
科学家发现新型多边形法拉第重力波

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/25261.html>

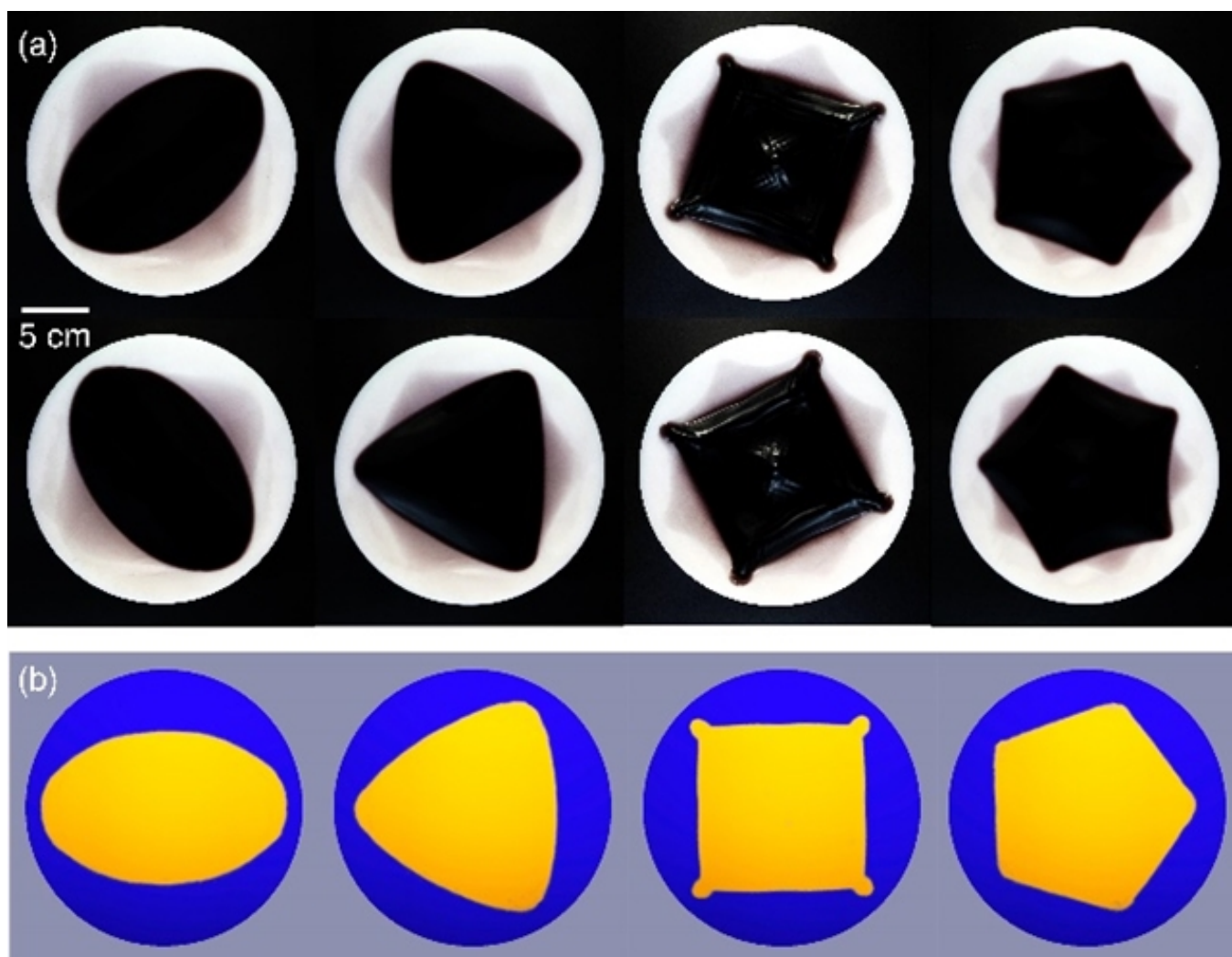
本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

科学家发现新型多边形法拉第重力波。北京时间2023年12月8日，南京大学声学研究所王新龙教授实验室借助于经典的法拉第实验，发现了一种新型的波动模式——多边形浅水重力波模式，并揭示了其与玻色爱因斯坦凝聚的集体激发态之间的类比。相关研究成果以Polygonal patterns of Faraday water waves analogous to collective excitations in Bose – Einstein condensates为题发表在Nature Physics上。

