

光场调控的活性粒子体系的动态自组装*

郭思航 杨光宇 孟国庆 王英英 潘俊星[†] 张进军[‡]

(山西师范大学物理与信息工程学院, 太原 030032)

(2024年11月5日收到; 2025年2月4日收到修改稿)

活性粒子体系是一类由自驱动布朗粒子组成的非平衡系统, 体系粒子之间通过相互作用可以表现出众多奇特的集体行为. 本文基于布朗动力学模拟, 研究了光场调控的活性粒子体系有序结构的形成和转变机制. 研究发现, 活性粒子在光场调控下发生了大尺度的相分离行为, 形成了特定的有序结构, 并实现了多种有序结构的动态转变. 本文系统地探讨了光场对这一动态相转变的影响和调控机制. 研究结果为活性体系群体结构的精确调控以及微纳米智能器件的制造提供了重要参考.

关键词: 光场调控, 活性粒子, 有序结构

PACS: 05.40.Jc, 81.16.Dn, 05.40.-a, 82.20.Wt

CSTR: 32037.14.aps.74.20241556

DOI: 10.7498/aps.74.20241556

1 引言

在自然界中, 活性物质广泛存在, 从纳米尺度的细菌菌落到大的生物群落都属于活性物质^[1,2]. 活性物质可以通过外界能量的输入获得动力然后实现自主运动, 呈现出强烈的非平衡动力学行为^[3-5]. 对活性物质的非平衡集体行为进行研究, 有助于我们更好地理解微观尺度中的运动现象和自然界中各类群落的集体行为, 并丰富和拓展非平衡动力学的相关理论.

由于活性物质自身的复杂性, 实验室通过制作相应的人造活性粒子^[6-10]来代替活性物质, 便于探究其活性物质的群体行为. 环境中的能量可以作为活性粒子的动力, 进而转为自身的运动. 目前, 关于活性粒子集体运动以及外场作用下的非平衡动力学行为已经在理论、模拟及实验方面进行了很多研究. Stenhammar等^[11]研究了活性组分诱导的

相分离以及主动和被动粒子混合物中的自组装. Dolai等^[12]研究了主动和被动粒子二元混合物的相分离, 研究发现小的主动粒子的运动引起大的被动粒子之间的有效吸引, 这种吸引力导致大尺寸颗粒的相分离. 高艺雯等^[13]模拟研究了在周期性外场调制下, 活性聚合物的跨区域运动, 研究发现外场的性质对于活性聚合物行为的调控方面起到了关键作用. Fernandez-Rodriguez等^[14]通过可调磁场和离散时间反馈环路, 成功实现了对主动布朗粒子旋转扩散率 D_r 的独立且精确调控, 从而改变了不同区域的旋转扩散系数, 探讨了活性粒子在复杂环境中的运动行为及空间分布特性.

光场作为活性体系的理想动力源, 其强度和范围可精准控制, 具有远程可控性和高时空精度的集体功能, 通过控制光场可以调控目标单体的运动行为^[15,16]. Zhang等^[17]研究了光控胶体粒子(CPs)的聚集和自组装. Bäuerle等^[18]使用光激活的活性粒子悬浮液, 利用粒子检测算法和扫描激光系统,

* 山西省基础研究计划(批准号: 202103021223245, 202303021212148)、山西省研究生科研创新项目(批准号: 2024KY452)和山西师范大学研究生科研创新项目(批准号: 2024XSY36)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: panjx@sxnu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: zhangjinjun@sxnu.edu.cn

研究了粒子间响应的变化如何影响它们的自组装. 刘雳宇课题组及其合作组研究了由机器人组成的光敏活性物质, 在以大型发光二极管阵列为代表的平面动态资源环境中的运动行为^[19], 以及在外场驱动下, 机器人活性物质之间以及每个机器人与环境之间复杂的相互作用, 产生了时间反转对称性破缺有序迟滞^[20].

关于光场作用下活性体系集体运动的研究刚刚兴起, 还有很多问题值得去讨论, 尤其是活性物质呈现出的大尺度范围的动态自组装行为^[21-30]. 因此, 本文采用布朗动力学方法, 研究了光场作用下活性粒子的动态自组织行为. 通过分析各参数对体系动态自组织行为的影响, 建立并完善活性粒子相分离和各参数之间的依赖关系.

2 模型和方法

本文基于布朗动力学模拟^[31-40], 在模拟体系中所有粒子均采用活性布朗粒子模型 (ABP), 每个活性粒子作为自驱动小球, 其自驱力来源于光场. 先前研究表明, 活性粒子能够吸收光能实现自推进, 且其运动的平均速度随光照强度的增强呈线性增长^[41-44]. 图 1(a) 进一步展示了本文研究体系下, 粒子速度 v 与自驱力 F 的关系. 初步计算结果表明, 二者之间存在线性正比关系. 通过分析速度、光照强度及自驱力之间的正相关性, 验证了光照强度对粒子活性的调控作用. 为研究周期性条形光场下活性粒子的集体运动行为, 本文在二维 (2D) 平

面中构建了一个大小为 $100\sigma \times 100\sigma$ 的盒子. 方盒中活性粒子的面密度为 0.5, 并在 x 方向和 y 方向上同时施加等间距、等宽度的周期性条形光场, 使得沿 x 方向和 y 方向依次交替出现宽度为 20σ 的光照区和遮光区. 由于横向和纵向光场的叠加效应, 整个盒子形成如图 1(b) 所示的棋盘状分布^[14]. 在横向遮光区与纵向遮光区的重叠区域 (图 1(b) 深灰色部分), 由于没有光照的影响, 粒子的自驱力 $F = 0$, 粒子表现为普通的布朗粒子; 在其他区域, 粒子受到由于光照所引起的自驱力作用, 且光照越强, 粒子自驱力越大, 因此在横向光照区与纵向光照区的重叠部分 (图 1(b) 浅黄色部分), 粒子的自驱力最大.

