

# 椭球昆克活性胶体体系中大尺度集体行为\*

刘霖 邬杰 宋辰 陈康<sup>†</sup> 田文得<sup>‡</sup> 张天辉<sup>† †</sup>

(苏州大学物理科学与技术学院, 软凝聚态物理及交叉研究中心, 苏州 215006)

## 摘要

集体运动的涌现是非平衡活性物质中重要的自组织现象。对于杆状粒子体系, 当驱动方向垂直于粒子长轴时, 相应的对齐机制和集体行为涌现的动力学尚缺乏相关研究。本研究以沿短轴(垂直于长轴)驱动的椭球昆克(Quincke)体系为实验体系。实验发现在高频周期性电场驱动下, 活性椭球粒子可以通过翻转与旋转实现对齐, 并形成大尺度稳定的宏观涡旋。结果表明, 高频电场在维持定向驱动的同时, 不仅减弱了粒子的活性, 也同时抑制了椭球粒子的手性进动。低活性椭球粒子能够在平行无自旋态和横向自旋态之间进行转换, 使得粒子能够通过翻转调整取向。电场驱动力周期性消失, 使得椭球粒子间能够通过未完全弛豫的偶极相互作用调整内部极化电偶的取向, 实现局部驱动方向的调整和对齐。同时, 电场周期性关闭也有效抑制了椭球粒子持续性手性进动, 增强了集体运动的稳定性。本研究揭示了横向驱动活性体系的独特对齐机制, 并为探索不同驱动模式下向列相中的缺陷动力学提供了理想的实验模型。

**关键词:** 昆克活性胶体, 翻转, 手性, 集体运动

**PACS:** 64.60.-i, 05.65.+b, 87.18.Gh, 82.70.Dd

**基金:** 国家自然科学基金(批准号: 12574230)资助的课题。

通讯作者: 张天辉 E-mail: [zhangtianhui@suda.edu.cn](mailto:zhangtianhui@suda.edu.cn)

田文得 E-mail: [tianwende@suda.edu.cn](mailto:tianwende@suda.edu.cn)

陈康 E-mail: [kangchen@suda.edu.cn](mailto:kangchen@suda.edu.cn)

## 1 引言

活性物质是一类典型的非平衡体系, 其基本单元能够持续消耗环境能量并将其转化为自主运动的机械功<sup>[1, 2]</sup>。此类系统广泛存在于生物系统(如细菌群体、细胞骨架、鸟群等)<sup>[3-8]</sup>以及人工合成体系<sup>[9-12]</sup>中。持续的能量输入打破了热力学细致平衡, 驱动系统自发涌现出群集<sup>[13]</sup>、涡旋<sup>[14]</sup>及活性湍流<sup>[15]</sup>等丰富的自组织现

象<sup>[16]</sup>。在由几何形状各向异性单元（如细菌<sup>[17]</sup>、肌动蛋白纤维<sup>[18]</sup>以及微管<sup>[19]</sup>）构成的活性体系中，粒子间的局域相互作用（如体积排斥）可在碰撞过程中诱导其长轴方向趋于平行，并同时实现速度方向的平行或反平行对齐，从而形成具有向列对称性的有序态，即活性向列相<sup>[20]</sup>。区别于被动向列相，活性向列相中的单元在运动过程中持续向周围流体注入动量，可等效为分布于取向场中的力偶极子，从而在体系中产生活性应力<sup>[21]</sup>。当体系的取向场存在空间涨落时，该活性应力会诱导流场并放大原有扰动，进而触发流体力学不稳定性，例如在伸展型（Extensile）体系中产生弯曲不稳定性（Bend instability），在收缩型（Contractile）体系中产生展曲不稳定性（Splay instability）。这些不稳定性进一步导致取向场自发重构，并在畸变处诱发产生 $\pm 1/2$  半整数阶拓扑缺陷<sup>[22]</sup>。拓扑缺陷作为取向场的几何奇点，其不断的生成、运动和湮灭过程最终破坏长程向列有序，驱动系统向活性湍流态转变<sup>[23]</sup>。其中，由于不对称的彗星状几何结构， $+1/2$  缺陷在活性应力作用下能产生净驱动力并获得稳定速度，其运动过程自发诱导的偶极子流场，可带动周围被动粒子实现物质输运<sup>[24]</sup>。此外，拓扑缺陷通过重构体系内部的应力分布并调控局域取向结构，对体系的形态演化及宏观动力学行为产生关键影响<sup>[25-27]</sup>。

现有研究大多集中于驱动力方向与粒子长轴平行的情形。在此条件下，粒子的运动方向与其几何取向一致，使得碰撞过程中速度对齐与取向对齐相互耦合，从而能够高效建立宏观有序结构<sup>[15, 23]</sup>。然而，当驱动方向垂直于粒子长轴（横向驱动）时，相应的对齐机制和集体行为涌现的动力学尚缺乏系统认识。本研究以沿短轴（垂直于长轴）驱动的椭球昆克体系为实验体系。在横向驱动条件下，体积排斥仍倾向于使粒子长轴平行（几何取向对齐），但自驱动粒子具有较强的速度方向保持性，使其难以在碰撞过程中调整运动方向。已有研究表明，在椭球昆

