

文章编号: 1007-2780(2025)01-0171-16

## 液晶孤子的运动调控研究进展

倪洁<sup>1</sup>, 丁洋<sup>1</sup>, 贾奇麟<sup>1</sup>, 陆延青<sup>2</sup>, 汤星舟<sup>1\*</sup>, 李炳祥<sup>1\*</sup>

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院, 柔性电子(未来技术)学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京大学 现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 孤子在物理、生物、天文及信息工程等领域中被广泛观测和应用。在液晶材料中, 孤子的生成机理、稳定条件、操控方法和应用探索一直是科学家们感兴趣的研究热点。本综述回顾了液晶中非拓扑孤子与拓扑孤子运动调控的研究进展, 总结了利用电学、化学和光学等调控方法控制单个孤子的运动方向和速度的技术, 介绍了孤子的集群运动和自组装现象, 并讨论了孤子的运动调控在微粒运输、光束操纵等领域的潜在应用。本文对液晶孤子运动调控的进一步研究提供了思路, 并对液晶孤子在不同领域的潜在应用进行了展望, 为液晶孤子的研究提供新的可能。

**关键词:** 液晶; 孤子; 运动调控; 外场操控

**中图分类号:** O753<sup>+</sup>.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2024-0222 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2024-0222

## Research progress on the motion control of liquid crystal solitons

NI Jie<sup>1</sup>, DING Yang<sup>1</sup>, JIA Qilin<sup>1</sup>, LU Yanqing<sup>2</sup>, TANG Xingzhou<sup>1\*</sup>, LI Bingxiang<sup>1\*</sup>

(1. College of Electronic and Optical Engineering, College of Flexible Electronics (Future Technology),  
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Solitons have been widely observed and applied across various fields, including physics, biology, astronomy, and information engineering. In liquid crystal materials, the mechanisms of soliton generation, stability conditions, manipulation methods, and potential applications have long been research hotspots of interest to scientists. This review provides an overview of recent advances in the control of non-topological and topological soliton motion in liquid crystals. It summarizes techniques for controlling the direction and speed of individual soliton using electrical, chemical, and optical methods, introduces the collective motion and self-assembly phenomena of solitons, and discusses the potential applications of soliton motion control in areas such as microparticle transport and beam steering. This work offers insights

**收稿日期:** 2024-07-31; **修订日期:** 2024-08-31.

**基金项目:** 国家重点研发计划(No.2022YFA1405000); 国家自然科学基金(No.62375141, No.62405147); 江苏省自然科学基金(No.BK20212004); 南京邮电大学人才招聘自然科学研究启动基金(No.NY222105)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2022YFA1405000); National Natural Science Foundation of China(No.62375141, No.62405147); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No.BK20212004); Natural Science Research Start-up Foundation of Recruiting Talents of Nanjing University of Posts and Telecommunications (No.NY222105)

\*通信联系人, E-mail: xztang@njupt.edu.cn; bxli@njupt.edu.cn

into further research on the control of soliton motion in liquid crystals and explores the potential applications of liquid crystal solitons in various fields, providing new possibilities for the study of liquid crystal solitons.

**Key words:** liquid crystals; solitons; motion control; external field manipulation

## 1 引 言

液晶材料是一种介于各向同性液态和各向异性晶态之间的典型软物质材料<sup>[1-2]</sup>,其分子的平均取向被称为指向矢,记作  $\mathbf{n}$ 。通过光<sup>[3-5]</sup>、电<sup>[6]</sup>、热<sup>[7]</sup>、力<sup>[8]</sup>、磁<sup>[9-10]</sup>等外场可以对指向矢进行调控,从而实现液晶材料在不同领域的应用,如液晶显示<sup>[11]</sup>、电光调控<sup>[12]</sup>、生物医药<sup>[13-14]</sup>、电子元件<sup>[15-16]</sup>、智能穿戴<sup>[17]</sup>等。根据分子的排列方式可将液晶分为向列相液晶、近晶相液晶和胆甾相液晶。向列相液晶中,液晶分子具有取向有序性,但并无位置有序性;近晶相液晶由棒状或条状分子组成,分子排列成层,表现为二维有序性<sup>[18]</sup>;胆甾相液晶,也称手性向列相液晶,由向列相液晶和手性剂均匀混合形成,分子排列成层,层内分子取向有序,不同层分子取向略有变化,沿层的法线方向形成螺旋结构。胆甾相液晶指向矢转动  $2\pi$  的两层间的间距称为螺距,记作  $p$ <sup>[19-20]</sup>。

孤子,又称孤立波<sup>[21]</sup>,具备色散效应和非线性效应,其形状和速度在传播过程中保持恒定<sup>[22]</sup>。孤立波最早是由英国工程师 Russell<sup>[23]</sup>于 1834 年提出。他在一次航行中观察到船头前方有一个稳定的水包沿着河道前进,可以运动很远,于是描述了此种现象,并将这种水波命名为孤立波。1965 年, Zabusky 和 Kruskal<sup>[24]</sup>发现孤立波在对撞后能够保持其原本状态,表现出类似粒子的行为,因此引入了“孤子”的概念。孤子不仅可以在水中形成,还出现在各种物理系统中,如等离子体<sup>[25]</sup>、激光脉冲<sup>[26]</sup>、磁场系统<sup>[27-29]</sup>、超流体<sup>[30]</sup>等。

液晶孤子是一个新的研究热点,其很大程度上依赖于液晶的介电各向异性<sup>[31]</sup>,可根据其拓扑性质分为非拓扑孤子和拓扑孤子两种类型<sup>[32]</sup>。根据目前关于它的研究,非拓扑孤子广泛存在于不同的液晶相中<sup>[33-34]</sup>,而拓扑孤子主要存在于胆甾相液晶中。非拓扑孤子体现为指向矢的局部畸变,不涉及拓扑性质的变化,其指向矢可通过

连续变化平滑过渡到向列相态。三维非拓扑液晶孤子很难实现。2018 年, Bing-Xiang Li 等人首次在向列相液晶中发现了电控稳定传输的非拓扑孤子<sup>[35]</sup>,此后, Satoshi Aya、Yuan Shen 等人均在液晶体系中实现了非拓扑孤子的稳定存在及运动<sup>[36-37]</sup>。拓扑孤子的指向矢具有拓扑结构<sup>[38]</sup>,并受到拓扑保护,这意味着它们的指向矢场在没有被破坏取向或引入新的缺陷的情况下无法平滑过渡到向列相态。拓扑孤子的研究最早可以追溯到 18 世纪, Gauss 预测物理场中会存在“绳结”一样的结构,这些结构可以表现出粒子性<sup>[32,39]</sup>。此后 Skyrme 在 1962 年提出了三维介子理论<sup>[40]</sup>,并将不同重子数的基本粒子建模为具有不同拓扑度的拓扑孤子,这也是拓扑孤子这一概念的首次提出。为了纪念 Skyrme,人们以其名命名了这种拓扑孤子,即斯格明子(Skyrmion)。目前,拓扑孤子在物理学的许多领域中得到了研究,如量子理论中的瞬子(Instanton)<sup>[41-42]</sup>、超导体中的涡旋(Vortice)<sup>[43-44]</sup>、玻色-爱因斯坦凝聚态中的旋子(Roton)<sup>[45]</sup>以及粒子物理中的斯格明子<sup>[46]</sup>。液晶中关于拓扑孤子的研究最早由 Bogdanov 等人提出,并在液晶中建立了斯格明子的模型<sup>[47]</sup>。随后, Ivan 等人首次在液晶系统中实验观察到了拓扑孤子,即低维斯格明子<sup>[48]</sup>。自此之后,各种类型的拓扑孤子在液晶中被发现,如 Hopfion<sup>[49]</sup>、Taron<sup>[50]</sup>、Heliknoton<sup>[51]</sup>以及 Twistion<sup>[52]</sup>。

液晶孤子在外场作用下展现出了丰富的运动特性,为其在微粒运输和信息编译领域的应用提供了可能。不仅如此,孤子也可以被应用于光束操纵、微型计算、传感、防伪等领域。总的来说,孤子运动调控的研究有利于人们不断探索孤子形成与运动的深层机制,从而推动液晶中孤子的发展和应用,为信息通信和传感领域带来更多的创新和发展机遇。

近年来,已有综述报道了液晶孤子的产生和稳定条件<sup>[53-56]</sup>及指向矢结构的分析<sup>[57]</sup>,然而,鲜少见到关于液晶孤子运动调控的系统性综述。本

文旨在总结液晶孤子运动调控的研究进展,描述了利用电学、化学和光学等调控方法控制液晶孤子直线运动和转向运动的现象。随后,介绍了孤子的集群效应,包括集群运动和自组装现象。最后,总结了孤子运动调控的应用,对微粒运输和光束操纵等技术进行了简要介绍,并对孤子研究的未来发展方向进行了展望。