所有粒子之间都采用纯排斥的 Week-Chandler-Andersen (WCA) 势:

$$U_{\text{WCA}} = \begin{cases} 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] + \epsilon, & r < r_c, \\ 0, & r > r_c, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $r_c = 2^{1/6}\sigma$ 为粒子的截断半径; σ 是粒子的直径; ϵ 是粒子间相互作用强度. 当 $r > r_c$ 时, 粒子之间的作用势为 0. 每个粒子的运动都遵循郎之万运动方程:

$$m\ddot{r}_i = -\frac{\partial U_i}{\partial r_i} - \zeta\dot{r}_i + F(r)\hat{u}_i(t) + \sqrt{2\zeta k_B T}\eta_i(t), \quad (2)$$

$$m\ddot{r}_i = -\frac{\partial U_i}{\partial r_i} - \zeta\dot{r}_i + \sqrt{2\zeta k_B T}\eta_i(t), \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_i = \sqrt{2D_t}\xi_i(t). \quad (4)$$

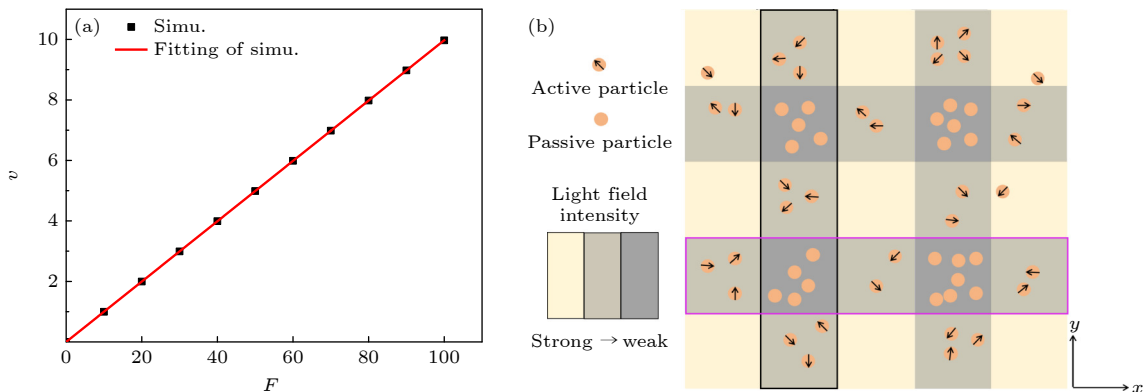


图 1 (a) 均匀光场中活性粒子速度 v 与自驱力 F 关系; (b) 周期性条形光场驱动活性粒子模型示意图; 黑色方框标注的区域为 I 区, 代表一个纵向遮光区; 紫色方框标注的区域为 II 区, 代表一个横向遮光区

Fig. 1. (a) Relationship between the velocity v of active particles and the self-propulsive force F in a uniform light field; (b) model schematic of active particles driven by the periodic striped light field. The region marked by the black box is Zone I, representing a longitudinal shaded region, while the region marked by the purple box is Zone II, representing a transverse shaded region.

(2) 式描述了在光照区域中活性布朗粒子的平动自由度上的运动, 其中 r_i 代表第 i 个胶体粒子的位置, U_i 表示相互作用势能, ζ 为平动摩擦系数, $k_B T$ 为标度温度, $\hat{u}_i = (\cos \theta, \sin \theta)$ 代表的是自驱力 F 方向上的单位矢量. (3) 式表示在遮光区中, 布朗粒子的运动方程. (4) 式表示旋转扩散运动方程, D_r 表示旋转扩散系数, 且 $D_r = 3D_0/\sigma^2$, D_0 表示平移扩散系数. $\eta(t)$ 和 $\xi(t)$ 代表高斯白噪声.

本文使用 LAMMPS 实现模拟过程^[45-51], 采用约化单位, 令 $m = 1$, $\varepsilon = 1$, $\sigma = 1$, $k_B T = 1$; 时间单位为 $\tau = \sqrt{m\sigma^2/k_B T}$. 此外, 本文中令摩擦系数 $\zeta = 10$, 以确保所有粒子都处于有效的过阻尼环境. 模拟采用周期性边界条件.

3 结果与讨论

3.1 相图

本文首先研究了光照强度在不同旋转扩散系数下对体系聚集结构的影响. 固定横向光场自驱力 $F_2 = 10$, 改变纵向光场自驱力 F_1 , 且光照区域宽度 W 和相邻光照区域间距 S 均为 20σ . 体系聚集结构随纵向与横向光场自驱力比值 $P = F_1/F_2$ 以及旋转扩散系数 D_r 变化的情况, 如图 2 所示. 图 2(a) 是体系聚集结构变化的相图; 图 2(b)–(e) 给出了各代表性稳定结构的密度分布图; 图 2(f) 给出了不同条件下各结构的纵向遮光区粒子数密度随时间的变化.

从图 2(a) 可以看出, 当旋转扩散系数较小 (即 $D_r \leq 0.005$) 时, 随着纵向与横向光场自驱力比值 P 的增强, 体系由不稳定团簇结构逐渐过渡到振荡结构. 较小的旋转扩散系数导致粒子在运动时难以快速调整方向以适应光场变化. 当粒子在光驱动下进入遮光区时, 会与已聚集在遮光区的粒子发生碰撞, 导致这些粒子被迫移出遮光区, 被移出的粒子受光场驱动, 会再次向遮光区运动, 进而导致粒子频繁进出遮光区, 无法形成稳定的聚集, 详见补充材料视频 SV1 和 SV2 (online). 同时, 当比值 P 较大时, 纵向光照强度较强, 粒子在光照区内运动的速度增大^[42], 导致碰撞更加频繁和剧烈. 当大量活性粒子撞击遮光区的粒子时, 遮光区内的粒子数密度会急剧下降. 随后, 被撞击到光照区的粒子在强光场驱动力的作用下, 快速返回遮光区, 导致密度回升, 这一过程形成了独特的振荡结构, 如图 2(f)

V 线所示. 反映了较强的纵向光场与较小的旋转扩散系数对粒子运动的共同影响. 在该振荡结构中, 纵向遮光区的粒子数密度随时间呈现准周期性波动, 且密度涨落较大. 相比之下, 不稳定团簇结构中, 粒子数密度变化较为随机, 波动较小, 且没有明显的周期性, 如图 2(f) VI 线所示. 对比图 2(f) V 线和 VI 线可以看出, 振荡结构的平均密度始终高于不稳定团簇结构. 这是因为在较强的光场作用下, 粒子更难停留在光照区, 导致光照区的粒子数显著减少, 遮光区的粒子数增加.

在较高的旋转扩散系数下 (即 $D_r \geq 0.01$), 体系整体上都呈现更加稳定的趋势, 详见补充材料视频 SV3–SV6 (online). 这一现象的根本原因在于旋转扩散系数较大时, 粒子运动方向变化更为迅速, 这使得粒子在遮光区与光照区之间移动时能够快速调整方向以适应光场变化, 从而减少频繁且剧烈的碰撞, 体系因此趋于更加有序和稳定, 如图 2(f) 中 I–IV 线所示. 这四种稳定结构在遮光区的粒子数密度变化趋于平稳, 表明体系已进入稳定状态.