南京大学声学研究所王新龙教授为本文通讯作者，其指导的博士生刘昕昀为本文第一作者。

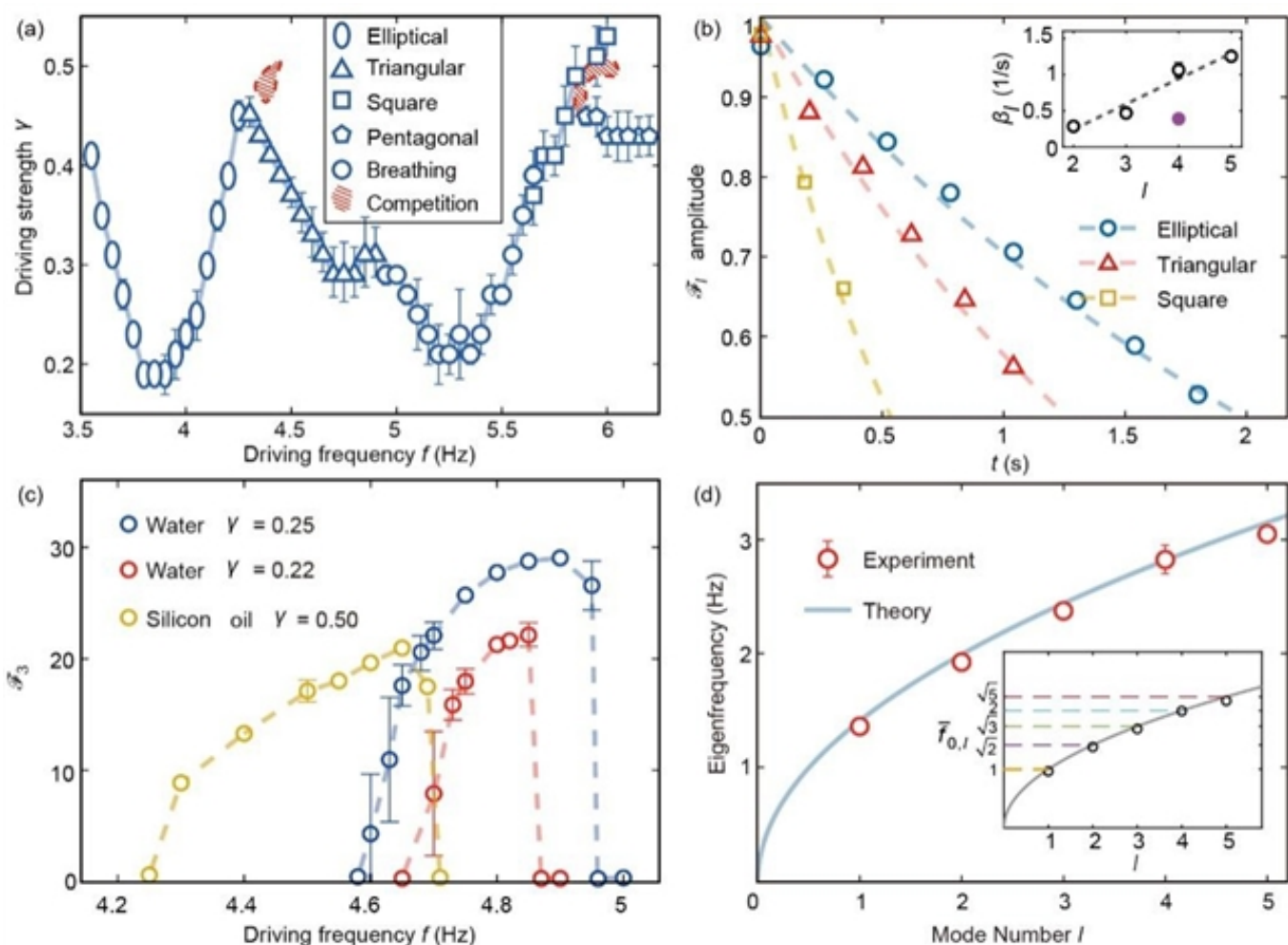
波动斑图（wave patterns）其实是波动模式的非线性表现形式，是空间呈现某种有序几何结构而时间振荡的波动图案，往往由系统对称性破缺而自发形成，广泛存在于自然界和物理系统中。法拉第实验因其丰富多样的波动现象，长期以来是研究波动斑图及其形成机制的有效途径之一。业已表明，在垂直振动激励下，液滴、水团、甚至粘性硅油等均会呈现多边形的波动斑图。这类多边形斑图的空间尺度较小（波长约为毫米量级），外观圆润光滑，属于表面张力驱动型斑图。相对地，大尺度的重力驱动型多边形斑图迄今未有报道。