克体系中，粒子易形成长轴平行但速度方向相反的反平行态。该状态在几何上稳定，但速度方向难以通过碰撞实现反转，最终导致运动受限并形成无序的动态团簇<sup>[28]</sup>。这一现象表明，基于体积排斥的取向对齐机制在横向驱动体系中难以直接建立宏观有序结构。尽管如此，在临界电场附近，椭球昆克粒子可在平行无自旋状态（Parallel Spinless State, PSS）与横向自旋状态（Spinning Transversal State, STS）之间发生转换，从而产生三维空间翻转。该过程通过重构粒子取向，实现速度方向的重新调整，为打破反平行态并促进局域对齐提供了途径。然而，在持续直流电场作用下，椭球昆克粒子固有的手性进动使其运动方向持续偏转，导致由翻转建立的局域对齐结构难以长期维持<sup>[28, 29]</sup>。

为克服上述限制，本研究引入高频方波电场对体系进行调控。结果表明，高频电场在维持椭球粒子定向驱动的同时，有效减弱了粒子的活性（即平均运动速度）。在这种低活性条件下，椭球粒子能够更灵活地在平行无自旋态与横向自旋态之间进行转换，从而通过空间翻转调整取向以克服阻塞。与此同时，在电场关闭阶段，外场约束被暂时解除，粒子间未完全弛豫的偶极相互作用主导取向调整，从而实现局部驱动方向的调整。而在随后的电场开启阶段，粒子以修正后的方向恢复运动，并通过翻转或旋转实现对齐。此外，电场周期性关闭打断了手性进动的连续倾斜角积累，其间的弛豫过程使粒子的旋转方向随机化，从而在统计意义上抑制了椭球粒子的净手性。在上述机制的协同作用下，体系能够实现稳定的取向与速度协同对齐，并最终形成大尺度稳定涡旋结构。本研究揭示了在驱动力与几何取向非共线（垂直）条件下活性粒子的对齐新机制，也为活性物质集体动力学的精确调控提供了新思路。

## 2 实验方法

### 2.1 实验装置

本研究采用 Keville 和 Ho 等人提出的物理拉伸法<sup>[30-32]</sup>制备长宽比  $k \approx 1.65$  的椭球昆克粒子。所得椭球颗粒均匀分散于含 0.12 mol/L 二-2-乙基己基磺基琥珀酸钠 (AOT) 的正十六烷非极性溶剂中，并注入由两块平行氧化铟锡 (ITO) 导电玻璃构成的密闭微型观测腔。该微腔的有效厚度严格控制在  $110 \pm 10 \mu\text{m}$ 。实验过程中，在两块平行的 ITO 极板间施加垂直于观测平面的外加电场。

## 2.2 临界电场与椭球粒子手性

本研究将椭球粒子由平行无自旋态 (PSS) 转变为横向自旋态 (STS) 的阈值定义为临界电场  $E_c$ <sup>[28, 33]</sup>。当外加电场强度低于  $E_c$  时，椭球粒子的长轴沿电场方向对齐，处于静止的 PSS 态 (图 1(a))。当电场强度超过  $E_c$  后，椭球粒子转变为 STS 态 (图 1(b))。在该状态下，粒子感应电偶极矩  $\vec{P}_Q$  的方向 (原本反向平行于电场) 在热扰动作用下发生偏转<sup>[34]</sup>。 $\vec{P}_Q$  与外加电场相互作用产生一个扭矩，驱动椭球粒子长轴绕电场方向发生进动。因此，处于不稳定 STS 态的椭球粒子在固体表面表现为圆周运动轨迹，呈现出显著的运动手性特征。本实验条件下的  $E_c \approx 2.1 \text{V}/\mu\text{m}$ 。本研究采用高频方波电场进行调控，其中，方波电场的峰值电场强度用  $E_p$  表示，谷值电场强度用  $E_g$  表示 (本研究中  $E_g = 0$ )。椭球粒子的翻转行为即为 PSS 与 STS 两种状态之间的转换。

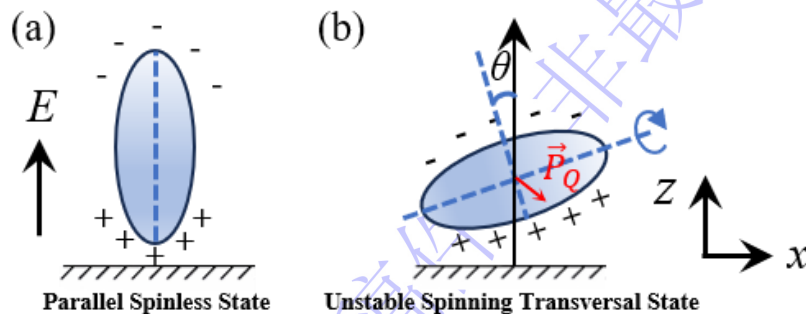


图 1 椭球昆克粒子在不同外加电场强度下的状态示意图 (a)  $E \leq E_c$  时平行无自旋态 (PSS); (b)  $E \geq E_c$  时不稳定横向自旋态 (STS)，粒子长轴绕电场方向进动。

Fig. 1 Schematic of the states of ellipsoidal Quincke particles under various applied electric field strengths. (a) Parallel spinless state (PSS) for  $E \leq E_c$ . (b) Unstable

spinning transversal state (STS) for  $E \geq E_c$ , where the long axis of the particle precesses around the direction of the electric field.

