

水中的拓扑波

(中国科学院物理研究所 汪力 编译自 Filippo Cardano *et al. Physics*, January 31, 2024)

类似于在光学、弹性和量子系统中发现的现象，水波通过干涉也可以产生拓扑结构。

当风或其他运动扰乱平静的水面时，流体微团会从其平衡位置产生位移。这种扰动以可见的波纹或波浪的形式在水面上传播，形成人们熟悉的线性 and 圆形等图案。在最新的研究中，日本理化学研究所 (RIKEN) 的 Daria Smirnova 等人发现了更为奇异的水波特征，呈现出以前在光学、弹性和量子系统中观察到的拓扑结构，并系统地研究了这些拓扑波如何直接通过实验产生，使水波可能成为探索普遍拓扑波现象的实用载体。

Smirnova 及其同事的工作专注于拓扑结构在水波中的产生和测



图1 水面波在相遇时可以形成新的波形。理论表明，通过干涉，水面上平面波的组合也可以产生拓扑结构，包括涡旋和斯格明子

量，特别是在水的表面波中产生和出现的可能性。他们的研究基于一种生成拓扑波的常用方法：组合一组合适的平面波，其干涉导致波场排列形成非平凡的拓扑结构(图1展示了两个水波的典型干涉图样)。研究人员首先设想一组无限多的从中心点向各个方向向外发射的平面波，这些波的振荡以顺序的方式相继延迟发射，它们之间的干涉即可产生一种称为相位涡旋的拓扑结构。

在标量波的情况下，相位涡旋是振荡场的零振幅点。如果以这个点为中心画一个圆(或任何闭合曲线)，就会发现波场振荡之间的相对偏移等于波浪周期的整数倍。这个整数被称为拓扑荷，它的值与该波场携带的角动量有关。对于水中形成的三维波，波动方程表明它们的面内位移分量也带有相位涡旋。Smirnova 等人得到的结果是，这种水波的三维包络揭示了与拓扑荷关联的空间图样，其峰和谷位于对称的角度位置(图2)，并且随着时间旋转。这种旋转与流体动力学涡旋(稳

定的水流沿着涡旋流动)不同，这里的情况是，由于存在角动量的轨道分量，呈现的旋转是缓慢漂移的整体图像；而在局部，粒子形成闭合的椭圆轨迹，它们的周期平均角动量垂直于椭圆，代表波场的自旋密度。

在只有三个波的更简单的场景下，Smirnova 和同事的干涉方案可以形成粒子振荡的周期性排列，呈现出斯格明子 (skyrmion) 和半子 (meron) 晶格的拓扑结构。对于晶格中的单个晶胞，当瞬时位移矢量指向所有可能的空间方向时，就出现了斯格明子。相同的纹理表征了陈绝缘体能带的形成，这是量子霍尔效应的基础。在同一构型中，波场的三维自旋密度分布在仅覆盖所有可能方向的一半区域时，形成半子的结构。

Smirnova 等人的研究方案可以在水箱中直接观察拓扑效应，而不同于光学或声学等领域相应的研究中需要借助于间接检测方法。在这种简单可控的系统中探测拓扑波结构，可以直接观察波的振幅、相位、自旋和轨道角动量，并将其与水的力学性质相联系，为在实验室环境下制备和研究复杂的波场系统提供了新的机会。得益于这些波浪系统的卓越可控性，通过控制振荡延迟来创建和组合多个波，研究其中的复杂拓扑结构，有可能发现不同系统中存在的普遍现象，以便在其他波动系统中复制和开展研究。

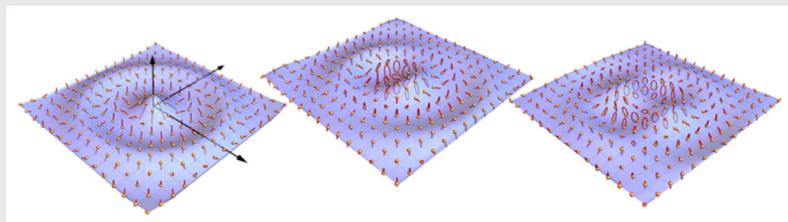


图2 一组无限多的平面波可以通过干涉产生具有不同拓扑荷的圆形水波涡旋，水在表面局部区域的瞬时运动轨迹显示了所产生波动的三维空间位移