## 2 非拓扑孤子的运动调控

2018年,Bing-Xiang Li<sup>[35]</sup>等研究人员发现,给向列相液晶 CCN-47 施加一个垂直于取向方

向的正弦交流电场,会产生许多快速运动的结构,这些结构实际上是一种具有三维结构的耗散型非拓扑孤子,被命名为“指向子(Directron)”。指向子其实是向列相液晶在电场作用下产生的局部的稳定的指向矢形变,在指向子内部,挠曲电效应驱动指向子运动。图 1(a)是指向子的指向矢分布图以及其在不同电压下的运动情况。随后,研究人员在 2019 年发现,通过改变驱动电压的幅值可以控制孤子的运动方向<sup>[58]</sup>。在频率固定的情况下,当电压  $U=8\text{ V}$  时,孤子沿取向方向运动;电压  $U=10\text{ V}$  时,孤子垂直于取向方向运动,见图 1(b)。当电压从  $8\text{ V}$  突变到  $11\text{ V}$

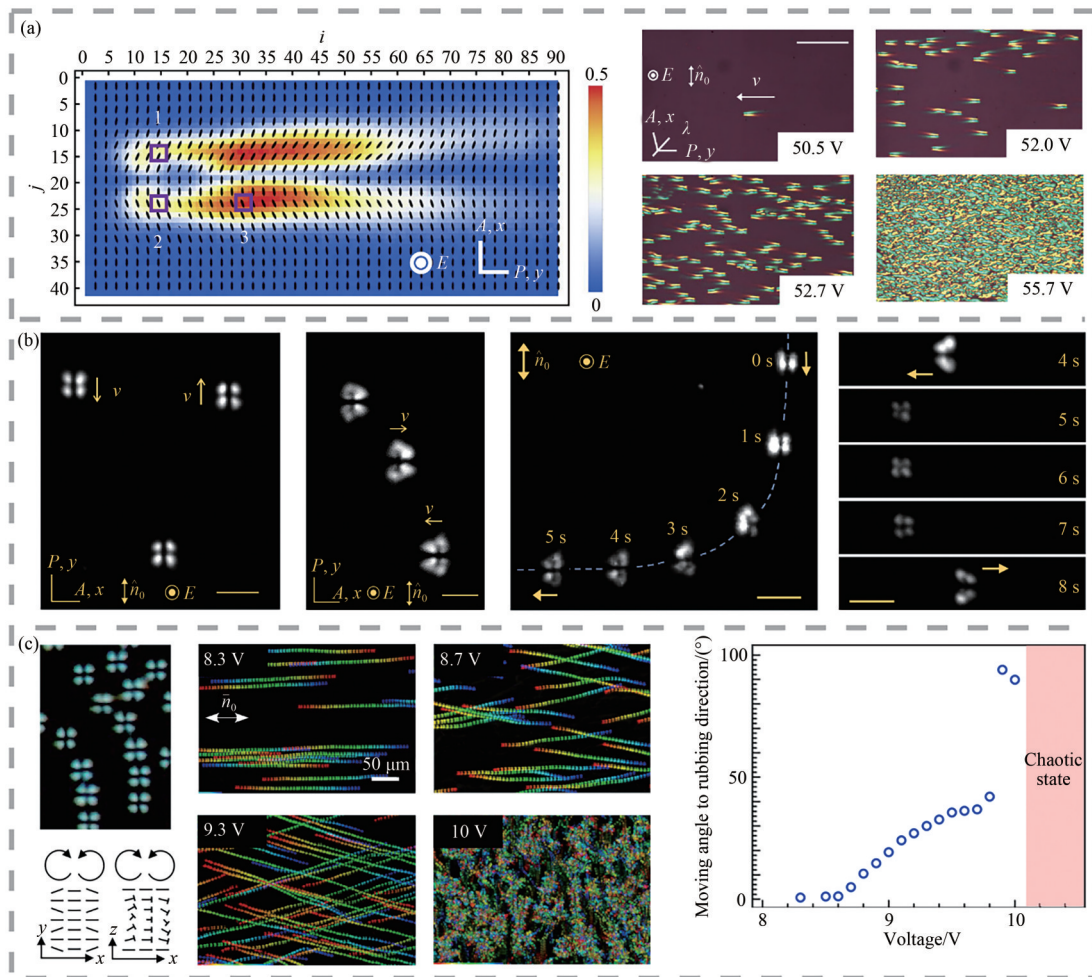


图 1 (a) 负性向列相液晶中指向子的指向矢分布及不同电压幅值下的直线运动<sup>[35]</sup>; (b) 指向子在不同电压幅值下的运动情况及  $90^\circ$ 、 $180^\circ$  转向<sup>[58]</sup>; (c) 正负性混合液晶中孤子的偏振光学显微图(Polarized Optical Microscope, POM)及不同电压幅值下孤子的运动轨迹和偏转角度<sup>[36]</sup>。

Fig. 1 (a) Director field of Directrons in negative nematic liquid crystal and their rectilinear motion under different voltage amplitudes<sup>[35]</sup>; (b) Motion of Directrons under different voltage amplitudes and  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  changes in direction<sup>[58]</sup>; (c) POM(Polarized Optical Microscope) images of solitons in positive and negative hybrid liquid crystals, along with the solitons' motion trajectories and deflection angles under different voltage amplitudes<sup>[36]</sup>.



时,孤子运动方向从沿取向方向变成垂直于取向方向;降低电压时,运动变化情况相反,从垂直于指向矢变成沿指向矢方向。在这两种情况下,指向子的运动方向都改变了 $90^\circ$ 。通过瞬间切换电压大小,可使孤子的运动方向发生 $180^\circ$ 反转,还可以实现两个孤子的合二为一,即两个沿背景指向矢方向运动的孤子碰撞后合并为一个垂直于背景指向矢运动的孤子。2022年,Xing-Zhou Tang<sup>[59-60]</sup>等人对指向子构建理论模型,强调了挠曲电是产生稳态孤子的关键要素。根据 Derrick-Hobart theorem<sup>[61-62]</sup>,不存在稳态的三维孤子。该研究证实挠曲电效应给孤子提供了动力,让孤子以一定的速度运动,并能够维持孤子的形貌。

另一项研究中,Satoshi Aya<sup>[36]</sup>等人提出了一种新的机制,将正性向列相液晶 E7 与负性向列相液晶 CCN-47 混合,对其施加低频正弦交流电场,离子的存在改变了局域的指向矢分布,从而产生孤子。通过改变施加电压的幅值,实现了对孤子运动角度范围的控制,可调范围约为 $50^\circ$ ,如图 1(c)所示。当电压较大时,孤子运动变

得混乱无序。此外,他们还研究了孤子的分裂。在分裂过程中,孤子会分叉并斜向移动,进而形成两个孤子。Yuan Shen<sup>[37]</sup>在 2020 年对正性液晶 E7 用偶氮苯磺酸染料(SD1)取向<sup>[63]</sup>并施加一个低频交流电场,产生了大量的指向子,且指向子以较快的速度作直线运动。SD1 是一种液晶光致取向材料,通常被旋涂于基板作为液晶盒的取向层。当取向层经过线偏振紫外光照射后,可形成垂直于紫外光偏振方向的取向。由于光取向所提供的锚定能较弱以及所用的 SD1 会逐渐溶解到液晶中并产生大量的离子,这些离子会在外界电场的作用下定向移动从而在液晶中产生各向同性流,这些离子流会导致弗里德里克斯转变(Freedericksz Transition)从而产生指向子。

非拓扑孤子不仅能在向列相液晶中产生<sup>[64-66]</sup>,在胆甾相液晶以及近晶相液晶中也可产生。Yuan Shen<sup>[33]</sup>在 2020 年对比了向列相液晶和胆甾相液晶中的指向子。电对流可以诱导孤子产生及运动。在负性向列相液晶 ZLI-2806 中,施加方波交流电场,指向子呈现“蝴蝶”般的形状;而在胆甾相