## 2.3 数据分析

为从不同维度刻画体系的动力学特性，本文分别计算了速度时间自关联函数  $C_t$ 、速度空间关联函数  $C_r$  以及极性序参数  $p$ 。其中，速度时间自关联函数  $C_t$  用于表征粒子速度方向的时间持续性：

$$C_v(\Delta t) = \sum_i \left\langle \frac{\vec{v}_i(t) \cdot \vec{v}_i(t + \Delta t)}{|\vec{v}_i(t)| \cdot |\vec{v}_i(t + \Delta t)|} \right\rangle_t \quad (1)$$

速度空间关联函数  $C_r$  用于描述不同粒子之间速度方向的空间相关性，从而刻画速度场在空间上的关联范围与集体运动尺度：

$$C_v(\Delta r) = \sum_i \left\langle \frac{\vec{v}_i(r) \cdot \vec{v}_j(r + \Delta r)}{|\vec{v}_i(r)| \cdot |\vec{v}_j(r + \Delta r)|} \right\rangle \quad (2)$$

特征关联长度定义为  $C_r$  衰减至  $1/e$  时对应的空间距离。

极性序参数  $p$  用于衡量体系中粒子速度方向的一致性，直接反映体系整体的有序程度：

$$p = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \frac{\vec{v}_i}{|\vec{v}_i|} \right| \quad (3)$$

其中  $N$  为视场内粒子总数。

上述计算结果均是对演化时间  $t$  以及视场内所有相关粒子  $i, j$  进行严格的系统平均所得。

## 3 实验结果

### 3.1 大尺度集体运动的涌现

在直流电场 ( $E=2.3E_c$ ) 驱动下，椭球昆克体系呈现出明显的运动受限与局域聚集特征 (图 2(a))。粒子空间分布不均，表现为高密度团簇与低密度空隙并存。由速度方向着色图 (图 2(d)) 可见，尽管在局部尺度上存在速度方向的一致性，

但该一致性无法在空间范围内长程传播，体系整体缺乏空间相关性。在持续电场驱动下，粒子在高密环境中频繁发生碰撞，易诱发相邻粒子形成长轴平行但速度方向反向对齐的反平行态。在此状态下，粒子运动方向难以在后续演化中发生有效调整，导致粒子运动范围受限，并逐渐在局域区域内形成低迁移率的动态团簇结构。当驱动条件切换为高频方波电场 ( $E_p=2.3E_c$ ,  $E_g=0$ ,  $f=130\text{Hz}$ ) 时，体系的宏观动力学行为发生显著变化。流场分析 (图 2(e)) 显示，体系自发演化出跨越整个观测视场的大尺度涡旋。在局部区域内 (图 2(f))，粒子速度方向高度一致，表明体系中存在大范围的协同运动。上述现象表明，周期性方波电场能够有效克服横向驱动条件下的对齐困难，形成稳定一致的有序结构。

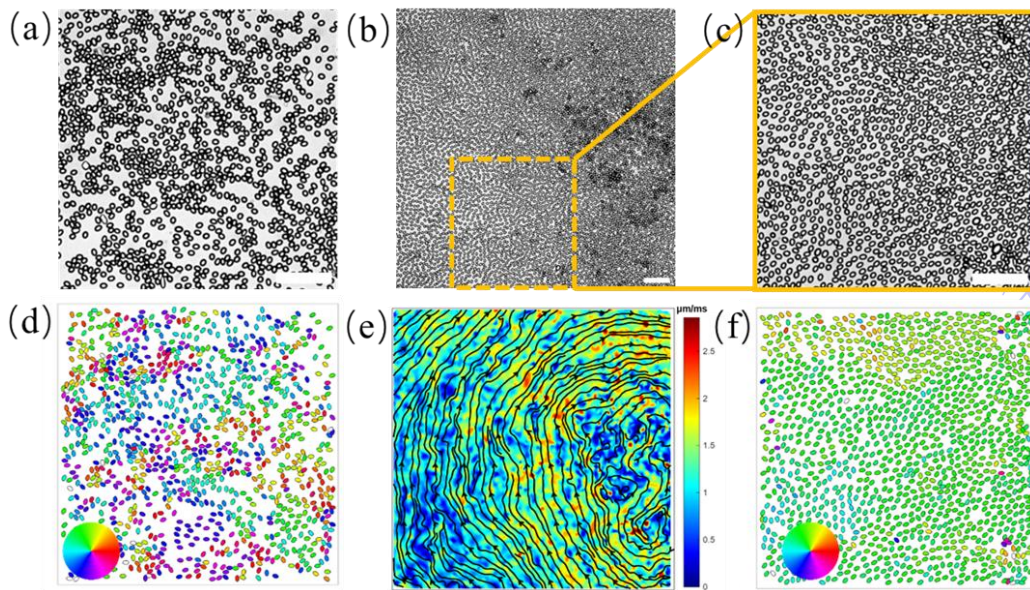


图 2 椭球昆克粒子在不同电场驱动条件下的动力学行为 (a)直流电场 ( $E=2.3E_c$ ) 下粒子形成的局域聚集与无序动态团簇; (b)高频方波电场 ( $E_p=2.3E_c$ ,  $E_g=0$ ,  $f=130\text{Hz}$ ) 下形成的大尺度涡旋; (c)对应(b)中局部定向流动; (d)对应(a)的粒子速度方向彩图, 颜色表示速度方向; (e)对应(b)的速度场, 背景颜色表示速度大小, 黑色实线箭头指示流线方向; (f)对应(c)的粒子速度方向彩图, 颜色表示速度方向。  
标尺:  $100\ \mu\text{m}$ 。