图 3 显示, 随着纵向与横向光场自驱力比值 P 的增大, 纵向遮光区和横向遮光区的粒子数密度发生了反转. 这对应于图 2(a) 中旋转扩散系数较大时, 体系结构由横向条形转变为纵向条形. 换言之, 体系稳态状态的变化反映了粒子分布从横向主导逐渐向纵向主导过渡. 另外, 横纵聚集态的过渡呈现出不同的转变过程. 在 $D_r = 0.01$ 时, 体系的过渡态为条形格状混合结构; 而 $D_r = 0.05$ 时, 该过渡态转变为井字结构. 根据图 2(f) 可以看出, 条形格状混合结构的稳定性介于稳定结构和不稳定结构之间, 因此, 该结构既可理解为横向条形向纵向条形结构转变的过渡态, 也可视作体系稳定性变化过程中的过渡结构. 此外, 条形格状混合结构还存在另一种等概率的表现形式, 详见补充材料视频 SV7 (online).

模拟结果表明, 粒子会在遮光区和弱光照区内发生聚集, 这符合运动诱导相分离 (MIPS) 原理. 以纵向条形结构为例, 图 4(a) 绘制了该结构在横向遮光区 (II) 沿 x 轴方向的粒子数密度以及平均速度分布图. 结果显示, 由于遮光区光场最弱, 粒子的平均速度显著降低. 速度的减小导致粒子在该区域内发生聚集, 而粒子积累又进一步减缓其运动速度, 形成正反馈, 最终引发粒子群的高密度与

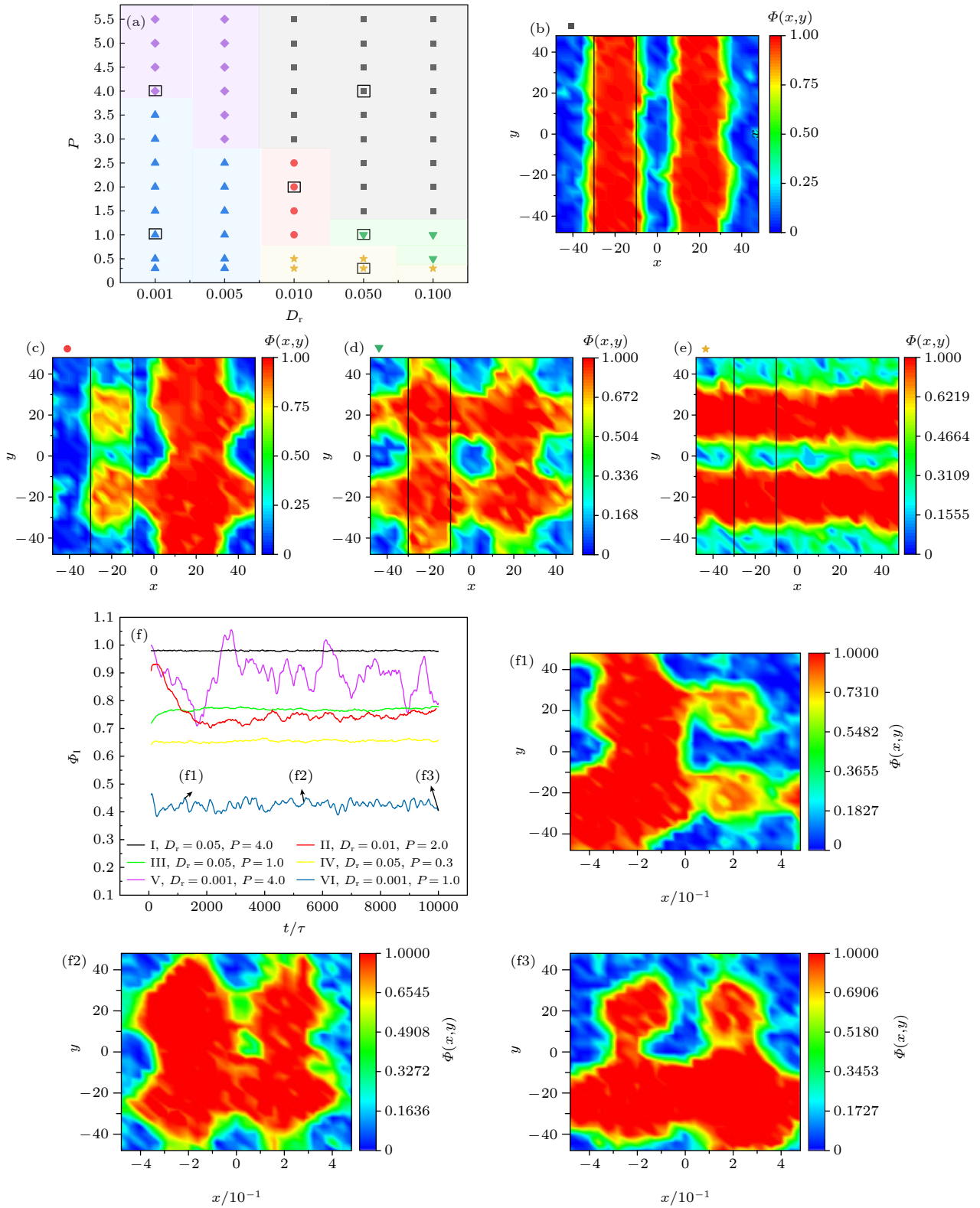


图 2 (a) 体系聚集结构相图分布, 其中 \blacklozenge 代表振荡结构; \blacktriangle 代表不稳定团簇结构; \blacksquare 代表纵向条形结构; \bullet 代表条形格状混合结构; \blacktriangledown 代表井字结构; \star 代表横向条形结构; (b), (c), (d), (e) 为代表性结构的密度分布图, 图中黑色方框代表纵向遮光区 I; (f) 不同结构下纵向遮光区 I 粒子数密度随时间的演化

Fig. 2. (a) Phase diagram of the system's aggregation structures. \blacklozenge represents an oscillatory structure; \blacktriangle represents an unstable cluster structure; \blacksquare represents a longitudinal stripe structure; \bullet represents a mixed striped block-like hybrid structure; \blacktriangledown represents a tic-tac-toe structure; \star represents a transverse stripe structure. (b), (c), (d), and (e) The density distribution of representative structures, with the black boxes indicating the longitudinal shading region I. (f) Temporal evolution of particle number density in region I for different structures.