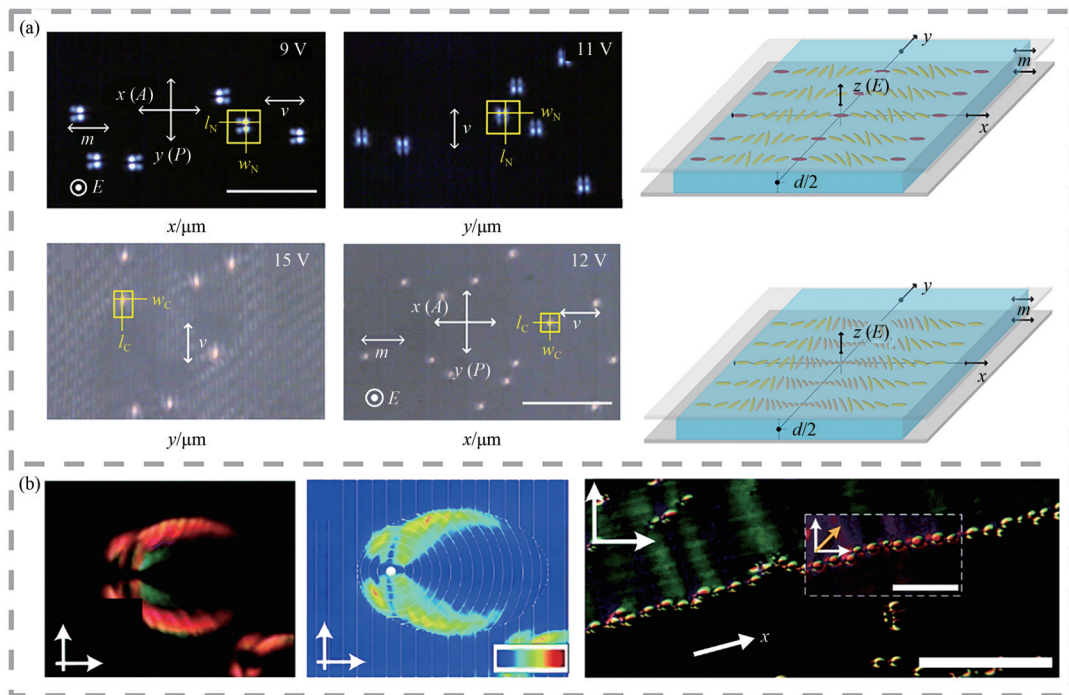


图 2 (a) 向列相液晶和胆甾相液晶中指向子在不同电压下的运动情况<sup>[33]</sup>; (b) 近晶相液晶中燕尾孤子的 POM 图、光强分布及孤子链的运动<sup>[34]</sup>。

Fig. 2 (a) Motion of Directrons in nematic liquid crystal and cholesteric liquid crystal under different voltages<sup>[33]</sup>; (b) POM images, light intensity distribution, and motion of Swallow-tail solitons in smectic liquid crystal<sup>[34]</sup>.



液晶系统中, 指向子呈现“子弹”形状, 见图 2(a)。“子弹”状孤子的中心轴指向矢方向与液晶盒法线方向相同, 指向矢由中心向两侧依次扭转相同的角度, 但孤子左右最外侧指向矢方向关于孤子中心轴对称。相同的是, 增加电压的幅值, 孤子的运动方向会从沿  $x$  轴方向运动变成沿  $y$  轴方向运动。此外, Yuan Shen 在 2021 年证明了在近晶相液晶中也可以产生孤子<sup>[34]</sup>。这些孤子呈现出“燕尾”状, 如图 2(b) 所示。“燕尾”状孤子内部指向矢沿近晶层逐渐形成曲线, 其曲率沿垂直近晶层方向逐渐减小, 曲率在椭圆的一个焦点处达到最大值, 并作为孤子的核心。由于近晶层的变形, 个别孤子之间可能存在长程吸引力, 孤子可以形成线状链, 以恒定速度移

动。同时, 又由于施加电场破坏了对称性, 长线状链的孤子将沿着近晶层向前移动。2024 年, 陈鹭剑课题组<sup>[67]</sup>在胆甾相液晶中发现了准静态孤子的分裂行为。

综上所述, 孤子的运动可被电场调控, 此外光控取向或化学试剂也能对孤子的运动产生影响。Yuan Shen 等人通过光控取向对 3 个区域进行了不同方向的取向, 在图 3(a) 中, 孤子一旦穿过不同区域的边界, 就会改变运动方向<sup>[33,37]</sup>。陈鹭剑课题组<sup>[68]</sup>也通过光控取向技术设计了复杂的取向层, 使孤子沿着锯齿形和鱼钩形轨迹运动。随后, 该课题组<sup>[69]</sup>又证明了在电场与光场的同时作用下, 可以对指向子的运动方向、速度和轨迹进行精确控制。此外, 他们还证明动态

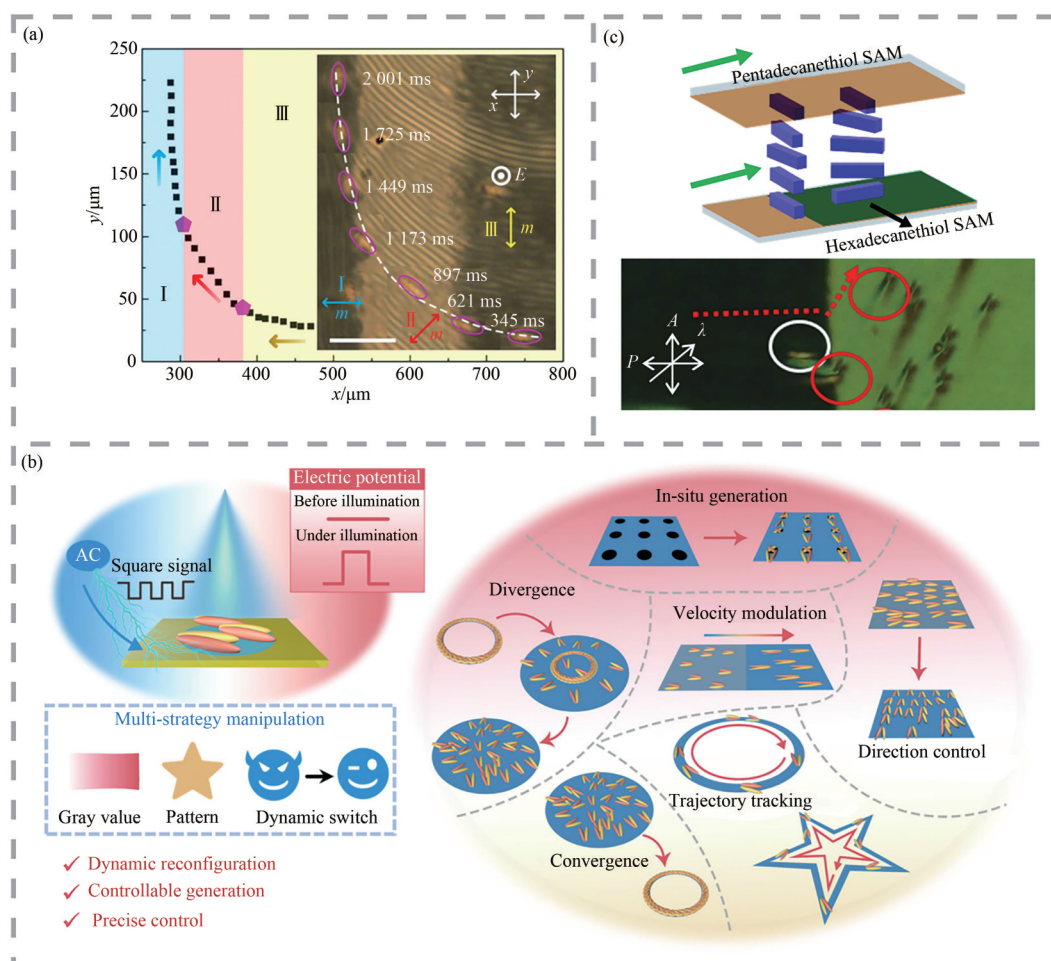


图 3 (a) 利用光控取向技术实现孤子的轨迹化运动<sup>[33]</sup>; (b) 基于电场、光场调控的指向子的动态行为<sup>[69]</sup>; (c) 化学处理和扭曲排列实现孤子运动方向改变<sup>[70]</sup>。

Fig. 3 (a) Motion direction change of solitons powered by photopatterning<sup>[33]</sup>; (b) Dynamic behavior of Directrons controlled by electric and light fields<sup>[69]</sup>; (c) Changing the direction of soliton motion through chemical treatment and twisted alignment<sup>[70]</sup>.