Fig. 2 Dynamical behavior of ellipsoidal Quincke particles under different electric field driving conditions. (a) Local aggregation and disordered dynamic clusters formed under a DC electric field ( $E=2.3E_c$ ). (b) Large-scale vortices induced by a high-frequency square-wave electric field ( $E_p=2.3E_c$ ,  $E_g=0$ ,  $f=130\text{Hz}$ ). (c) Local

directed flow corresponding to (b). (d) Color map of particle velocity directions corresponding to (a), where colors indicate the velocity direction. (e) Velocity field corresponding to (b), where the background color represents the velocity magnitude, and the solid black arrows indicate the streamline directions. (f) Color map of particle velocity directions corresponding to (c), with colors indicating the velocity direction.

Scale bar: 100  $\mu\text{m}$ .

### 3.2 宏观有序态的时空关联特性

为定量表征不同驱动条件下体系的空间相关性、粒子运动持续性以及整体有序程度，本文分别计算了速度空间关联函数  $C_r$ 、速度时间自关联函数  $C_t$  以及全局极性序参数  $p$ 。在空间维度上（图 3(a)），直流条件下的  $C_r$  随粒子间距离增加急剧衰减，其特征关联长度仅为数个粒子直径，表明体系仅存在短程空间相关性。相比之下，在交流电场驱动下， $C_r$  在大空间尺度上仍保持较高数值且衰减微弱，说明体系中建立了长程空间相关结构。全局极性序参数  $p$ （图 3(c)）用于衡量体系整体的有序程度。在直流电场驱动下（图 3(c) 中橙色曲线）， $p$  值始终处于较低水平（约 0.25），且随时间存在波动，表明体系整体处于取向无序状态，缺乏稳定的全局方向一致性。相应地，其速度时间自关联函数  $C_t$ （图 3(b)）快速衰减，说明椭球粒子运动缺乏持续性，难以维持长时间定向迁移。形成对比的是，在交流电场驱动下（图 3(c) 中蓝色曲线）， $p$  值在整个观测时间内维持在高水平（约 0.92）且波动极小，表明体系实现了稳定的全局有序。同时， $C_t$  衰减微小（图 3(b)），说明粒子运动具有高度持续性。结合空间关联结果，可以看出该条件下体系同时具备长程空间相关性与运动持续性，对应于稳定的集体定向运动状态。

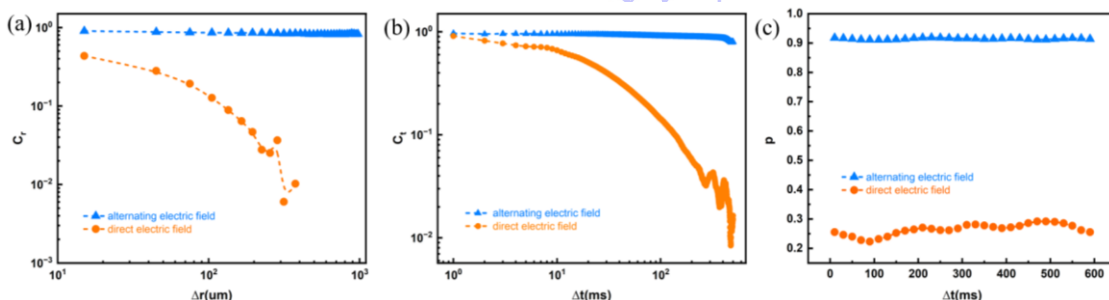


图 3 不同电场驱动模式下体系关联函数与极性序参数的对比 (a)速度空间关联函

数  $C_r$ ; (b)速度时间自关联函数  $C_t$ ; (c)全局极性序参量  $p$  随时间的演化。其中，橙色曲线表示直流电场驱动结果，蓝色曲线表示高频方波电场驱动结果。

Fig. 3 Comparison of correlation functions and polar order parameters under different electric field driving modes. (a) Velocity-velocity spatial correlation function  $C_r$ . (b) Velocity autocorrelation function  $C_t$ . (c) Time evolution of the global polar order parameter  $p$ . The orange curves correspond to the DC electric field, while the blue curves represent the alternating electric field.

