研究揭示导航波场触发的液态金属量子化轨道及金属液滴追逐效应

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/9792.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！

近日，中国科学院理化技术研究所与清华大学联合研究小组，在美国物理学会期刊*Physical Review Fluids*上以《复合导航波场中量子化在轨追逐的液态金属液滴对》为题，报道了导航波触发的液态金属振荡液池中发生的量子化轨道现象及金属液滴追逐效应。来自麻省理工学院的教授John W. M. Bush在评论这项工作时认为：“作者们通过引入液态金属为流体导航波研究打开了一扇全新的窗户。”

在经典的流体力学中，一个放置于竖直方向振动液面上的液滴，会受到自身撞击液面形成的局部波作用而产生导向性水平运动。这种由流体导航波体系中表面波引导的液滴运动，与量子力学中导航波理论描绘的量子粒子的运动情形有着惊人的相似之处。已经证实的是，流体导航波体系中的悬浮液滴能够模拟量子领域的一系列神秘行为，例如隧穿、干涉、衍射等。对这种宏观层面上波粒二象性的认识，使得流体导航波研究近年来引发科学界的重视。除了量子体系之外，物理系统中普遍存在着波动伴随的粒子运动，然而这些行为通常要么发生在极端尺度，要么需要借助特殊条件才能实现，这给相应系统中的直接观测和控制带来了巨大困难。而对于宏观的流体导航波体系，由于其驱动参数以及系统结构均可灵活变换，从而为研究波粒二象性及其他物理体系中由波场引导的运动，提供了一种易于实现的途径。

在此之前，已有一部分研究考查了常规流体导航波体系中单个液滴或者多个液滴的动态行为，并探索了它们与量子体系的相似性问题。然而以往对于液滴动态行为的研究通常都局限于单一粒子与导航波之间的相互作用，即液滴运动只受其自身撞击液面产生的局部导航波的导向而运动。这种单一的导航波情形将液滴运动的驱动条件限制在一个很窄的区间内。为了突破传统的流体导航波系统结构，也有研究通过调整液池的构造来改变液滴的运动，例如采用具有阶梯高度的液池，或者控制容器进行旋转等。然而这些方法均人为增加了系统结构的复杂度。因此，为了进一步扩展流体导航波理论及研究范畴，在寻找全新液滴运动模式的同时，应避免增加系统和控制的复杂程度。

在此项发表的液态金属导航波体系的研究工作中，作者们开创性地引入了一种具有高表面张力的全新液态金属液池-液滴系统，利用金属液池边界振荡产生的全局导航波和液滴自身的局部导航波构造复合导航波场（图1）。研究发现，当两个大小不同的金属液滴在液池上相遇时，会自锁形成共同围绕液池中心旋转的液滴对。而且液滴对之间能够实现不同的自锁距离，同时液滴对的运动轨迹被锁定在液池表面所形成的不同半径的同心环表面波轨道内。更为有趣的是，这些旋转

追逐的液滴对之间的自锁距离和旋转轨道半径，体现出一系列量子化的离散数值。通过调节液滴对的自锁距离和轨道半径这一组变量集，可以实现各种各样的液滴对运动模式（图1和图2）。

通过进一步的研究，还观察到液滴对的协同旋转追逐运动具有方向性：既可以由大液滴追逐较小的液滴，也可以反过来由小液滴追逐大液滴，而追逐的方向取决于两个液滴之间的自锁距离。如果两个液滴彼此相邻（短程自锁），则大液滴在后面追逐着小液滴运动；反之，如果液滴彼此远离（长程自锁），则大液滴带头在前，小液滴在后追逐，追逐方向发生反转。然而不论对于短程自锁或者长程自锁的液滴对而言，其旋转运动的中心都是液池的中心点，而不是沿着两个液滴连线的中心点，后者是在常规流体（如硅油）导航波体系中观察到的液滴绕转现象。同时需要指出的是，液态金属液滴对的追逐方向完全决定于两个液滴的自锁距离，而不受其它因素的影响（图3）。而以往发现的液滴对追逐运动方向，是可以通过改变加速度进行调节的。这些液态金属液滴对的独特行为意味着液态金属体系隐藏着新的作用模式。

该研究设计了一系列实验来探究液态金属液滴对的轨道化追逐效应的背后原理。通过采用高速成像、数字图像跟踪、粒子成像测速等方法，作者们揭示了振动的液态金属液池（图4和图5）和弹跳液滴（图6）的流体力学特性。通过比较几种不同模态追逐液滴对中单个液滴的竖直运动后发现，两个液滴的振动始终存在一定的相位差，大液滴撞击液面的相位总是滞后于小液滴。正是这个相位差的存在使得液滴在撞击液面时，会受到与其自锁的另一个液滴的局部导航波的影响，而产生一个水平推动力，从而导致了液滴水平方向上追逐行为的发生（图7）。同时液滴对的共同运动又会受到液池全局表面波的限制作用，从而被约束在不同的圆形轨道内。这个全局导航波的存在，是将当前系统与其他系统区别开来的根本原因所在，液态金属液滴对的轨道化旋转追逐效应，是液滴同时受局部导航波和液池全局导航波场这一复合波场的引导所致。

对于液态金属导航波体系的探索，一方面丰富了流体力学不稳定性的研究范畴和知识，另一方面也极大扩展了流体动力学层面波粒二象性的含义。此项工作中发现的液态金属液滴对的轨道化追逐运动，与光学系统中纳米颗粒对的运动模式具有惊人的相似之处。同时，该研究中提出的复合导航波场的理论和方法，也有望扩展到其它不同类型和规模的物理体系中，例如从微观世界中的电子对传输到宇宙间的行星运动等。

以上研究得到国家自然科学重点基金、中科院院长基金及前沿项目等资助。

文章链接

图1. 液态金属导航波体系及其中液滴对的量子化在轨旋转追逐运动模式

图2. 液态金属液滴对不同运动模式下的轨道旋转运动轨迹和速度

图3. 液态金属液滴对轨道旋转运动参数的量子化

图4. 液态金属液池的竖直振动描述和复合导航波场的刻画

图5. 液态金属液池振动过程中表面形成的涡场及其可视化

图6. 液态金属液滴对竖直方向弹跳运动的刻画

图7. 液态金属液滴对不同运动模式下液滴竖直方向弹跳运动相位差与液滴对水平方向轨道旋转速度的关联性分析

研究团队单位：理化技术研究所

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转发