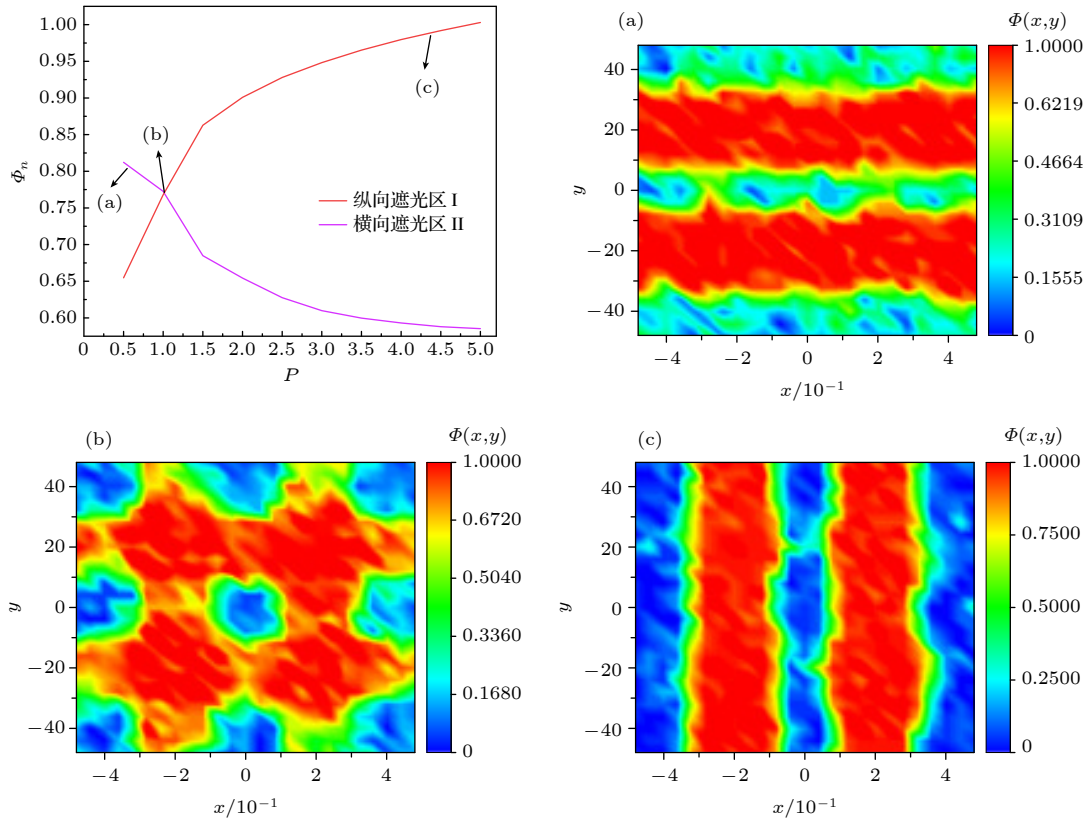


图 3 $D_r = 0.05$ 时纵向遮光区 I、横向遮光区 II 中粒子数密度 Φ_n 随纵向与横向光场自驱力比值 P 的变化

Fig. 3. Relationship between particle number density (Φ_n) and the ratio P of longitudinal to transverse light-induced self-propulsion forces in the longitudinal shading region I and the transverse shaded region II at $D_r = 0.05$.

低密度区域的相分离. 当比值 $P > 1$ 时, 纵向光照强度大于横向光照强度, 粒子主要受纵向光场的支配, 在纵向光照区粒子运动的速度较快, 抑制了在纵向光场区的聚集, 同时促进了纵向遮光区的聚集, 形成纵向条形结构; 同理, 当比值 $P < 1$ 时, 横向光场主导粒子的运动, 使得粒子倾向于聚集在横向遮光区, 形成横向条形有序排列. 当二者的光照强度接近, 无主导光场, 粒子则分布在横向与纵向的遮光区, 体系呈现井字结构. 这一过程反映了横向与纵向相对光照强度的变化对粒子活性及聚集行为的调控作用.

图 4(b) 展示了四种稳态结构粒子数密度的空间分布. 可以清晰地观察到相分离现象在各结构中的具体表现: 横向条形结构呈现持续的高密度分布, 而纵向条形结构、条形格状混合结构及井字结构由于横向与纵向遮光区重叠部分粒子聚集较多, 表现出双峰分布. 在这些结构中, 横向条形结构与井字结构的粒子数密度分布曲线涨落较小. 此外, 条形格状混合结构的双峰分布与纵向条形结构不同, 呈现不对称性, 其中一个峰值较低且峰宽较窄, 另一个峰值较高且峰宽较宽.

3.2 演化动力学

对体系聚集结构的转变, 可以从动力学角度予以分析, 为此, 计算了体系在不同条件下的粒子质心的均方位移 $\text{MSD} = \langle |\Delta r_i(t)|^2 \rangle$ 以及标度指数 $\alpha(t) = \frac{d \log(\text{MSD})}{d \log(t)}$. 图 5 展示了不同结构下 MSD 随时间演化的双对数图以及对应的标度指数 α 随时间的变化.

在不稳定团簇结构和振荡结构中, 如图 5(b) I 和 II 线所示, 标度指数 α 在整个模拟过程中始终大于 1, 表现出显著的超扩散行为. 表明粒子在整个演化过程中保持了较高的运动活性. 对于另外四种稳定状态, 如图 5(b) III—VI 线所示, 在早期阶段, 粒子在初期表现出超扩散行为, 表明粒子在该阶段扩散速率较快. 随着时间的推移, 这四种结构的标度指数 α 逐渐趋向 1, 最终表现出正常扩散行为. 这表明体系在较长时间尺度上达到了动力学平衡, 粒子的运动逐渐转向布朗运动, 并最终聚集在遮光区. 在这四种稳定结构中, 条形格状混合结构的标度指数始终高于其他三种稳态结构, 显示出较强的扩散趋势, 结合图 2(a) 进一步验证了将条形