光模式可以实现指向子的集群运动,如聚集和分散等,见图 3(b)。Soumik Das<sup>[70]</sup>等人在 2022 年通过化学处理玻璃基板表面,并结合扭转排列取向,可以实现图 3(c)中孤子沿不同方向运动。

### 3 拓扑孤子的运动调控

胆甾相液晶为拓扑孤子的稳定产生及运动提供了良好的实验环境,因此受到了广泛的关注<sup>[71]</sup>。2017 年,Ivan 课题组<sup>[72]</sup>报道了在胆甾相液晶中,通过施加调制电场驱动斯格明子在二维平面内蠕动。在图 4(a)中,在没有电场时,斯格明子中心轴与基板垂直;施加交流电压时,由

于液晶的负介电各向异性,斯格明子周围的指向矢从初始垂直方向摆动到平行方向,这样的摆动会随着调制波的频率反复进行,从而实现了类似于蠕动的单向运动。Yuan Shen<sup>[73]</sup>等人发现在正性向列相液晶 E7 中加入手性剂,如图 4(b)所示,通过施加低频调制的电场,指向矢旋转到垂直方向,从而诱导斯格明子做直线运动。通过改变电场和频率,孤子可以在 y 轴改变其运动方向。在一定的频率和电压下,存在向左移动速度较慢的大孤子和向右移动速度较快的小孤子。在移动过程中,如果它们相互碰撞,小孤子就会被大孤子吸收,且碰撞后的大孤子持续缩小为小孤子,并以更快速度向相反方向移动。

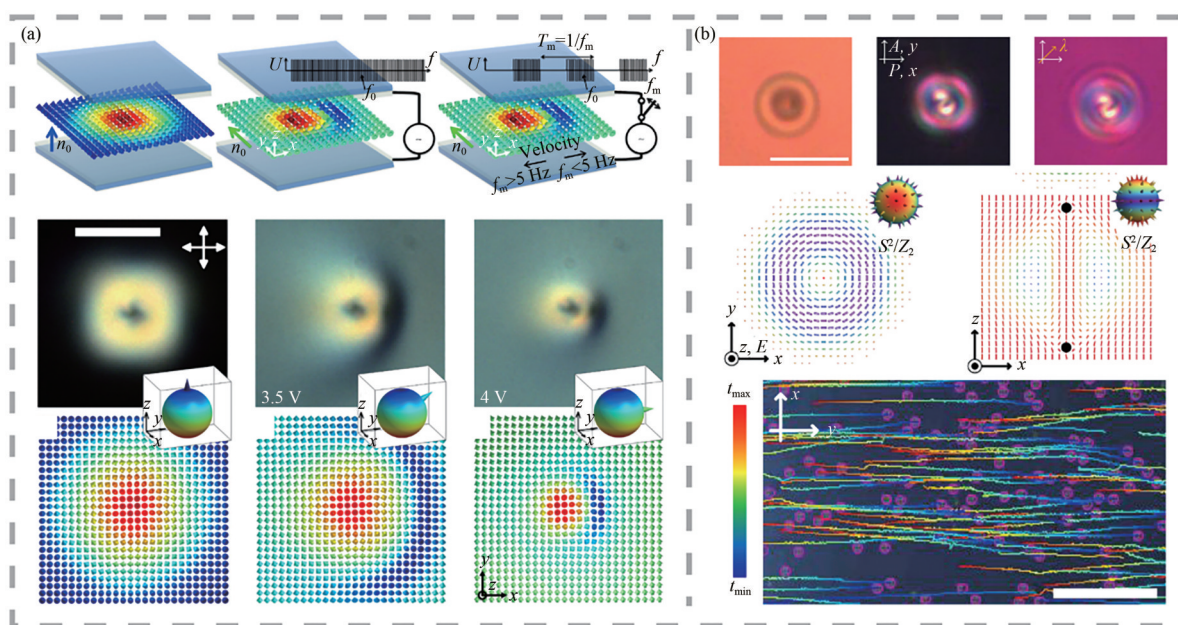


图 4 (a) 斯格明子蠕动过程的指向矢变化<sup>[72]</sup>; (b) 斯格明子的 POM 图、指向矢分布及调制电场驱动斯格明子的直线运动<sup>[73]</sup>。  
Fig. 4 (a) Director field variation during the squirring motion of skyrmions<sup>[72]</sup>; (b) POM images, director field, and modulation electric field induced motion of skyrmions in a straight line<sup>[73]</sup>.

Ivan 课题组还发现了另一种新型拓扑结构,可以通过电场调控它们的运动。研究人员利用一个非极性胆甾相液晶系统来展示孤子与漩涡共同自组装,形成具有自发折叠的空间局域拓扑对象,这些孤子-漩涡组合,称之为“Möbiuson”<sup>[74]</sup>,类似于莫比乌斯带表面。对其施加电场后,具有不同对称性结构的 Möbiusons 在折叠后展现出旋转和平移运动,见图 5(a)。

随后,研究人员在 2023 年将 Möbiusons 通过光镊组装形成多聚体 (Polyskyrmionomer)<sup>[75]</sup>,多聚体的结构和对称性决定了其运动情况,图 5 (b) 展示的是以二聚体为例,在电场作用下,二聚体构型旋转蠕动。非对称的多聚体做定向旋转运动,例如三聚体。更加高阶的多聚体还表现出更复杂的动态行为,如弯曲、自折叠和波动等。



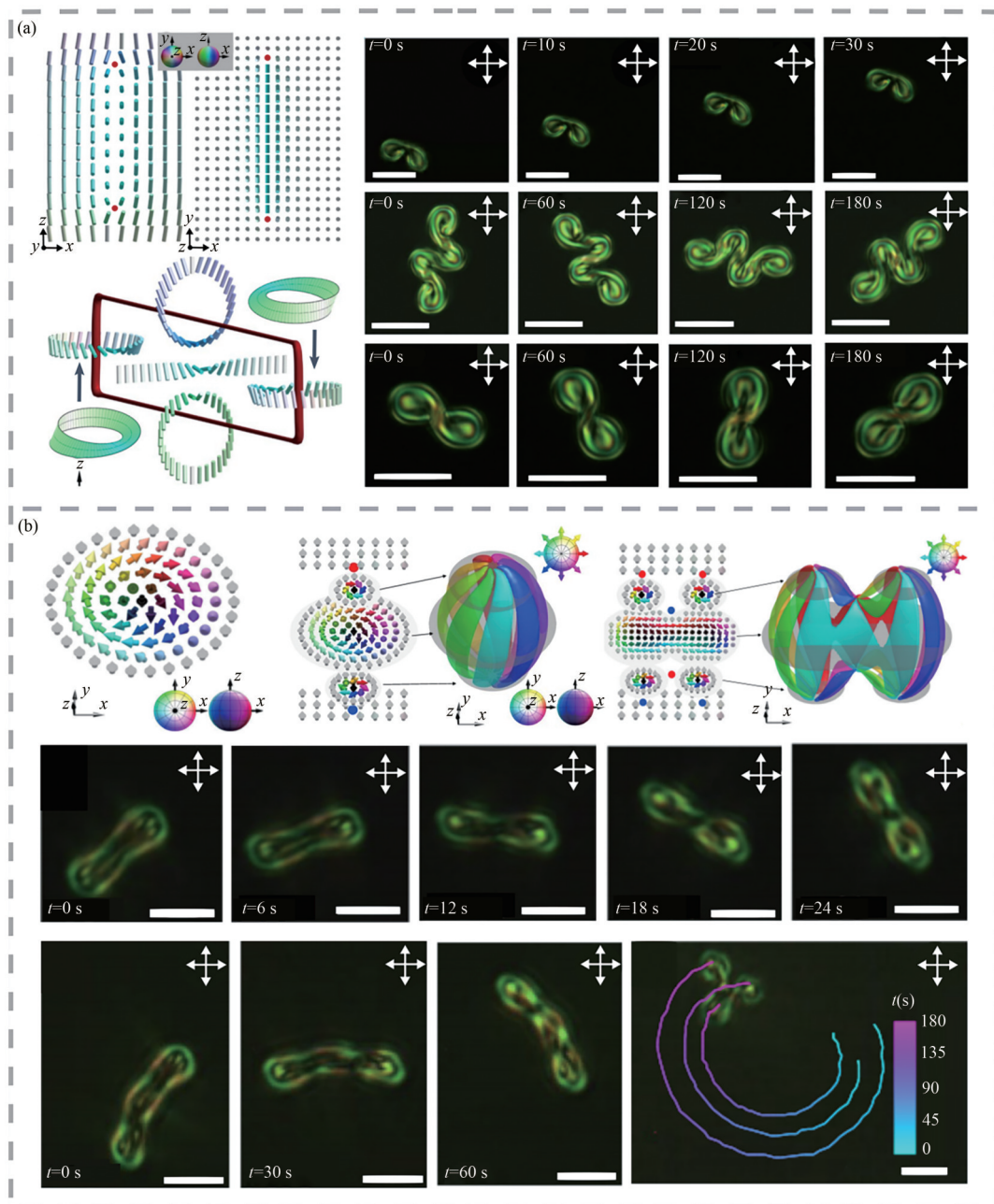


图 5 (a) Möbiusons 的指向矢分布及运动情况<sup>[74]</sup>; (b) 多聚体的指向矢分布及运动情况<sup>[75]</sup>。

Fig. 5 (a) Director field and motion of möbiusons<sup>[74]</sup>; (b) Director field and motion of polyskyrmionomers<sup>[75]</sup>.