### 3.3 局部对齐与翻转机制

与直流驱动形成对比，在高频交流电场作用下，体系展现出稳定的集体对齐行为。在直流电场中，翻转机制源于临界电场附近平行无自旋态（PSS）与横向自旋态（STS）的亚稳态共存，粒子通过自发的状态转换在局域尺度上缓解阻塞并调整运动方向。然而，直流下的翻转仅局限于特定参数区间（恒定电场附近），且受持续手性进动的干扰，形成的局部群集极易失稳解体<sup>[26]</sup>。相比之下，在高频交流电场驱动下，粒子在单周期内（ $f \geq 125\text{Hz}$ ，电场开启时间小于  $4\text{ms}$ ）未能加速至最大稳定速度（加速时间约需  $13\text{ms}$ ）<sup>[35]</sup>。这种活性（平均速度）的显著降低有效削弱其在碰撞过程中的运动方向保持能力，使其更容易在局域相互作用作用下调整运动方向，为粒子通过翻转调整取向提供了条件。在此基础上，粒子可通过两种协同路径实现对齐：当局部空间较为充裕时，椭球粒子通过二维平面内连续旋转逐步调整运动方向（图 4(a, c)）；而在局部空间受限区域，椭球粒子则通过三维空间翻转短暂脱离二维运动平面，以跨越局部拥挤导致的运动受限（图 4(b, d)）。通过引入粒子瞬时长宽比  $k$  对其运动状态进行表征，可以观察到在高密区域中，粒子在 PSS 与 STS 之间多次转换。结合图 4(d)，该粒子在连续运动中  $k$  值呈现明显振荡，并两次急剧下降至 1.1 以下（呈现绿色），表明其发生了空间翻转。图 4(c)中粒子  $k$  值始终维持在较高水平（呈现红色），说明该粒子仅通过二维旋转完成方向调整。上述三维翻转与二维旋转的协同作用，为体系提供了一种高效的动态对齐路径，使粒子能够在高密环境中不断修正其运动方向，从而实现局域

对齐。

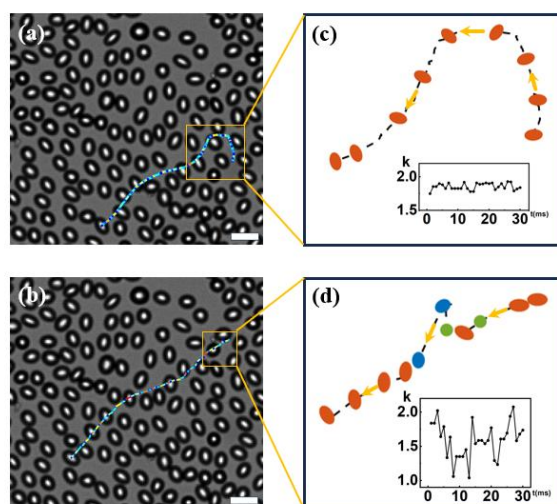


图 4 典型粒子由无序向局部有序演化过程中实现速度对齐的动力学过程 (a-b)300 ms 内粒子整体运动轨迹，线段为追踪的粒子轨迹，颜色表示速度大小，标尺：20  $\mu\text{m}$ ；(a)二维平面旋转对齐；(b)三维空间翻转对齐；(c-d)分别对应(a)和(b)局部轨迹放大图及粒子长宽比  $k$  随时间的演化。箭头指示粒子运动方向，粒子颜色代表不同的  $k$  值：红色 ( $k > 1.6$ )、蓝色 ( $1.6 \geq k \geq 1.1$ )、绿色 ( $k < 1.1$ )。

Fig. 4 Dynamical processes of velocity alignment for typical particles during the evolution from a disordered to a locally ordered state. (a-b) Overall motion trajectories of particles within 300 ms, where line segments represent tracked trajectories, colors indicate velocity magnitude. Scale bar is 20  $\mu\text{m}$ .(a) Alignment via two-dimensional in-plane rotation. (b) Alignment via three-dimensional flipping. (c-d) Enlarged views of local trajectories corresponding to (a) and (b), respectively, along with the evolution of the particle aspect ratio  $k$  over time. Arrows indicate the direction of particle motion, and the particle colors represent different  $k$  values: red ( $k > 1.6$ ), blue ( $1.6 \geq k \geq 1.1$ ), and green ( $k < 1.1$ ).

高频方波电场下的翻转机制与高密度体系中的电荷弛豫动力学密切相关。根据麦克斯韦-瓦格纳极化理论，粒子表面的感应电荷在电场变化时具有特定的弛豫时间  $\tau$ 。已有研究表明，在高密度昆克体系中，粒子间的偶极相互作用会产生显著的局域电场，从而将弛豫时间  $\tau$  延长至 4 ms 以上<sup>[35]</sup>。因此，当交流电场的频率超过 125 Hz（电场关闭时间小于 4 ms）时，粒子在电场关闭阶段内表面的感应电荷无法完全弛豫。在电场关闭期间，粒子不再受到外加电场驱动，其平移运动在流体粘滞阻力作用下迅速衰减并接近准静止状态，此时残余偶极矩主导粒子间

的局域相互作用。若粒子的偶极矩尚未良好对齐，该相互作用将驱动其偶极矩方向发生调整，使其趋向于与周围粒子一致。当电场在下一周期重新开启时，粒子以修正后的偶极方向恢复运动，但此时粒子的几何长轴尚未完成同步转向。这种几何取向与驱动方向之间的失配，使低活性粒子在运动启动初期通过翻转或旋转进行调整。相比之下，直流驱动下虽然也存在基于旋转的取向调整机制，但在高密环境中，该过程受限于持续外场约束及手性进动引起的方向偏转，难以有效克服反平行态引发的阻塞，整体对齐效率较低。交流驱动的本质区别在于，电场驱动力周期性消失暂时解除了外场约束，使偶极相互作用得以主导取向调整过程，从而有效激活翻转机制并提升对齐效率，最终促使体系演化为大尺度的集体运动。

