

激光调制下的电子显微

(北京大学 王树峰 编译自 Herman Batelaan. *Physics*, September 26, 2022)

一种利用激光来产生电子束并进行整形的新方法可以提高电子显微镜的分辨率。

电子显微镜为我们提供了许多从亚微米到原子尺度精彩的图像，例如微小生物和纳米机器人的照片，以及原子离域过程的动态影像等。正如物理学家费曼的名言“深入研究会领略无限风光”，丰富多彩的微观世界正等待着人类的不断探索。维也纳大学的 Thomas Juffmann 及其同事的进展可能会打开一扇通向微观世界的新视窗。利用短激光脉冲，研究人员在电子束中印上了条形、新月形甚至笑脸的图案。这种可编程的电子束整形会更好地聚焦电子，从而应用于超快显微技术，或在生物样品电镜成像中减少损伤。

尽管电子显微镜领域相当成熟，但仍面临挑战，如成像太模糊、剂量太致命、速度太慢。模糊来源于电子透镜结构的不完美所导致的像差，电子与显微镜结构相互作用导致的量子退相干也限制了空

间分辨率。致命性是指电子对生物样品的损害。诚然，电子显微镜可以对生物分子进行成像，并且这一技术获得了 2017 年诺贝尔化学奖。但电子显微镜还无法对活体和具有功能活性的组织进行成像，这是因为生物体无法在曝光所需的电子剂量下存活。速度慢是指电子显微镜无法捕捉发生在阿秒时间尺度上的原子行为。尽管飞秒电子显微镜已经实现飞秒成像，但同时具有原子尺度的空间分辨率和阿秒的时间分辨率仍然难以企及。

为了应对这些挑战，电子显微镜领域需要创新的想法。Juffmann 和他的同事们结合了两种已有的电子束技术。第一种是用飞秒激光脉冲从金属纳米尖端中抽出电子(2006 年实现)。第二种是用激光操纵自由电子的量子相位(2001 年实现)。他们又额外采用了一个设计，在激光中写入一个图案。

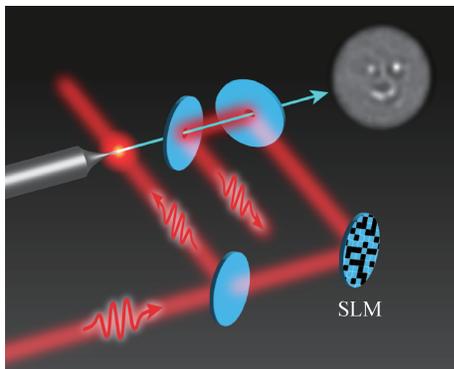
实验中，他们首先向金属尖端发射激光脉冲，脉冲的电场导致一簇电子直接从尖端发射出去。通过仔细地控制延时，他们用另一束激光脉冲穿过电子束来实现调制。这种调制基于受激康普顿散射的过程实现，它改变了电子的相位，从而影响了它的运动。卡皮查和狄拉克于 1933 年首次预测了这种相互作用。

卡皮查—狄拉克效应与光子的数量成正比，因此在脉冲

的特定区域中光越强，该区域的电子受到的影响就越大。Juffmann 及其同事利用这种效应来给电子束整形。他们在第二束激光脉冲的路径上放置了一个可编程的空间光调制器，它可以控制激光强度在空间的变化，从而实现操纵电子。研究人员展示了对电子束中数百个“像素”的控制，从而创建例如笑脸和十字架这样复杂的图案。十字架图案与解决像散有关，像散是电子显微镜始终需要校正的像差之一。

这种新技术的出现可以解决哪些问题呢？电子叠层成像是一种通过分析目标多次曝光的数据来生成图像的方法。这种技术不使用透镜，但它需要对输入电子束进行特定的控制，这正是新的整形方法可以提供的。另外如上所述，当前的分辨率受到透镜的未校正像差和显微镜中附近材料相互作用产生的退相干的限制，使用激光操纵电子运动同时避免了这两个问题。

这项新技术也可以在电子鬼成像领域应用。在鬼成像中，待成像物体被一系列预设的电子图案照射，如果能实现输入模式的选择，就可以实现用更少的电子对目标物体照射。Juffmann 及其同事利用激光整形产生的初始图案可以获得更高的空间分辨率。如果让高分辨率鬼成像与保护生物细胞的新方法相结合，例如用石墨烯层覆盖生物标本，可能使我们更接近在电子显微镜下观察活体组织的梦想。



一束激光脉冲从金属尖端(左)抽出电子，而另一束延迟的激光脉冲被空间光调制器(SLM)整形后，穿过电子的路径，并将图案转移到电子束中