#### 4 孤子的集群效应

液晶孤子还具有迷人的集群效应。2022年, Yuan Shen 等人在胆甾相液晶中发现了非拓扑孤子中指向子的集群运动<sup>[76]</sup>, 如图 6(a)所示, 就像鱼群所表现出的那样, 群体的面积和形状随着群的旋转而变化。在这项研究中, 电场驱动下成百上千的指向子被激发出来并不断地相互碰撞和运动, 见图 6(b)。这些指向子刚开始呈现出无规

则的运动, 但是随着时间的推移, 最终同步化并自组装成不同大小的指向子群。此外, 在图 6(c)中, 通过增加电场的强度使指向子的集群运动由初始的波浪状运动(运动轨迹有弯曲转向)转变为线性运动(往同一方向作直线运动), 最后转变为混乱的非相干运动(运动方向无序)。同年, 研究人员通过调节外加电场对指向子数量进行了控制<sup>[77]</sup>。在高密度情况下, 指向子群会同步运动并自组装成一个二维六边形晶格阵列。通过对



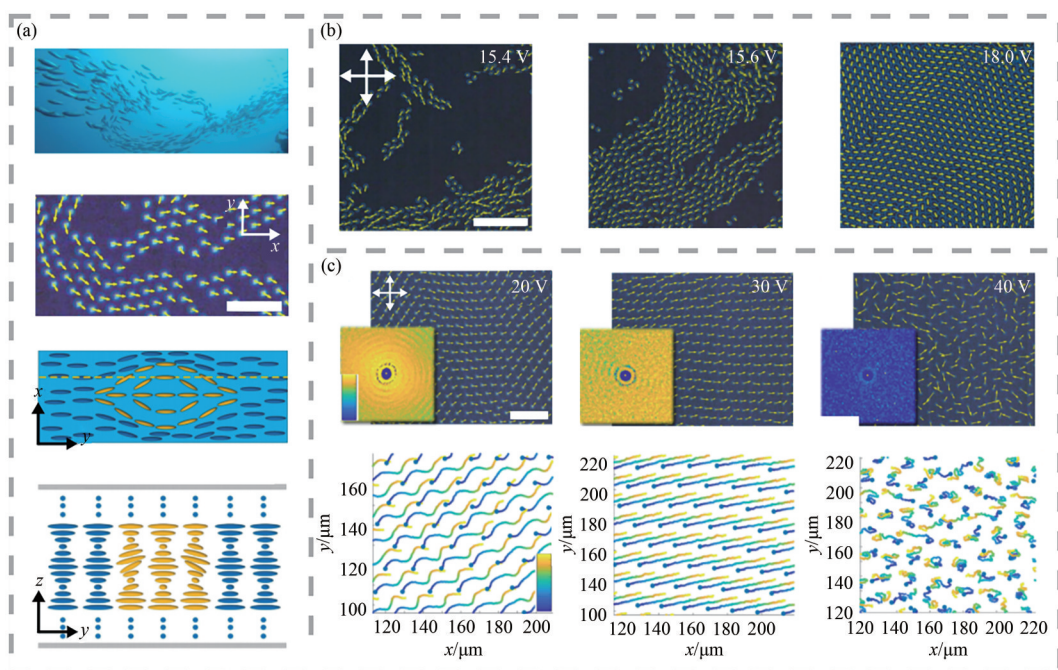


图6 (a) 指向子的集群运动及指向矢分布<sup>[76]</sup>; (b) 不同电压下指向子的集群运动<sup>[76]</sup>; (c) 指向子集群运动的轨迹<sup>[76]</sup>。  
Fig. 6 (a) Collective motion of Directrons and director field distribution<sup>[76]</sup>; (b) Collective motion of Directrons at different voltages<sup>[76]</sup>; (c) Trajectory of collective motion of directrons<sup>[76]</sup>.

指向子晶格位置和方向相关函数进行定量分析,发现该指向子晶格阵列正处于“六边形相”。除了类似鱼群外,研究人员还提出了许多不同种类的微型实验体系来模拟集群运动,例如细菌群<sup>[78]</sup>、电场或磁场驱动的粒子群<sup>[79]</sup>等。

2019年, Hayley<sup>[80]</sup>在胆甾相液晶中通过驱动电场实现了斯格明子的集群运动,图7(a)是未聚集的斯格明子的运动轨迹,单个孤子表现出平移运动。图7(b)展示了孤子团和孤子链的分布。在图7(c)中,当成百上千的斯格明子紧密排布时,施加一定时间的电场后,每个孤子都沿着同一方向运动,表现出集群运动。除此之外,该研究还展现了斯格明子团外围孤子的运动不受内部聚集孤子的影响。单个的斯格明子运动速度比孤子团更快,并随着时间的推移演变成斯格明子链,见图7(d)。除了集群运动,还存在拓扑孤子的自组装现象。2015年, Ivan课题组发现了拓扑孤子的弹性自组装<sup>[81]</sup>,通过改变电压,拓扑孤子会从初始的密集六边形排列逐渐转变为链状分布。Ivan课题组<sup>[82]</sup>利用光镊技术对平行取向的胆甾相液晶盒的某一处进行激发,发现光斑附近的指向矢会发生剧烈变化,从而激发出一个类似粒子的结构。当施加一个较小的电场(电场大

小不足以使胆甾相螺旋轴翻转)时,这种结构可以稳定存在,称之为 Heliknoton。调小光镊的激光强度可以移动孤子:将单个孤子靠近晶格时,其会被自动吸附,从而自组装成新的晶格,晶格常数可由电场控制。当电压幅值增加,明显发现孤子变大,晶格间距减小。二维自组装晶格在横向和轴向方向均可移动,可形成双层 Heliknotons 晶格结构,见图8(a)。2020年, Hayley<sup>[83]</sup>在胆甾相液晶中演示了 Torons 自组装晶格的运动。通过施加调制电场,可以快速产生大量 Torons, Toron 晶格沿着大致相同的方向做平移运动,而单个的 Toron 在晶格内也经历电场周期变化,沿着自发选择的方向进行运动,呈现局部蜿蜒但整体直线的运动轨迹,如图8(b)所示。

孤子的集群运动还可以用光引导。Hayley<sup>[84]</sup>等人通过添加一种光敏手性剂来调节蓝光照射的偏振方向,进而引导斯格明子的集群运动。如图9(a)所示,随着时间的推移,斯格明子自发向某一区域运动。不仅如此,通过掩模板和蓝光照射诱导相结合的操纵机制,孤子会沿着预设的光轴区域移动,形成斯格明子链,见图9(b)。2019年, Hayley等研究人员又对孤子晶格进行蓝光图案投影<sup>[85]</sup>。图9(c)展示的是在一个紧密排列的六

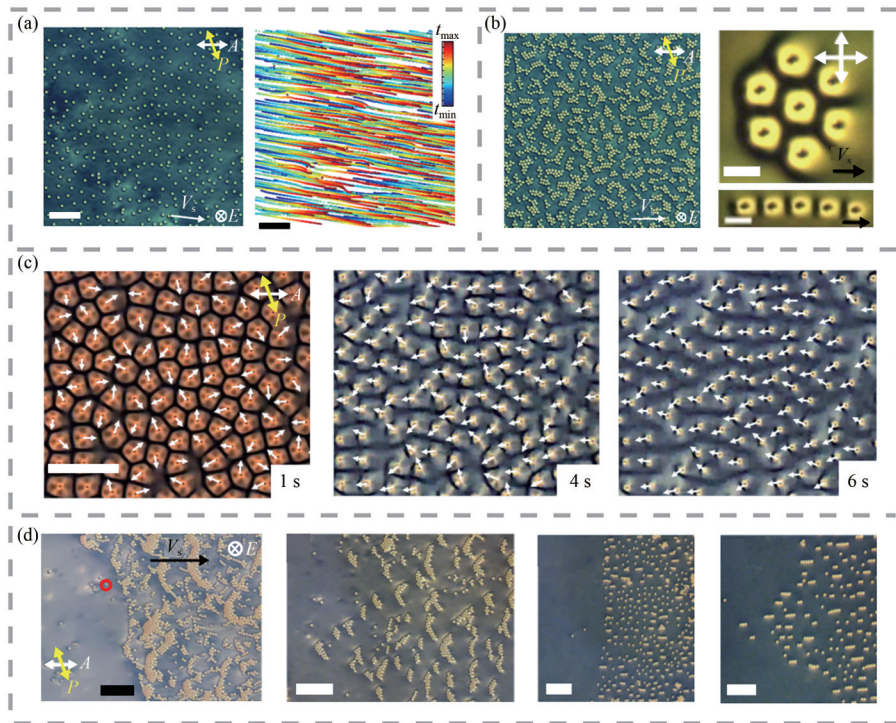


图 7 (a) 未聚集斯格明子表现出的平移运动<sup>[80]</sup>; (b) 斯格明子的动态自组装和线性链<sup>[80]</sup>; (c) 斯格明子运动方向由随机变为统一<sup>[80]</sup>; (d) 斯格明子团外围孤子的运动<sup>[80]</sup>。

Fig. 7 (a) Dispersed skyrmions exhibiting translational motion<sup>[80]</sup>; (b) Dynamic self-assembly and linear chains of skyrmions<sup>[80]</sup>; (c) Motion direction of skyrmions changes from random to uniform<sup>[80]</sup>; (d) Motion of edge skyrmion clusters<sup>[80]</sup>.