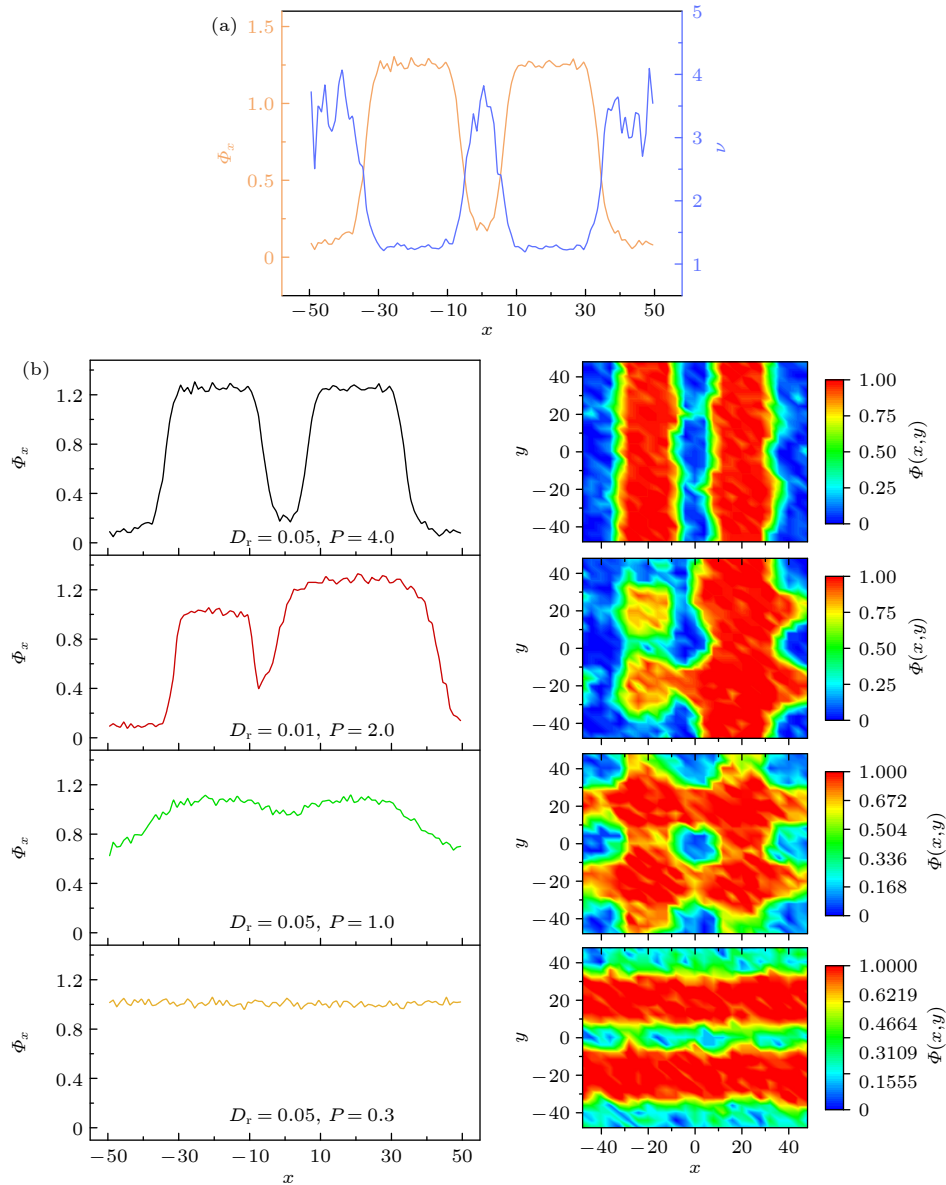


图 4 (a) 纵向条形结构在横向遮光区 (II) 内沿 x 轴方向的粒子数密度和速度分布图; (b) 四种稳定状态在横向遮光区 (II) 内沿 x 轴方向的粒子数密度分布图

Fig. 4. (a) Distributions of particle number density and velocity along the x -axis within the transverse shaded region (II) of the longitudinal stripe structure; (b) distributions of particle number density along the x -axis in the transverse shaded region (II) for four steady states.

格状混合结构视作不稳定态与稳定态之间过渡态的观点. 在横向条形结构和井字结构中, 尽管粒子在初期表现出超扩散行为, 但随着时间的推移, 标度指数 α 迅速下降, 甚至低于 1, 表现出亚扩散行为. 为了解释这一现象, 本文绘制了在 $D_r = 0.05$ 时, 不同比值 P 下标度指数 α 随时间演化的情况, 如图 6(a) 所示. 结果表明, 在此阶段的纵向比较中, 随着 P 的增加, α 随时间变化曲线呈现先下降后上升的趋势, 对应于体系结构由横向条形到井字结构, 最终转变为纵向条形的演变过程, 即井字结

构的亚扩散行为更显著. 这一现象可归因于两个相互竞争的因素. 当比值 P 较小时 (即纵向光照强度较弱), 体系结构由横向条形转变为井字结构的过程中, 陷停在横向和纵向遮光区域内的粒子数比例增加, 如图 6(b) 所示, 导致体系整体扩散活性下降, MSD 增长率减小. 然而, 随着 P 逐渐增大, 光照强度成为主要影响因素, 尽管此时遮光区内粒子数密度较高, 但由于光照较强, 遮光区与光照区边界处的粒子获得了较高的运动活性, 促使粒子的扩散速率增加.

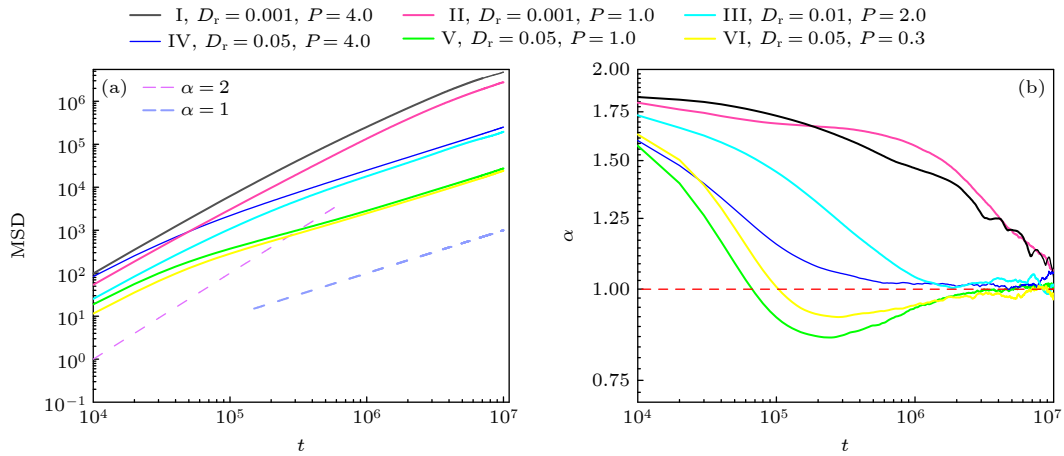


图 5 (a) 粒子质心的均方位移 MSD 随时间 t 变化的双对数图; 虚线表示斜率为 2.0 或 1.0; (b) 标度指数 α 随时间的变化
 Fig. 5. (a) Log-log plot of the mean squared displacement (MSD) of the particle center of mass as a function of time, where the dotted lines show slopes of 2.0 or 1.0; (b) scaling exponent α as a function of time.

