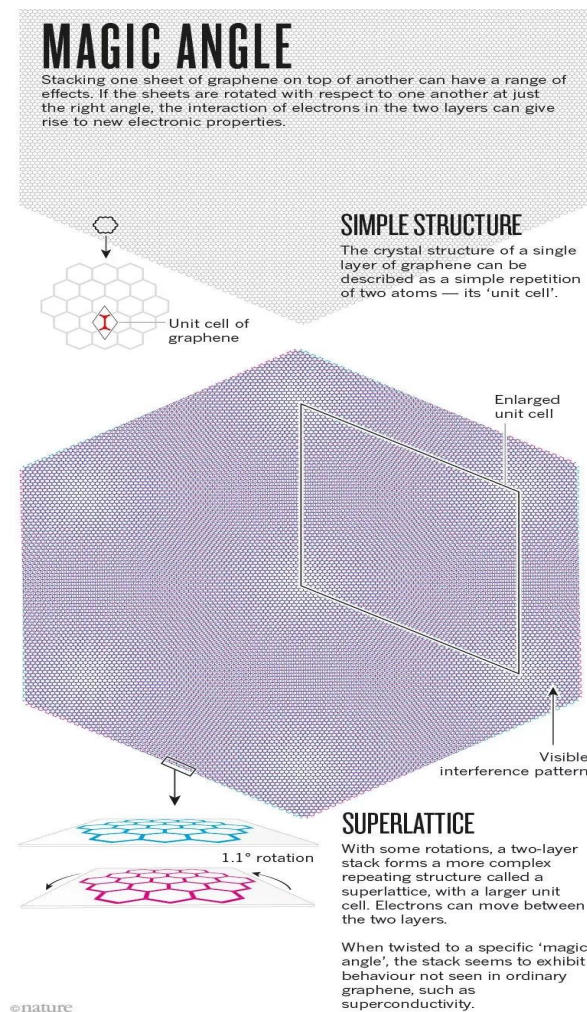
[导读] 2018年，MIT物理学家Pablo Jarillo-Herrero带领他的研究团队报道了一个全新的发现，把石墨烯推向了新的发展高度。

### 魔角石墨烯开启全新的神奇领域

#### 一、魔角石墨烯的概念与发现

石墨烯是碳原子组成的蜂巢状晶体，本质上就是铅笔中黑色的片状石墨，但是厚度只有单个原子，是一种二维材料。单层的石墨烯在超低温下具有超导电性。如果将两层石墨烯扭转成一定角度，会发生什么呢？

去年，麻省理工学院(MIT)科学家巴勃罗·哈里略-埃雷罗(Pablo Jarillo-Herrero)带领的团队发现，如果将双层石墨烯扭转成特定角度(约1.1度)——被称为“魔角”石墨烯——材料表现为莫特绝缘体(Mott insulator)。然后向这种绝缘体施加微弱的电场，也就是掺杂电子，双层石墨烯就会表现出非常规超导性，类似于高温超导铜氧化物。这种“魔角”石墨烯体系的发现，开创了“转角电子学”全新领域。



相关成果论文于 2018 年 3 月发表在英国《自然》杂志上。论文的第一作者是麻省理工学院在读博士——22 岁中国青年曹原，他因此入选了《自然》杂志评出的 2018 年度科学人物。英国物理学会主办的《物理世界》杂志评出的 2018 年十大突破中，美国麻省理工学院主导的团队用“魔角”石墨烯实现超导位居榜首，被认为在量子计算等领域有巨大应用潜力。

## 二、魔角石墨烯的神奇之处

1911 年，荷兰物理学家 Heike Kamerlingh Onnes 惊讶地发现，当汞被冷却至接近绝对零度（零下 273.15 摄氏度）时，电子可以通行无“阻”。他将这个“零电阻状态”称为“超导电性”。随后，物理学家就不断地想要找到高温超导材料，以应用在日常生活之中。然而，