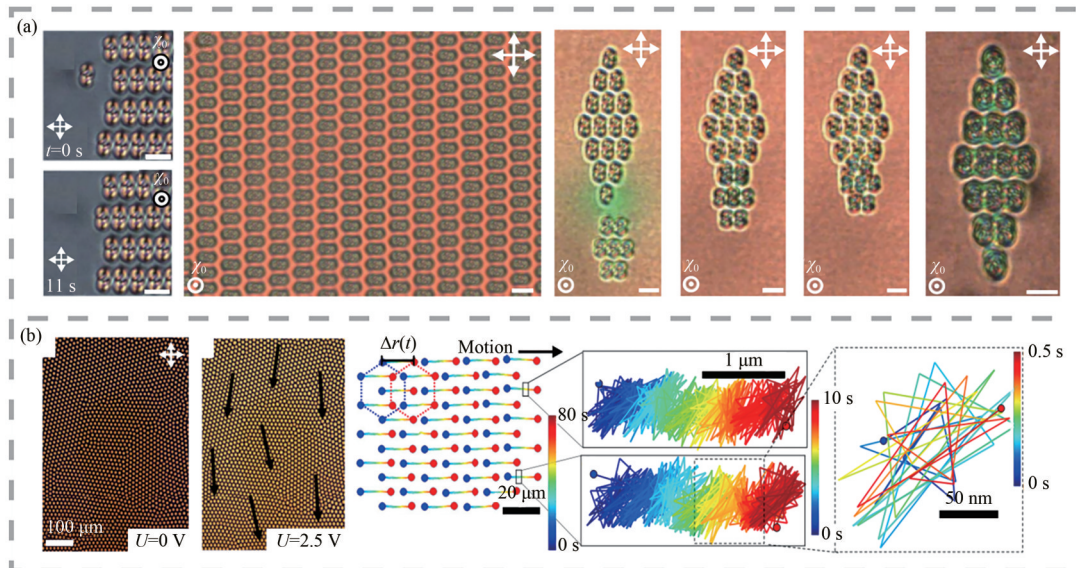


图 8 (a) Heliknoton 晶格的自组装和三维相互作用<sup>[82]</sup>; (b) Toron 晶格的运动<sup>[83]</sup>。

Fig. 8 (a) Self-assembly and three-dimensional interactions of heliknoton lattices<sup>[82]</sup>; (b) Motion of toron lattices<sup>[83]</sup>.

角形晶格中通过光诱导图案化形成裂缝,随着时间的增加,裂缝间距减小,慢慢愈合,形成晶格。图9(d)使用类似棋盘格的照明图案,可以观察到

在大约 10 min 内将六边形孤子晶格排为方形晶格,方形晶格再重新排回六边形晶格。此种可逆的晶格重排现象是利用图案照明将孤子向暗光



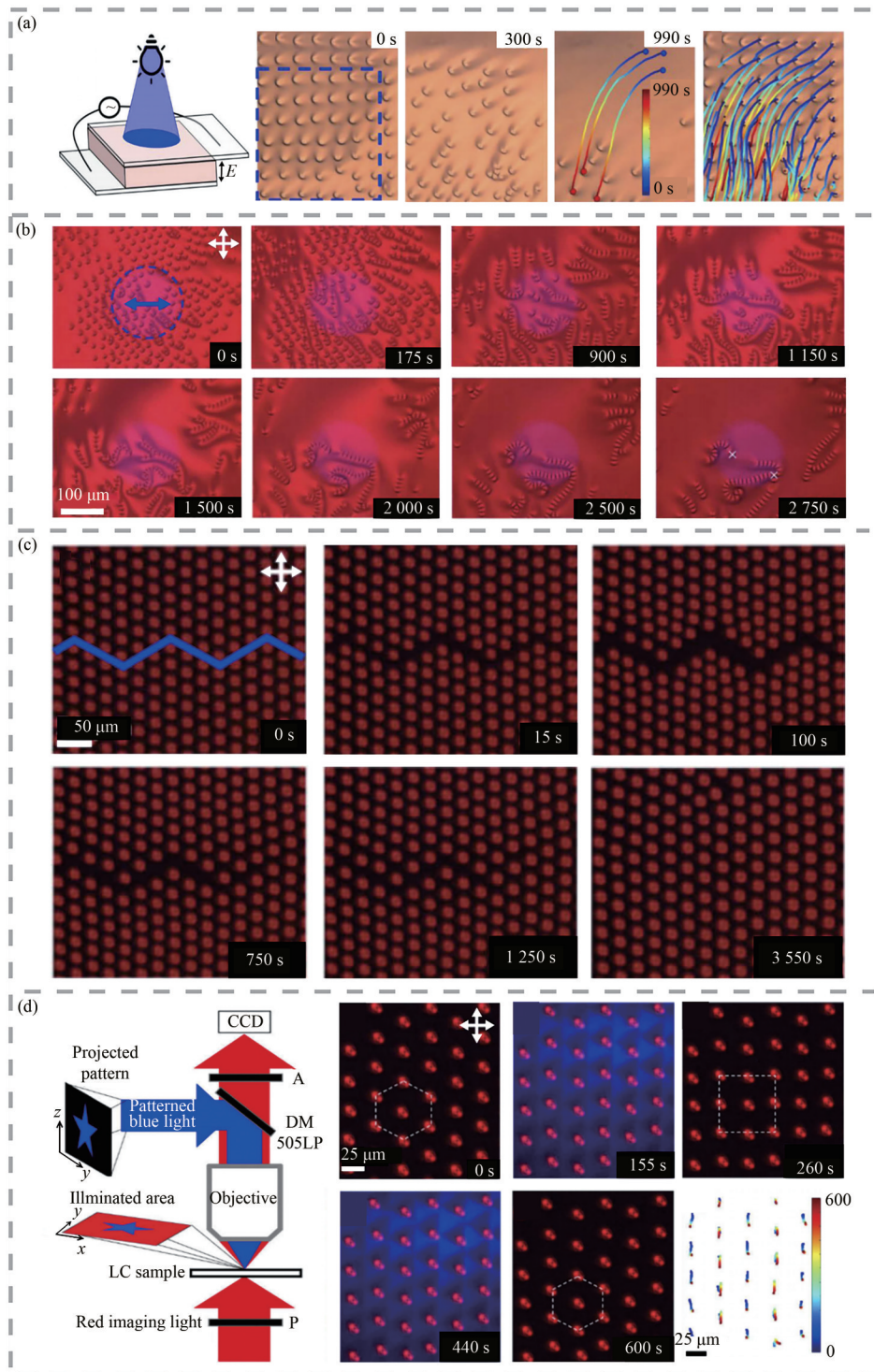


图 9 (a) 光诱导斯格明子的运动<sup>[84]</sup>; (b) 斯格明子链的动态重排<sup>[84]</sup>; (c) 光诱导图案化, 孤子晶格裂缝的愈合<sup>[85]</sup>; (d) 孤子晶格的重排<sup>[85]</sup>。

Fig. 9 (a) Motion of skyrmions under light induction<sup>[84]</sup>; (b) Dynamic rearrangement of skyrmions chains<sup>[84]</sup>; (c) Light-induced patterning, healing of soliton lattice cracks<sup>[85]</sup>; (d) Rearrangement of soliton lattice<sup>[85]</sup>.

区域移动实现的。综上所述,可以通过外场条件来控制孤子的集群运动。集群运动的研究为液晶领域的发展提供了新的视角和理论基础,促进

了液晶材料的应用和创新。进一步探索孤子集群的动力学特性,可以拓展其在光子学和信息科学领域的应用潜力。



## 5 孤子运动调控的应用

液晶孤子的运动已应用在微粒运输等领域。Hayley 等人已经证明了孤子可携带纳米或微米大小的粒子在平面内运动<sup>[71]</sup>,见图 10(a)。Yuan Shen 等人也将孤子作为微货物运输的载体<sup>[33]</sup>,图 10(b)是通过施加电场,在尘埃粒子周围诱导产生指

向子,然后通过移动指向子来携带和运输粒子。Bing-Xiang Li<sup>[86]</sup>等人也报道了类似的现象,被称为“定向诱导液晶电泳”,就是当液晶中的指向矢量具有偶极对称时,胶体粒子可以移动,如图 10(c)所示,利用此种运动现象可以进行信息编码传递,从而传递信息。除此之外,拓扑孤子还可操控光束,Ivan 课题组<sup>[87]</sup>证明了一维和二维拓扑孤子可以与光相互作用,进而引导光束,使光束偏转。