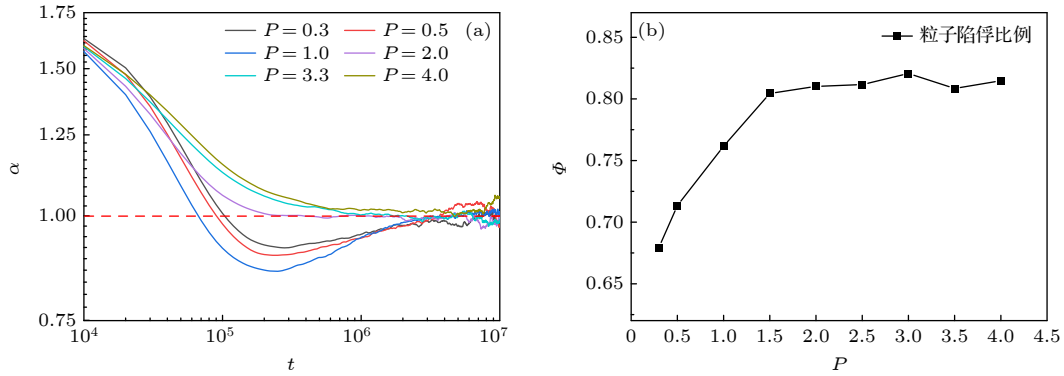


图 6 (a) 不同比值 P 下, 标度指数 α 随时间的变化; (b) $D_r = 0.05$ 时, 不同比值 P 下遮光区内的粒子数密度变化情况
 Fig. 6. (a) Variation of the scaling exponent α with time for different P ratios; (b) particle number density variation in the shadowed region as a function of ratio P at $D_r = 0.05$.

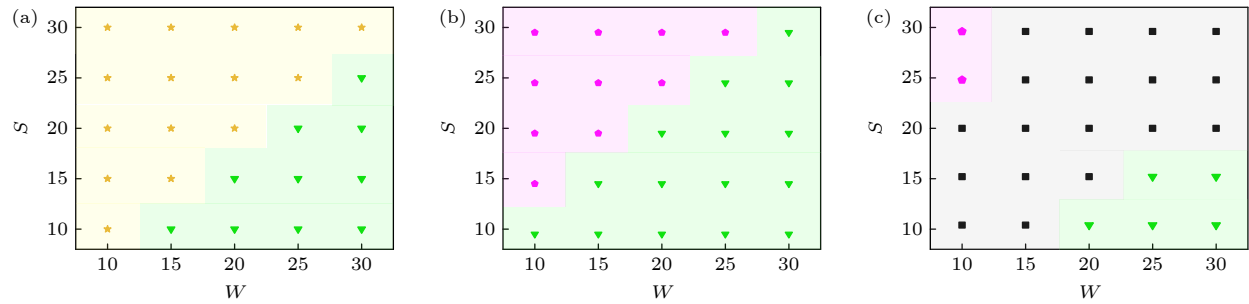


图 7 改变光照区域的宽度 W 和相邻光照区域间距 S 对体系聚集结构影响的相图 (★代表横向条形结构; ▼代表井字结构; ●代表棋盘状结构; ■代表纵向条形结构) (a) $D_r = 0.05, P = 0.5$; (b) $D_r = 0.05, P = 1.0$; (c) $D_r = 0.05, P = 1.5$
 Fig. 7. Phase diagrams showing the effect of varying the illumination region width W and the spacing S between adjacent illuminated regions on the aggregation structure of the system: (a) $D_r = 0.05, P = 0.5$; (b) $D_r = 0.05, P = 1.0$; (c) $D_r = 0.05, P = 1.5$.
 ★ represents the transverse stripe structure; ▼ represents the tic-tac-toe structure; ● represents the checkerboard-like structure; ■ represents the longitudinal stripe structure.

3.3 改变光照区域宽度 W 与相邻光照区域间距 S 对体系聚集结构的影响

为了进一步研究光场对粒子集体行为的影响, 本文系统地改变了稳定状态下光照区域的宽度 W

及相邻光照区域的间距 S , 所获得的相图如图 7 所示. 从图 7 可以看出: 当 $P = 0.5$ 时, 体系主要呈现出横向条形结构; 当 $P = 1.0$ 时, 井字结构占据主导地位; 而当 $P = 1.5$ 时, 体系则以纵向条形结构

为主. 这个结果与之前图 2(a) 体系聚集结构相图的分析结论保持一致, 进一步验证了在不同的光场下, 体系聚集结构随参数变化的趋势. 再者, 从整体趋势来看, 可以发现在相图的右下角, 即光照区域较宽、间距较窄 (即遮光区域较窄) 的条件下, 更容易形成井字结构. 这是由于较宽的光照区域为活性粒子的运动提供了更大的空间, 而较窄的遮光区域则限制了粒子的分布范围, 促使粒子在这些区域内紧密聚集. 同时由于粒子之间存在排斥作用, 粒子无法完全聚集在块状的遮光区域中. 正是这种几何限制和高密度粒子之间相互作用共同影响, 使得粒子倾向于形成井字结构. 此外, 相图中还出现了一种新的结构, 棋盘状结构, 详见补充材料视频 SV8 ([online](#)). 这种结构更容易在较宽间距条件下形成, 原因是宽间距增加了粒子迁移的难度, 最终导致粒子陷落在分立的棋盘格中.