论文作者在法拉第实验中，采用抛物底面的容器取代通常使用的平底容器，首次实验观测到了容器内水重力波的多边形斑图(图一a)。这些图案棱角分明，空间尺度远远大于毛细波长，属于新型的浅水重力波或潮汐波。其之产生源于凹底容器中水波l-阶角向模式的线性参量失稳，进而演化为具有l-重对称性的多边形（非线性模式）。进一步的实验研究表明，类似的多边形斑图也可以存在于半球、浅碟等凹底水容器中。基于Navier-Stokes方程的数值模拟，作者成功地复现了实验所观察到的现象(图一b)。



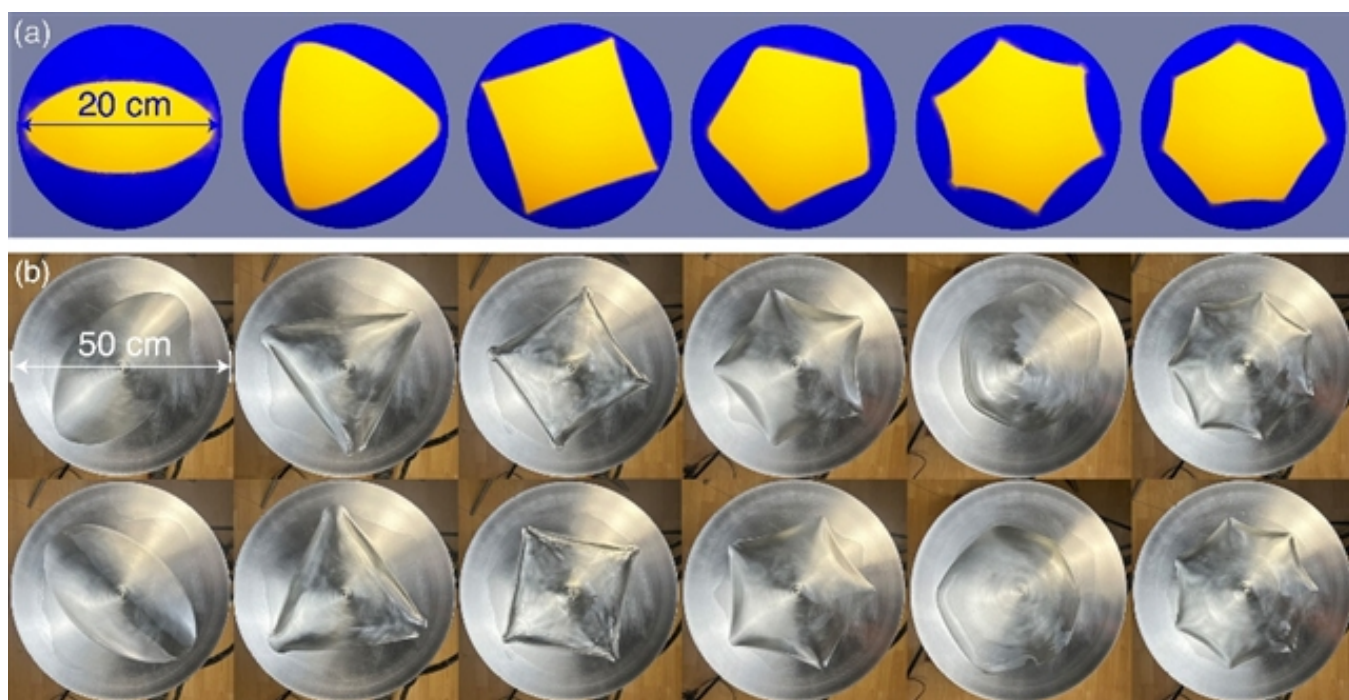
图一：稳态多边形水波振荡斑图。（a）实验照片：第一行从左到右依次为椭圆形（ $l=2$ ）、三角形（ $l=3$ ）、四边形（ $l=4$ ）和五边形（ $l=5$ ）；第二行是经半个振荡周期后与第一行对应的波动形态。所用抛物底面容器的口径为20 cm，底面最深4 cm；容器内盛有最大水深为2cm的纯净水（为了增强照片的视觉效果，水中添加了少许墨汁）。（b）数值模拟得到的多边形模式（对应（a）中的实验参数），与实验所观察到的完全一致。