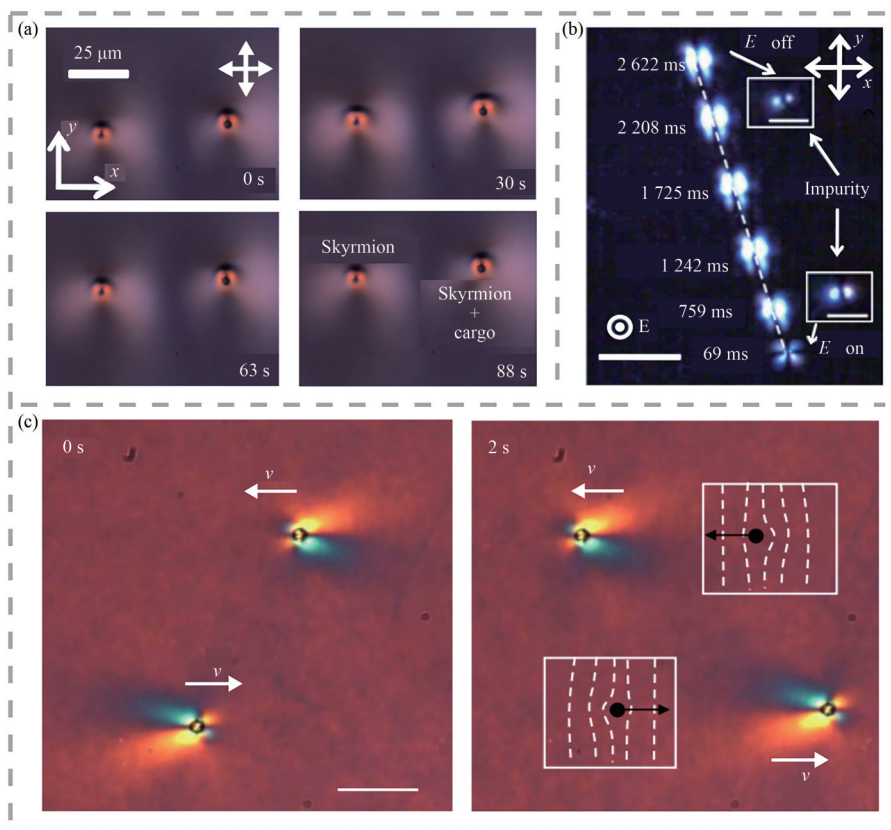


图 10 (a) 孤子携带微粒的平移运动<sup>[71]</sup>; (b) 向列相液晶孤子运输微型货物的轨迹切片图<sup>[33]</sup>; (c) 孤子诱导微粒运动<sup>[86]</sup>。  
Fig. 10 (a) Translation motion of solitons carrying microspheres<sup>[71]</sup>; (b) Trajectory slices of transporting microcargo by nematic liquid crystal solitons<sup>[33]</sup>; (c) Soliton-induced microspheres motion<sup>[86]</sup>.

## 6 结 论

本文总结了液晶孤子运动调控方面实验和理论的最新进展,揭示了使用电学、光学和化学等方法调控液晶孤子运动的机制,讨论了非拓扑孤子和拓扑孤子的独立及集群运动。可以通过调节电场中的电压和频率控制孤子的产生条件,也可以通过化学处理或光场控制锚定能的分布,从而实现更细节的运动调控。本综述还简要介绍和分析了

孤子运动调控在微粒运输和光束操纵等领域中的应用。然而目前液晶孤子运动的调控仍存在挑战,例如在二维或三维空间内的任意运动及精确调控。

液晶孤子的研究拓宽了人们对液晶的理解,也有助于认识其他系统中的孤子。孤子在液晶中的运动调控可应用于微粒运输、信息编译、光束操纵、微型计算、传感、防伪等领域。本文希望引起更多研究者对液晶孤子研究的兴趣,推动该领域的进一步发展。

## 参 考 文 献:

- [1] SHEN Y, DIERKING I. Perspectives in liquid-crystal-aided nanotechnology and nanoscience [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(12): 2512.
- [2] DE GENNES P G, PROST J. *The Physics of Liquid Crystals* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [3] 罗道兴, 吴金兵, 郭政昊, 等. 光控取向引导的液晶序演变[J]. 液晶与显示, 2024, 39(5): 569-592.  
LUO D X, WU J B, GUO Z H, *et al.* Photoalignment guided order evolution of liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 569-592. (in Chinese)
- [4] 邢陈陈, 郑继红, 陈芳芳, 等. 光控取向液晶偏振全息柱透镜的制备及聚焦特性[J]. 液晶与显示, 2024, 39(5): 593-601.  
XING C C, ZHENG J H, CHEN F F, *et al.* Preparation and focusing characteristics of polarized holographic photoalignment liquid crystal cylindrical lenses [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 593-601. (in Chinese)
- [5] 张涵, 王龙洋, 朱柏翰, 等. 近晶相液晶超结构的多元外场调控[J]. 液晶与显示, 2024, 39(3): 289-298.  
ZHANG H, WANG L Y, ZHU B H, *et al.* Modulation of smectic liquid crystals superstructures under multiple external fields [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(3): 289-298. (in Chinese)
- [6] 李延敏, 孙桂姣, 马子寒, 等. 柱筒中掺杂手性剂向列相液晶的介电及挠曲电性能[J]. 液晶与显示, 2023, 38(4): 462-470.  
LI Y M, SUN G J, MA Z H, *et al.* Dielectric and flexoelectric properties of nematic liquid crystal with chiral dopants in a concentric cylindrical cell [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(4): 462-470. (in Chinese)
- [7] GE D L, DAI Y T, LIANG H Y, *et al.* Self-rolling and circling of a conical liquid crystal elastomer rod on a hot surface [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 263: 108780.
- [8] 徐超, 初宇天, 胡金良, 等. 螺旋扭曲力常数对常黑聚合物稳定胆甾液晶光电性能的影响[J]. 液晶与显示, 2016, 31(4): 358-362.  
XU C, CHU Y T, HU J L, *et al.* Influence of helical twisting power on electro-optical properties of normal-mode polymer-stabilized cholesteric texture [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(4): 358-362. (in Chinese)
- [9] 张帅, 杨洋, 吉岩, 等. 磁响应液晶弹性体材料研究进展[J]. 应用化学, 2021, 38(10): 1299-1309.  
ZHANG S, YANG Y, JI Y, *et al.* Research process on magneto-responsive liquid crystalline elastomers [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(10): 1299-1309. (in Chinese)
- [10] 陈婷, 冯仕猛. 弱磁场中向列相液晶的磁光效应[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 443-447.  
CHEN T, FENG S M. Magnetic-optics effect of nematic liquid crystal in weak magnetic field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 443-447. (in Chinese)
- [11] 宋雅莉, 王琼华. 低电压高透过率的波纹电极透反蓝相液晶显示器[J]. 液晶与显示, 2017, 32(4): 249-252.  
SONG Y L, WANG Q H. Low voltage and high transmittance transreflective blue-phase liquid crystal display with corrugated electrodes [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(4): 249-252. (in Chinese)
- [12] 孙路瑶, 王鑫垚, 陈佳浩, 等. 基于序参数与取向涨落的液晶电光开关[J]. 光学学报, 2022, 42(21): 112-117.  
SUN L Y, WANG X Y, CHEN J H, *et al.* Liquid crystal electro-optic switching based on order parameter and orientation fluctuations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(21): 112-117. (in Chinese)
- [13] LOWE A M, ABBOTT N L. Liquid crystalline materials for biological applications [J]. *Chemistry of Materials*, 2012, 24(5): 746-758.
- [14] SILVESTRINI A V P, DEBIASI B W, PRAÇA F G, *et al.* Progress and challenges of lyotropic liquid crystalline nanoparticles for innovative therapies [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2022, 628: 122299.
- [15] TANG D L, SHAO Z L, XIE X, *et al.* Flat multifunctional liquid crystal elements through multi-dimensional information multiplexing [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2023, 6(4): 220063.
- [16] HE Z, HONMA M, MASUDA S, *et al.* Optical haar wavelet transforms with liquid crystal elements [J].