4 结 论

区别于以往研究中仅考虑活性粒子^[44,52-56], 本文模型中的粒子在不同区域表现出不同特性: 在不同强度的光照区域, 表现为具有不同活性的主动布朗粒子, 而在遮光区则表现为普通的布朗粒子. 本文发现粒子会聚集在遮光区和弱光照区, 这是由于活性粒子的运动诱导了相分离 (MIPS), 不同光照强度下粒子运动的速度存在差异导致粒子自发分离为高密度和低密度区域. 在此基础上, 通过调节旋转扩散系数以及横向和纵向光照的相对强度, 可以调控粒子群的集体行为. 当光照区和遮光区在 x 轴和 y 方向均匀交替排列时, 系统表现出两种不稳定状态和四种稳定状态. 不稳定状态包括不稳定团簇结构和振荡结构; 稳定状态则为横向条形结构、井字结构、纵向条形结构以及条形格状混合结构. 其中, 条形格状混合结构可视为稳定态与不稳定态之间的过渡态. 随着旋转扩散系数 D_r 的增加, 粒子运动适应光场变化的能力越强, 系统整体趋于更加稳定. 在适当的旋转扩散系数下, 逐步提高纵向光照的相对强度, 体系结构由横向条形结构演变为纵向条形结构. 在动力学方面, 不稳定状态在整个模拟过程中表现为持续的超扩散行为, 而稳定状态则在初期表现为超扩散, 最终演化为正常扩散. 为深入研究光场对稳定状态下粒子行为的调控作用, 本文系统地改变光照区域的宽度 W 和相邻光

照区域的间距 S , 发现除先前主要结构外, 在较宽间距且较窄光照区域条件下, 体系还可形成棋盘状结构. 本文重点探讨了光照强度、旋转扩散系数以及光照区的宽度与间距对体系聚集结构的影响, 研究了粒子在复杂光场环境中的相分离行为, 为活性粒子体系聚集状态的调控提供了有益参考.

参考文献

- [1] Ramaswamy S 2017 *J. Stat. Mech.* **5** 054002
- [2] Ramaswamy S 2010 *Annu. Rev. Condens. Mater. Phys.* **1** 323
- [3] Tailleur J, Cates M E 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 218103
- [4] Martinez R, Alarcon F, Rodriguez D R, Aragonés J L, Valeriani C 2018 *Eur. Phys. J. E* **41** 91
- [5] Vladescu I D, Marsden E J, Schwarz-Linek J, Martinez V A, Arlt J, Morozov A N, Marenduzzo D, Cates M E, Poon W C 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 268101
- [6] Schweitzer F, Tilch B, Ebeling W 2000 *Eur. Phys. J. B* **14** 157
- [7] Erdmann U, Ebeling W, Schimansky-Geier L, Schweitzer F 2000 *Eur. Phys. J. B* **15** 105
- [8] Schweitzer F, Ebeling W, Tilch B 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 5044
- [9] Yang X, Manning M L, Marchetti M C 2014 *Soft Matter* **10** 6477
- [10] Stenhammar J, Tiribocchi A, Allen R J, Marenduzzo D, Cates M E 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 145702
- [11] Stenhammar J, Wittkowski R, Marenduzzo D, Cates M E 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 018301
- [12] Dolai P, Simha A, Mishra S 2017 *Soft Matter* **14** 6137
- [13] Gao Y W, Wang Y, Tian W D, Chen K 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 240501 (in Chinese) [高艺雯, 王影, 田文得, 陈康 2022 物理学报 **71** 240501]
- [14] Fernandez-Rodriguez M A, Grillo F, Alvarez L, Rathlef M, Buttinoni L, Volpe G, Isa L 2020 *Nat. Commun.* **11** 4223
- [15] Vutukuri H R, Lisicki M, Lauga E, Vermant J 2020 *Nat. Commun.* **11** 2628
- [16] Hernández R J, Sevilla F J, Mazzulla A, Pagliusi P, Pellizzi N, Cipparrone G 2020 *Soft Matter* **16** 7704
- [17] Zhang J H, Guo J J, Mou F Z, Guan J G 2018 *Micromachines* **9** 88
- [18] Bäuerle T, Fischer A, Speck T, Bechinger C 2018 *Nat. Commun.* **9** 3232
- [19] Wang G, Phan T V, Li S, Wombacher M, Qu J, Peng Y, Chen G, Goldman D I, Levin S A, Austin R H, Liu L Y 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 108002
- [20] Liu Y P, Wang G, Wang P L, Yuan D M, Hou S X, Jin Y K, Wang J, Liu L Y 2023 *Chin. Phys. B* **32** 068701
- [21] Humphrey W, Dalke A, Schulten K 1996 *J. Mol. Graphics* **14** 33
- [22] Ning H P, Zhang Y, Zhu H, Ingham A, Huang G S, Mei Y F, Solovov A A 2018 *Micromachines* **9** 75
- [23] Chen H X, Zhao Q L, Du X M 2018 *Micromachines* **9** 41
- [24] Xu L L, Mou F Z, Gong H T, Luo M, Guan J G 2017 *Chem. Soc. Rev.* **46** 6905
- [25] Wang W, Duan W T, Ahmed S, Sen A, Mallouk T E 2015 *Acc. Chem. Res.* **48** 1938
- [26] Chen C R, Mou F Z, Xu L L, Wang S F, Guan J G, Feng Z P, Wang Q W, Kong L, Li W, Wang J, Zhang Q J 2017 *Adv.*

