

观察超导体中的快速涡旋运动

(中国科学院物理研究所 汪力 编译自 Rachel Berkowitz. *Physics*, July 19, 2024)

一项新技术展示了超导体中涡旋高速振荡的运动轨迹，其有效质量仅为预期的万分之一。

在许多超导体中，施加足够强的磁场会使超导电子产生电流涡旋，它们随着稳定的屏蔽电流一起运动。为了进一步了解这些涡旋的动力学行为，研究人员已经将涡旋的轨迹可视化：它们在电磁驱动下以近太赫兹频率振荡。通过观察皮秒时间尺度下的涡旋运动，发现在这些条件下，涡旋的有效质量是预期的1/10000。这一结果对于发展强电流超导器件可能具有重要意义。

当超导体中传输的电流超过某一极值时超导性将被破坏，这是强电流器件发展的一个重要问题。许多研究人员认为涡旋(在没有外部

磁场的情况下也会形成)是这种所谓的“电流诱导淬灭”的来源。但是，确定涡旋如何导致超导性淬灭需要更深入地了解涡旋，这首先需要测量它们的运动。

几年前，东京大学的 Sachiko Nakamura 和她的同事开发了一种检测超导材料氮化铌中涡旋运动的技术：在超导薄膜中注入电流以产生涡旋，然后用红外脉冲照射薄膜，分析从薄膜出射的脉冲，可以发现脉冲中包括一个频率是输入频率两倍(二次谐波)的分量，该团队将二次谐波的产生归因于一维涡旋振荡。

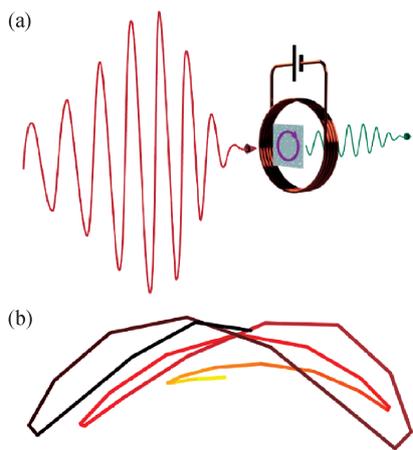
Nakamura 和她的同事们现在已经把这一技术发展到了测量二维涡旋运动，研究人员制备了38 nm厚的铁基超导体 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ (FST) 薄膜，并将其冷却到超导转变温度(16.5 K)以下。由线圈产生的磁场在薄膜中引起涡旋，同时诱导一个直径几毫米的环形屏蔽电流。与之前的实验类似，研究人员用20 ps红外(0.3 THz)脉冲照射薄膜，并在透射光谱中检测到二次谐波，包括平行和垂直于入射脉冲偏振的两个偏振分量。

他们使用约1 mm尺寸的光束探测屏蔽电流环附近的区域，然后通过分析透射波形，以重构该处一个典型

涡旋的运动。该团队发现了一个振荡的、大致抛物线形的轨迹，而不是一条直线。这种轨迹来源于磁性涡旋和屏蔽电流之间的相互作用。Nakamura说，发现这种运动是这项工作中最令人兴奋的部分，“感觉就像我们在直接观察涡旋的二维运动”。

得到的测量数据表明，这些涡旋的移动速度高达300 km/s，比预计的要快得多。在日本京都大学研究太赫兹技术的 Itsuhiro Takeya 表示，根据其惯性得出的涡旋有效质量远低于预期。他说：“一个涡旋的质量过去被认为相当于10000个自由电子，但这些结果表明，它与单个自由电子具有相同的数量级，令人非常惊讶。”这一发现支持了一种观点，即快速振荡的涡旋会留下许多最初被束缚在其中的非超导电子，它们并没有参与振荡过程。Nakamura指出，这种情况意味着，在使用涡旋理论处理涡旋运动问题时，可以排除那些非超导电子的影响。

Takeya认为，在皮秒时间尺度上实现超导涡旋运动的可视化是一项非常重要的成就。在德国多特蒙德技术大学研究关联量子材料的王哲对此表示赞同。他说：“在文献中并不经常报道太赫兹二次谐波的产生。”这项新研究不仅报道了在一类新型超导体中发生的这一现象，还利用它来研究涡旋动力学等特性。Takeya说：“由于其他实验方法已经观察到此类材料的一些独特性质，我们希望它们与这种小涡旋质量之间的关系能够得到阐明。”



探测涡旋。(a)在线圈提供的外部磁场下，超导薄膜(灰色)中形成涡旋，并产生屏蔽电流(粉红色)。通过超导薄膜透射的红外脉冲提供了有关涡旋速度、质量和位置的信息；(b)约9 ps红外脉冲作用下的涡旋轨迹。图中颜色表示时间，从黄色(最早时间)到黑色(最晚时间)。该轨迹的水平范围约为1 μm ，而垂直尺度被拉伸，范围仅为0.1 μm 左右