实验同时测量了这些斑图（模式）的驱动参数阈值和一些重要的性质（见图二）。从驱动参数（驱动频率 f vs. 驱动强度 γ ）的阈值图（图二a）可知，多边形斑图形成本质是参量激励下静水面失稳（参量不稳定性）的结果。而从频响曲线（图二c）可知，水波的此种振荡模式具有显著的非线性硬弹簧特性。此外，实验测得的模式线性简正频率 ω_l 与多边形阶数 l 满足平方根的频散关系（图二d），与早年Lamb线性理论所预测的完全一致。



图二：实测多边形图案的激励参数和响应特性。(a) 驱动参数（频率 f -强度 γ 的）阈值图，(b) 驱动停止后各模式的衰减曲线（从中可间接测得阻尼系数 β_l ），(c) 三角形模式（ $l=3$ ）的频响曲线（纯水：蓝色与红色圆圈，硅油：黄色圆圈），(d) 频散关系，即模式线性频率 ω_l 与模式阶数 l 的关系。

从图二 (c) 可知，阻尼对模式的频响特性影响甚大。研究表明，摩擦阻尼还严重地抑制了高阶多边形模式 ($l>5$) 的激发；而其中，表面张力所致的接触线摩擦是产生阻尼的主因。为了排除其不利影响，论文作者对理想流体进行了数值模拟，观察到了高阶 ($l>5$) 多边形模式的激发(图三a)。作者受此启发，特地打造了口径50cm的中式不锈钢锅（底面近乎抛物面）作为容器，以尽量降低水表面张力和阻尼效应。果然，除了激发出棱角更为分明的低阶多边形，在此新容器中成功地激发出了高阶的六、七边形（图三 b）。值得指出，六边形模式 ($l=6$) 由于与液晃模式 ($l=1$) 的强烈耦合，在振荡几个周期之后便失稳。实验还表明，只要驱动频率 f 介于两个线性模式（例如， $l=4,5$ ）的简正频率之间，且驱动强度 γ 取值适当，则相邻的两个斑图（模式）因非线性耦合，而会在更长的时间尺度上发生周期性的竞争现象——模式竞争（图二 a中阴影小区域）。



图三：高阶多边形的观察。（a）数值模拟：理想流体极限下的多边形模式（ $l=2-7$ ），（b）中式大锅容器内实验观察到的水重力波多边形。

最令人惊奇的是，上述在法拉第实验中观察到的水波多边形斑图竟然与此前不久在受约束玻色爱因斯坦凝聚中所观察到的星型斑图惊人地相似：二者不仅具有一致的色散关系，硬弹簧幅频响应，以及时间演化特性，甚至连六边形耦合失稳的细节均一一对应。文章的理论分析表明，在二阶非线性近似下，支配变底面容器内理想流体浅水波非线性演化的是二维Airy方程，

其中， g 是重力加速度， h 是变底面容器的水深， η 是水面的垂直位移， u 是质点速度的水平分量， ∇ 是二维（水平）梯度算符。上列方程完全与二维Gross-Pitaevskii方程的流体力学形式等价。经无量纲化变换，两套方程可约化为统一的无量纲形式，由此数学上严格地建立了经典和量子流体系统之间的非线性类比；其中，约束水波的抛物型底面类比于玻色爱因斯坦凝聚中的简谐势阱。

论文所揭示的多边形斑图是一类新型的浅水重力波，因此可以存在于比毛细尺度大得多的空间尺度上，从厨房的碗碟，到炼油厂的储液罐，乃至变水深的湖泊、港湾，甚至内海（地震激发）。认识这类水波的激发机理及波动性质，不仅可应用于诸如储液装置的防震设计，而且可以加深理解潮汐波在诸如港湾等大尺度上的非线性演化规律，甚至可以应用于地震预报等重要应用场合。

另一方面，经典和量子流体之间的非线性类比，在历久弥新的经典浅水波和蓬勃发展的玻色爱因斯坦凝聚之间构建起一座互通的桥梁，使得两个本质迥异的物理学领域之间概念、知识、理论和实验方法的相互借鉴成为可能。

该工作得到了国家自然科学基金项目的支持。（来源：科学网）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41567-023-02294-y>

作者：王新龙等 来源：《自然—物理学》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发