### 3.4 手性进动抑制

大尺度集体运动的维持依赖于对取向持续偏离的有效抑制。在横向驱动的椭球昆克体系中，这种取向偏离主要来源于粒子固有的手性进动。研究表明，椭球粒子的手性进动特征依赖于外加电场。随着电场强度增加，粒子的自转角速度升高，倾斜电偶极矩  $\vec{P}_Q$  被削弱<sup>[36]</sup>，长轴的倾斜程度随之降低<sup>[28]</sup>。在宏观上表现为粒子运动轨迹曲率降低、轨道半径增大。尽管调节电场强度可以在一定范围内改变轨迹曲率与手性强度，但无法从根本上抑制由持续进动引起的取向偏转累积。

在直流或低频方波电场（如  $f = 5 \text{ Hz}$ ）条件下，单次电场作用时间较长，驱动粒子进动的力矩持续作用，使倾斜角  $\theta$  在时间上不断累积，单粒子呈现稳定的圆周运动轨迹（图 5(a)）。这种持续的轨迹弯曲不仅导致粒子运动方向不断偏离初始取向，在高密条件下进一步增加碰撞概率，促进反平行态的形成，从而破坏体系的宏观有序结构。相比之下，在高频方波电场（ $f \geq 125 \text{ Hz}$ ）驱动下，手性进动的累积过程被显著打断。在极短的电场开启阶段内，倾斜角  $\theta$  尚未充分发展，

而在随后关闭期间内外场约束消失，粒子的运动由流体热扰动及邻近粒子的偶极-偶极相互作用主导，打破了前一阶段的旋转方向记忆。经过多周期交替，原本连续累积的手性偏转被离散化并随机化，使体系的时间平均手性趋于零。在这一机制下，粒子的轨迹在统计意义上趋于平直。实验结果进一步证实（图 5(b)），高频交流电场显著抑制了椭球粒子的手性，提高了定向迁移的稳定性，为宏观有序结构的维持提供了关键条件。

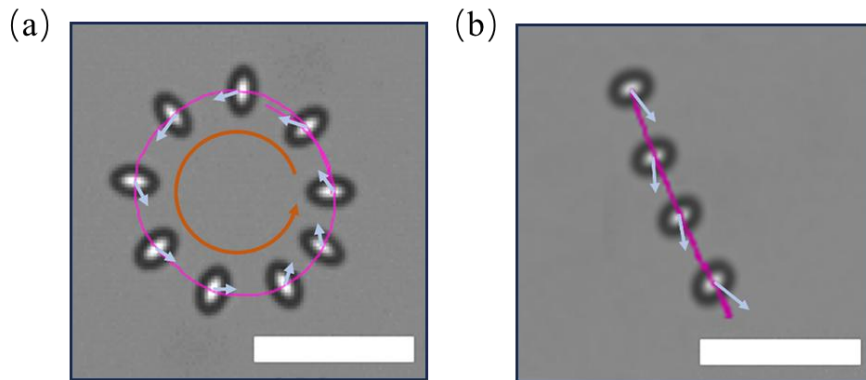


图 5 相同电压条件下，不同频率交流电场驱动下单粒子的运动轨迹与速度方向 (a)当  $f=5\text{ Hz}$  时，电场开启半个周期内粒子的轨迹与速度方向，呈现确定旋向的圆周运动；(b)当  $f=80\text{ Hz}$  时，200 ms 内粒子的轨迹与速度方向。标尺： $60\text{ }\mu\text{m}$

Fig. 5 Trajectories and velocity directions of a single particle under AC electric field with the same voltage but different frequencies. (a) Trajectory and velocity direction of the particle during a half-cycle when the electric field is on at  $f=5\text{ Hz}$ , exhibiting circular motion with a well-defined chirality. (b) Trajectory and velocity direction within 200 ms at  $f=80\text{ Hz}$ . Scale bar:  $60\text{ }\mu\text{m}$ .

### 3.5 宏观相图

前文讨论表明，高频方波电场在克服空间阻塞与抑制手性进动方面发挥了关键作用。然而，活性物质的集体动力学行为高度依赖于外部能量的输入特征。为系统探究驱动条件对体系宏观相态的影响，本研究在高密条件下扫描方波电场频率  $f$  与归一化峰值电场强度  $E_p/E_c$ ，构建了体系的全局相图（图 6）。结果显示，体系在参数空间内主要呈现三种典型相态。



图 6 周期性电场下椭球昆克体系的动力学相图 ( $E_g=0$ )。横坐标为周期性电场频率  $f$ ，纵坐标为归一化峰值电场强度  $E_p/E_c$ 。不同颜色区域代表体系在不同参数组合下呈现的三种宏观相态：黄色表示均匀无序相、蓝色表示局域静止相、紫色表示宏观群集相。

Fig. 6 Dynamical phase diagram of the ellipsoidal Quincke system under a periodic electric field ( $E_g=0$ ). The horizontal axis represents the frequency of the periodic electric field,  $f$ , and the vertical axis denotes the normalized peak electric field strength,  $E_p/E_c$ . The differently colored regions indicate the three macroscopic phases exhibited by the system under various parameter combinations: yellow for the homogeneous disordered phase, blue for the static phase, and purple for the flocking phase.