大多数材料只有在接近绝对零度时，才会转变为超导体。即使是所谓的“高温”超导体也只是在相对意义上的，目前零电阻导电的最高温度约为零下 140 摄氏度。如果有哪种材料能够在室温下表现出超导电性，就可以为能量传输、医用扫描仪和交通领域带来革命性的改变。

超导体大致可分为两种类型：可被主流超导理论解释的常规超导体，以及无法用主流理论解释的非常规超导体。最新的研究结果显示了石墨烯的超导行为是非常规的，并且表现出一些与另一种被称为铜氧化物的非常规超导体相似的性质。这种复杂的氧化铜可以在绝对零度 133 度之上导电。三十年来，尽管在寻找室温超导体的路上，铜氧化物一直是物理学家所关注的焦点，但其背后的机制依旧使他们困惑。与铜氧化物相比，堆叠的石墨烯系统相对简单，并且物理学家对它有着更好的理解。

此次发现的魔角石墨烯对于理解高温超导电性至关重要。尽管该系统仍然需要被冷却至绝对零度以上 1.7 度，但结果表明了它或许可以像已知的高温超导体那样导电。这项研究的突破在于，利用成一定旋转角的两层石墨烯观察到与铜氧化物超导类似的现象。人们以前没想到可以这样旋转，这提供了一种新的材料调控方式。尽管石墨烯要在超低温下才会表现出超导电性，但它仅需电子密度是常规超导体的万分之一，就能在相同温度下获得超导能力。在常规的超导体中，这个现象只在当振动允许电子形成一对一对时才出现，成对的电子会稳定它们的行进路径，使它们能在零电阻的情况下流动。但由于石墨烯中可用的电子是如此之少，因此它们可以成对的事实表明系统中的相互作用要比在常规超导体中发生的强的多。

物理学家认为，石墨烯的非常规超导有巨大应用潜力，包括用于制造边界存在“马约拉纳费米子”的拓扑超导态等，这种态对环境的扰动表现出更强的稳定性，非常适于制造量子计算机的量子比特。

### 三、魔角石墨烯研究的最新进展

2018年8月,《自然》(Nature)连发3篇研究论文,并配了1篇新闻与观点(NEWS AND VIEWS)的专业解读,加上arXiv预印本上早先的一篇文章,近期全球4个研究团队独立地运用谱学技术对魔角石墨烯的特殊行为进行了阐述。

4个研究团队都是使用扫描隧道显微镜(STM)来测量原子级结构和电子能量分布。其基本原理为:STM的导电针尖扫描样品,根据所施加的电压是正还是负,电子从针尖隧穿到样品,或者从样品隧穿到针尖,所得到的电流随针尖位置的变化对样品的形貌进行编码。电流随电压变化,代表了样品状态局部密度——在给定能量下电子可以占据的量子态数量。

利用STM技术,研究团队使魔角石墨烯中的莫尔条纹变得可视化,从而可以通过观察不同方向的条纹间距的变化来量化系统中的应变变量。该方法还揭示了由两个单层石墨烯片的耦合产生的碳原子的空间重排。这些细节对于精确理解电子能带结构至关重要,也是精确建模绝缘和超导相必不可少的第一步。

研究团队发现,态密度和有多少电子占据扁平带紧密相关,该结果直接展示出系统中电子之间相关性的重要性。特别重要的是,在低能量情况下,态密度受到电子浓度有关的抑制,这一发现确立了电子特性与电子传输之间的直接联系。

总之,这四篇论文表明,STM测量魔角扭曲的双层石墨烯可以为对称性破坏和电子相关性的局部效应提供有价值的见解,并在未来的STM研究提出许多直接的开放性问题。这个年轻而富有活力的研究领域充满了令人兴奋的惊喜等待被发现,谱学技术将继续在这一领域中发挥关键作用,并可能成为强相关物理论的通用测试平台。