- Mater.* **29** 3
- [27] Tang S S, Zhang F Y, Zhao J, Talaat W, Soto F, Karshalev E, Chen C R, Hu Z H, Lu X L, Li J X, Lin Z H, Dong H F, Zhang X J, Nourhani A, Wang J 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1809003
- [28] Sun Y Y, Liu Y, Zhang D M, Zhang H, Jiang J W, Duan R M, Xiao J J, Xing J, Zhang D F, Dong B 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 40533
- [29] Singh D P, Choudhury U, Fischer P, Mark A G 2017 *Adv. Mater.* **29** 32
- [30] Lin Z, Si T, Wu Z, Gao C, Lin X, He Q 2017 *Angew. Chem. Int. Ed.* **56** 13517
- [31] Wang Y, Shen Z L, Xia Y Q, Feng G Q, Tian W D 2020 *Chin. Phys. B* **29** 053103
- [32] Pan J X, Wei H, Qi M J, Wang H F, Zhang J J, Tian W D, Chen K 2020 *Soft Matter* **16** 5545
- [33] Ye S M, Liu P, Wei Z X, Ye F F, Yang M C, Chen K 2020 *Chin. Phys. B* **29** 058201
- [34] Zhou X L, Wang Y Z, Xu B J, Liu Y P, Lu D, Luo J, Yang Z Y 2023 *AIP Adv.* **13** 065332
- [35] Chen J M, Zhou X L, Zhang L X 2018 *Chin. Phys. B* **27** 118701
- [36] Quillen A C, Smucker J P, Peshkov A 2020 *Phys. Rev. E* **101** 052618
- [37] Liu P, Ye S M, Ye F F, Chen K, Yang M C 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 158001
- [38] Das S, Ghosh S, Chelakkot R 2020 *Phys. Rev. E* **102** 032619
- [39] Das S, Chelakkot R 2020 *Soft Matter* **16** 7250
- [40] Knežević M, Stark H 2020 *New J. Phys.* **22** 113025
- [41] Chen X G, Lin L H, Li Z C, Sun H J 2022 *Adv. Funct. Mater.* **32** 2104649
- [42] Volpe G, Buttinoni I, Vogt D, Kuemmerer H J, Bechinger C 2011 *Soft Matter* **7** 8810
- [43] Jahanshahi S, Lozano C, Liebchen B, Löwen H, Bechinger C 2020 *Commun. Phys.* **3** 127
- [44] Palacci J, Sacanna S, Steinberg A P, Pine D J, Chaikin P M 2013 *Science* **339** 936
- [45] Xia Y Q, Shen Z L, Tian W D, Chen K 2019 *J. Chem. Phys.* **150** 154903
- [46] Wang C, Li H S, Ma Y Q, Tian W D, Chen K 2018 *J. Chem. Phys.* **149** 164902
- [47] Shan W J, Zhang F, Tian W D, Chen K 2019 *Soft Matter* **15** 4761
- [48] Shi Z X, Jin Y, Jin Y Y, Tian W D, Zhang T H, Chen K 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 170501 (in Chinese) [石子璇, 金燕, 金奕扬, 田文得, 张天辉, 陈康 2024 物理学报 **73** 170501]
- [49] Wang J, Jiao Y, Tian W D, Chen K 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 190501 (in Chinese) [王晶, 焦阳, 田文得, 陈康 2023 物理学报 **72** 190501]
- [50] Tiwari C, Singh P S 2024 *Soft Matter* **20** 4816
- [51] Shen Y F, Hu H X, Luo M B 2024 *Soft Matter* **20** 621
- [52] Cates M E, Tailleur J 2015 *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **6** 219
- [53] Gomez-Solano J R, Samin S, Lozano C, Ruedas-Batuecas P, van Roij R, Bechinger C 2017 *Sci Rep.* **7** 14891
- [54] Caprini L, Marini Bettolo Marconi U, Wittmann R, Löwen H 2022 *Soft Matter* **8** 1412
- [55] Takatori S C, Yan W, Brady J F 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 028103
- [56] Bechinger C, Di Leonardo R, Löwen H, Reichhardt C, Volpe G, Volpe G 2016 *Rev. Mod. Phys.* **88** 045006

Dynamic self-assembly of active particle systems controlled by light fields*

GUO Sihang YANG Guangyu MENG Guoqing WANG Yingying
PAN Junxing[†] ZHANG Jinjun[‡]

(School of Physics and Information Engineering, Shanxi Normal University, Taiyuan 030032, China)

(Received 5 November 2024; revised manuscript received 4 February 2025)

Abstract

Active particle systems are nonequilibrium systems composed of self-propelled Brownian particles, where interactions between particles can give rise to various collective behaviors. This study, based on Brownian dynamics simulations, explores the effects of light intensity, rotational diffusion coefficient, and the width and spacing of illuminated regions on the aggregation structures of the system. First, this study examines the influence of light intensity on aggregation structures under different rotational diffusion coefficients, finding that as the rotational diffusion coefficient increases, the system gradually stabilizes. This stabilization is attributed to the reduced collision effects among particles at higher diffusion coefficients. Under suitable rotational diffusion coefficients, gradually increasing the ratio of longitudinal to transverse light-induced self-propulsion forces leads to a transition in the system's aggregation structure from a transverse stripe structure configuration to a tic-tac-toe structure, ultimately resulting in a longitudinal stripe structure. This indicates that the system's aggregation structure can be effectively controlled by changing the relative light intensity of the longitudinal and transverse illumination. From a dynamical perspective, an unstable structure consistently exhibits a super-diffusive behavior throughout the simulations, while stable structure transitions from initial super-diffusion to normal diffusion, indicating that under steady state conditions, particles aggregate in the shaded regions, exhibiting Brownian motion. To further investigate the influence of light field on collective particle behavior, in this study the width of the illuminated region and the spacing between adjacent illuminated regions are systematically varied, finding that the overall trends are consistent with previous conclusions. It is also observed that wider illumination regions with narrower spacing contribute to the formation of tic-tac-toe structures, while narrower illumination regions with wider spacing give rise to a novel structure—checkerboard structures. This study investigates the phase separation behavior of particles in complex optical field environments, providing some valuable ideas for controlling aggregation states in active particle systems.

Keywords: light field regulation, active particle, ordered structure

PACS: 05.40.Jc, 81.16.Dn, 05.40.-a, 82.20.Wt

DOI: [10.7498/aps.74.20241556](https://doi.org/10.7498/aps.74.20241556)

CSTR: [32037.14.aps.74.20241556](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20241556)

* Project supported by the Fundamental Research Program of Shanxi Province, China (Grant Nos. 202103021223245, 202303021212148), the Postgraduate Education Innovation Program of Shanxi Province, China (Grant No. 2024KY452), and the Postgraduate Education Innovation Program of Shanxi Normal University, China (Grant No.2024XSY36).

[†] Corresponding author. E-mail: panjx@sxnu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: zhangjinjun@sxnu.edu.cn



光场调控的活性粒子体系的动态自组装

郭思航 杨光宇 孟国庆 王英英 潘俊星 张进军

Dynamic self-assembly of active particle systems controlled by light fields

GUO Sihang YANG Guangyu MENG Guoqing WANG Yingying PAN Junxing ZHANG Jinjun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 090501 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241556

CSTR: 32037.14.aps.74.20241556

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241556>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

具有不同扩散系数的活性手征粒子分离

Separation of active chiral particles with different diffusion coefficients

物理学报. 2024, 73(20): 200201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240686>

活性浴中惰性粒子形状对有效作用力的影响

Effect of passive particle shape on effective force in active bath

物理学报. 2024, 73(15): 158202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240650>

振荡场作用下聚合物/纳米棒混合体系的自组装

The self-assembly behavior of polymer/nanorods hybrid system under oscillation field

物理学报. 2023, 72(7): 079401 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222207>

锥角调制的圆艾里涡旋光束构建光学针

Optical needle constructed by conical-angle modulated circular Airy vortex beams

物理学报. 2024, 73(17): 174203 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240878>

氧气空心阴极放电模拟

Simulation of hollow cathode discharge in oxygen

物理学报. 2022, 71(2): 025201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211150>

固定功率下大气压交流氩气等离子体射流的光谱特性

Spectral diagnosis of atmospheric pressure AC argon plasma jet at constant power

物理学报. 2023, 72(11): 115201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230307>