当驱动频率较低时（图 6 左侧黄色区域），电场关闭时间超过高密体系保留运动记忆的特征时间 ( $t \approx 4 \text{ ms}$ ) [35]，椭球粒子在每个周期中均发生速度重置，随机选择运动方向，导致其仅能进行短程的间歇性扩散。宏观上，粒子空间分布均匀，体系缺乏长程空间关联。当频率较高但峰值电场强度较低时（图 6 右下蓝色区域），尽管极短的电场关闭期使粒子能够保留跨周期的速度记忆（速度方向相关性），但单个周期内外场输入的动能不足，粒子获得的平移速度较低。在高密环境下，这种低驱动力不足以克服流体粘滞阻力及频繁碰撞所带来的约束，使椭球粒子的运动被限制在局部原位，体系呈现静止状态。只有当频率 ( $f \geq 125 \text{ Hz}$ ) 与峰值场强 ( $E_p/E_c \geq 1.95$ ) 同时超过临界阈值时（图 6 右上紫色区域），体系才

能演化为稳定的大尺度有序相。在该参数区间内，较高的场强为粒子提供了充足的动能，而高频电场不仅有效抑制了手性进动导致的取向持续偏转，其极短的电场关闭时间 ( $t \leq 4 \text{ ms}$ ) 使粒子在电场关闭阶段能够通过未完全弛豫的偶极相互作用进行取向调整，并在后续电场开启时触发翻转或旋转响应。上述过程共同促进了速度方向与几何取向的协同调整，最终涌现出具有长程空间相关性的宏观涡旋结构。

## 4 结论

本研究通过引入高频方波电场，实现了对横向驱动椭球昆克活性胶体集体动力学的有效调控，并在特定参数区间内观测到稳定的大尺度宏观涡旋。实验与分析表明，该有序结构的形成源于两种关键机制的协同作用。首先，在电场周期性关闭阶段，外场约束被暂时解除，粒子运动迅速衰减，体系动力学由粒子间偶极-偶极相互作用主导。由于电荷弛豫不完全，残余偶极矩在局部相互作用下发生重新取向，使粒子在电场重新开启前完成驱动方向的调整。在随后的电场开启阶段，由于粒子几何取向与驱动方向之间存在失配，低活性粒子通过三维空间翻转或二维平面旋转进一步调整，从而完成速度方向与几何取向的协同对齐。其中，三维翻转在高密区域中有效解除局部拥挤导致的运动受限，是突破反平行态阻碍的关键过程。其次，高频电场通过缩短单周期作用时间，不仅降低粒子的平均运动速度（即活性），同时抑制手性进动的连续倾斜角积累。在周期性交替过程中，手性偏转被分段打断并在关闭阶段受到局域相互作用扰动，使粒子轨迹在统计意义上趋于直线，增强了速度方向的时间持续性。这一机制为宏观定向运动的维持提供了必要条件。与传统长轴驱动体系（如细菌、自驱动杆）不同，后者中速度对齐与取向对齐在碰撞过程中相互耦合，宏观有序结构主要依赖于二维平面内由体积排斥诱导的对齐机制，并进一步演化出以拓扑缺陷为核心的活性湍流行为。而

本工作研究的横向驱动体系，由于驱动方向与几何取向的非共线，速度对齐与取向对齐在碰撞过程中发生解耦，传统对齐机制难以建立宏观有序结构。相应地，体系需要依赖偶极调控与翻转对齐和手性抑制这一协同机制，才能实现从无序到全局有序的转变。

本研究揭示了一种不同于经典活性向列体系的对齐机制，表明驱动力方向与粒子几何各向异性的耦合方式是决定活性体系宏观动力学行为的重要影响因素。该结果为通过外场参数调控实现复杂集体行为提供了实验依据，并为进一步研究横向驱动条件下的拓扑缺陷动力学奠定了基础。未来可在此基础上系统探究缺陷的产生、演化及相互作用规律，从而深化对非平衡活性体系中驱动方式与几何约束协同作用的理解。

录用稿件，非最终出版稿

## 参考文献

- [1] Ramaswamy S 2017 *J. Stat. Mech: Theory Exp.* **2017** 054002
- [2] Needleman D, Dogic Z 2017 *Nat. Rev. Mater.* **2** 17048
- [3] Sokolov A, Aranson I S, Kessler J O, Goldstein R E 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 158102
- [4] Zhang H-P, Be'er A, Florin E-L, Swinney H L 2010 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **107** 13626
- [5] Schaller V, Weber C, Frey E, Bausch A R 2011 *Soft Matter* **7** 3213
- [6] Deutsch A, Friedl P, Preziosi L, Theraulaz G 2020 *Philos. Trans. R. Soc. B* **375** 20190377
- [7] Katz Y, Tunstrøm K, Ioannou C C, Huepe C, Couzin I D 2011 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **108** 18720
- [8] Cavagna A, Cimarelli A, Giardina I, Parisi G, Santagati R, Stefanini F, Viale M 2010 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **107** 11865
- [9] Kudrolli A, Lumay G, Volfson D, Tsimring L S 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 058001
- [10] Narayan V, Ramaswamy S, Menon N 2007 *Science* **317** 105
- [11] Wang W, Duan W, Sen A, Mallouk T E 2013 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **110** 17744
- [12] Paxton W F, Baker P T, Kline T R, Wang Y, Mallouk T E, Sen A 2006 *J. Am. Chem. Soc.* **128** 14881
- [13] Bricard A, Caussin J-B, Desreumaux N, Dauchot O, Bartolo D 2013 *Nature* **503** 95
- [14] Bricard A, Caussin J-B, Das D, Savoie C, Chikkadi V, Shitara K, Chepizhko O, Peruani F, Saintillan D, Bartolo D 2015 *Nat. Commun.* **6** 7470
- [15] Genkin M M, Sokolov A, Lavrentovich O D, Aranson I S 2017 *Phys. Rev. X* **7** 011029
- [16] Vicsek T, Zafeiris A 2012 *Phys. Rep.* **517** 71
- [17] Be'er A, Ilkanaiv B, Gross R, Kearns D B, Heidenreich S, Bär M, Ariel G 2020 *Commun. Phys.* **3** 66
- [18] Huber L, Suzuki R, Krüger T, Frey E, Bausch A 2018 *Science* **361** 255
- [19] Sumino Y, Nagai K H, Shitaka Y, Tanaka D, Yoshikawa K, Chaté H, Oiwa K 2012 *Nature* **483** 448
- [20] Dunkel J, Heidenreich S, Drescher K, Wensink H H, Bär M, Goldstein R E 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 228102
- [21] Doostmohammadi A, Ladoux B 2022 *Trends Cell Biol.* **32** 140
- [22] Peng C, Turiv T, Guo Y, Wei Q-H, Lavrentovich O D 2016 *Science* **354** 882
- [23] Aranson I S 2019 *Phys. -Usp.* **62** 892
- [24] Giomi L, Bowick M J, Ma X, Marchetti M C 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 228101
- [25] Doostmohammadi A, Ignés-Mullol J, Yeomans J M, Sagués F 2018 *Nat. Commun.* **9** 3246
- [26] Maroudas-Sacks Y, Garion L, Shani-Zerbib L, Livshits A, Braun E, Keren K 2021 *Nat. Phys.* **17** 251
- [27] Shankar S, Souslov A, Bowick M J, Marchetti M C, Vitelli V 2022 *Nat. Rev. Phys.* **4** 380
- [28] Chen Y, Wang L, Zhang T H 2023 *Soft Matter* **19** 512
- [29] He K-X, Ni Q-Y, Zhou X-Y, Tian W-D, Chen K, Zhang T-H 2025 *Chin. Phys. B* **34** 076401
- [30] Ho C, Ottewill R, Keller A, Odell J 1993 *Polym. Int.* **30** 207
- [31] Keville K, Franses E, Caruthers J 1991 *J. Colloid Interface Sci.* **144** 103
- [32] Ho C, Keller A, Odell J, Ottewill R 1993 *Colloid Polym. Sci.* **271** 469
- [33] Brosseau Q, Hickey G, Vlahovska P M 2017 *Phys. Rev. Fluids* **2** 014101
- [34] Yan J, Rashidi A, Wirth C L 2020 *Colloids Surf. A* **606** 125384
- [35] Yang Y, Fei Zhang M, Zhu L, Hui Zhang T 2023 *Chin. Phys. Lett.* **40** 126401
- [36] Cēbers A, Lemaire E, Lobry L 2000 *Phys. Rev. E* **63** 016301

录用稿件，非最终出版稿

# Large-scale collective behavior in systems of ellipsoidal Quincke rollers\*

Liu Lin Wu Jie Song Chen Chen Kang † Tian Wen-De ‡ Zhang Tian-Hui††

(Center for Soft Condensed Matter Physics and Interdisciplinary Research & School of Physical

Science and Technology, Soochow University, Suzhou, 215006, China)

The emergence of collective motion is a key self-organization phenomenon in non-equilibrium active matter. For rod-like particles, when the propulsion direction is perpendicular to the long axis, velocity alignment becomes dynamically difficult, and the underlying mechanisms remain largely unexplored. Here, we study an ellipsoidal Quincke roller system propelled along the short axis (perpendicular to the long axis). We show that, under high-frequency periodic electric fields, the particles can align their velocities through flipping and rotation, and form large-scale, stable macroscopic vortices. The high-frequency driving maintains directional propulsion while reducing particle activity and suppressing chiral precession. In this regime, particles can switch between the parallel spinless state and the spinning transversal state, enabling orientation adjustment via flipping. The periodic switching-off of the electric field allows unrelaxed dipolar interactions to reorient particle dipoles, leading to local alignment of propulsion directions. Meanwhile, the interruption of the field suppresses the accumulation of chiral precession, enhancing the stability of collective motion. Our results reveal a distinct alignment mechanism in transversely driven active systems and provide a model system to explore defect dynamics in nematic phases under non-collinear driving.

**Keywords:** Quincke roller, flipping, chirality, collective motion

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12574230).

† Corresponding author. E-mail: zhangtianhui@suda.edu.cn