- Japanese Journal of Applied Physics*, 1995, 34(12R): 6433-6438.
- [17] IHMIG F R, JANUSCHOWSKI K, KOCH T, *et al.* Monitoring of wearing and occlusion times with smart shutter glasses-A proof of concept [J]. *PLoS One*, 2022, 17(6): e0270361.
- [18] ZHANG X, XU Y Y, VALENZUELA C, *et al.* Liquid crystal-templated chiral nanomaterials: from chiral plasmonics to circularly polarized luminescence [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 223.
- [19] MA L L, LI C Y, SUN L Y, *et al.* Submicrosecond electro-optical switching of one-dimensional soft photonic crystals [J]. *Photonics Research*, 2022, 10(3): 786-792.
- [20] KUROCHKIN O, NAZARENKO K, TERESHCHENKO O, *et al.* The helical twisting power of chiral dopants in lyotropic chromonic liquid crystals [J]. *Liquid Crystals*, 2023, 50(1): 110-120.
- [21] KIVSHAR Y S, AGRAWAL G P. *Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals* [M]. San Diego: Academic Press, 2003.
- [22] BULLOUGH R K. Solitons: inverse scattering theory and its applications [C]//*Proceedings of the NATO Advanced Study Institute Held at Cargèse*. Corsica: Springer, 1980: 295-349.
- [23] RUSSELL J S. *The Wave of Translation in the Oceans of Water, Air, and Ether* [M]. Melbourne: Trübner & Company, 1885.
- [24] ZABUSKY N J, KRUSKAL M D. Interaction of “solitons” in a collisionless plasma and the recurrence of initial states [J]. *Physical Review Letters*, 1965, 15(6): 240-243.
- [25] BERTHOMIER M, POTTELETTE R, MALINGRE M, *et al.* Electron-acoustic solitons in an electron-beam plasma system [J]. *Physics of Plasmas*, 2000, 7(7): 2987-2994.
- [26] SAZONOV S V, USTINOV N V. Soliton mode of terahertz radiation generation using picosecond laser pulses with tilted wave fronts [J]. *Laser Physics Letters*, 2022, 19(2): 025401.
- [27] LI Z X, CAO Y S, YAN P. Topological insulators and semimetals in classical magnetic systems [J]. *Physics Reports*, 2021, 915: 1-64.
- [28] CARETTA L, OH S H, FAKHRUL T, *et al.* Relativistic kinematics of a magnetic soliton [J]. *Science*, 2020, 370(6523): 1438-1442.
- [29] GRELU P, AKHMEDIEV N. Dissipative solitons for mode-locked lasers [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(2): 84-92.
- [30] MAÎTRE A, LERARIO G, MEDEIROS A, *et al.* Dark-soliton molecules in an exciton-polariton superfluid [J]. *Physical Review X*, 2020, 10(4): 041028.
- [31] 杜静,汪相如,黄子强,等. 液晶的介电各向异性分布对液晶微带线特性的影响[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(8): 0820001.
- DU J, WANG X R, HUANG Z Q, *et al.* Influences of distribution of LC dielectric anisotropy on properties of LC microstrip line [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0820001. (in Chinese)
- [32] SHNIR Y M. *Topological and Non-Topological Solitons in Scalar Field Theories* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [33] SHEN Y, DIERKING I. Dynamics of electrically driven solitons in nematic and cholesteric liquid crystals [J]. *Communications Physics*, 2020, 3(1): 14.
- [34] SHEN Y, DIERKING I. Electrically driven formation and dynamics of swallow-tail solitons in smectic A liquid crystals [J]. *Materials Advances*, 2021, 2(14): 4752-4761.
- [35] LI B X, BORSHCH V, XIAO R L, *et al.* Electrically driven three-dimensional solitary waves as director bullets in nematic liquid crystals [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2912.
- [36] AYA S, ARAOKA F. Kinetics of motile solitons in nematic liquid crystals [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3248.
- [37] SHEN Y, DIERKING I. Dynamic dissipative solitons in nematics with positive anisotropies [J]. *Soft Matter*, 2020, 16(22): 5325-5333.
- [38] WU J S, SMALYUKH I I. Hopfions, heliknotons, skyrmions, torons and both abelian and nonabelian vortices in chiral liquid crystals [J]. *Liquid Crystals Reviews*, 2022, 10(1/2): 34-68.



- [39] KAUFFMAN L H. *Knots and Physics* [M]. River Edge: World Scientific Publishing Company, 2001.
- [40] SKYRME T H R. A unified field theory of mesons and baryons [J]. *Nuclear Physics*, 1962, 31: 556-569.
- [41] WEINBERG E J. *Classical Solutions in Quantum Field Theory: Solitons and Instantons in High Energy Physics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [42] DUNAJSKI M. *Solitons, Instantons, and Twistors* [M]. New York: Oxford University Press, 2010.
- [43] MALOMED B A. Vortex solitons: old results and new perspectives [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2019, 399: 108-137.
- [44] ABRIKOSOV A A. Nobel Lecture: type-II superconductors and the vortex lattice [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2004, 76(3): 975-979.
- [45] O'DELL D H J, GIOVANAZZI S, KURIZKI G. Rotons in gaseous Bose-Einstein condensates irradiated by a laser [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(11): 110402.
- [46] GÖBEL B, MERTIG I, TRETIKOV O A. Beyond skyrmions: review and perspectives of alternative magnetic quasiparticles [J]. *Physics Reports*, 2021, 895: 1-28.
- [47] BOGDANOV A N, RÖBLER U K, SHESTAKOV A A. Skyrmions in nematic liquid crystals [J]. *Physical Review E*, 2003, 67(1): 016602.
- [48] SMALYUKH I I, LANSAC Y, CLARK N A, *et al.* Three-dimensional structure and multistable optical switching of triple-twisted particle-like excitations in anisotropic fluids [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(2): 139-145.
- [49] ACKERMAN P J, SMALYUKH I I. Static three-dimensional topological solitons in fluid chiral ferromagnets and colloids [J]. *Nature Materials*, 2017, 16(4): 426-432.
- [50] ACKERMAN P J, SMALYUKH I I. Diversity of knot solitons in liquid crystals manifested by linking of preimages in torons and hopfions [J]. *Physical Review X*, 2017, 7(1): 011006.
- [51] KUCHKIN V M, KISELEV N S, RYBAKOV F N, *et al.* Heliknoton in a film of cubic chiral magnet [J]. *Frontiers in Physics*, 2023, 11: 1201018.
- [52] TAI J S B, SMALYUKH I I. Surface anchoring as a control parameter for stabilizing torons, skyrmions, twisted walls, fingers, and their hybrids in chiral nematics [J]. *Physical Review E*, 2020, 101(4): 042702.
- [53] SHEN Y, DIERKING I. Recent progresses on experimental investigations of topological and dissipative solitons in liquid crystals [J]. *Crystals*, 2022, 12(1): 94.
- [54] 沈源. 电场驱动下向列相液晶中耗散型指向子的研究[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(1): 95-103.  
SHEN Y. Electrically driven dissipative directrons in nematic liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(1): 95-103. (in Chinese)
- [55] FUKUDA J I, NYCH A, OGNYSTA U, *et al.* Liquid crystalline half-skyrmions and their optical properties [J]. *Annalen der Physik*, 2022, 534(2): 2100336.
- [56] LAVRETOVICH O D. Design of nematic liquid crystals to control microscale dynamics [J]. *Liquid Crystals Reviews*, 2020, 8(2): 59-129.
- [57] SMALYUKH I I. Review: knots and other new topological effects in liquid crystals and colloids [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2020, 83(10): 106601.
- [58] LI B X, XIAO R L, PALADUGU S, *et al.* Three-dimensional solitary waves with electrically tunable direction of propagation in nematics [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3749.
- [59] TANG X Z, MOZAFFARI A, ATZIN N, *et al.* Generation and propagation of solitary waves in nematic liquid crystals [J/OL]. *arXiv*, 2022: 2211.01453.
- [60] TANG X Z, ATZIN N, MOZAFFARI A, *et al.* Generation and propagation of flexoelectricity-induced solitons in nematic liquid crystals [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(16): 10768-10775.
- [61] DERRICK G H. Comments on nonlinear wave equations as models for elementary particles [J]. *Journal of Mathematical Physics*, 1964, 5(9): 1252-1254.
- [62] HOBART R H. On the instability of a class of unitary field models [J]. *Proceedings of the Physical Society*, 1963, 82(2): 201-203.
- [63] 杨小东, 彭增辉, 穆全全, 等. 偶氮苯磺酸薄膜的光致取向可重复性[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(5): 553-560.

- YANG X D, PENG Z H, MU Q Q, *et al.* Photoalignment repeatability of azobenzene sulfonic films [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 553-560. (in Chinese)
- [64] 汪浩然,张银川,胡巍,等. 向列相液晶的饱和非线性及双稳态孤子[J]. *物理学报*, 2023, 72(7): 074204.  
WANG H R, ZHANG Y C, HU W, *et al.* Saturable nonlinearity and bistable solitons in nematic liquid crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 72(7): 074204. (in Chinese)
- [65] 李一亨,王靖,胡巍,等. 负性介电各向异性向列相液晶中空间光孤子的理论研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 184207.  
LI Y H, WANG J, HU W, *et al.* Theoretical investigation of spatial optical solitons in nematic liquid crystals with negative dielectric anisotropy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 184207. (in Chinese)
- [66] 朱叶青,胡巍,曹龙贵. 向列相液晶中的(1+1)维呼吸子解[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 3000-3004.  
ZHU Y Q, HU W, CAO L G. (1+1)-D breathers solution in nematic liquid crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 3000-3004. (in Chinese)
- [67] LIN J Z, WU A J, ZHU L T, *et al.* Fission of quasi-static dissipative solitons in chiral nematics [J]. *Giant*, 2024, 19: 100312.
- [68] WU K H, CHEN C Q, SHEN Y, *et al.* Trajectory engineering of directrons in liquid crystals *via* photoalignment [J]. *Soft Matter*, 2023, 19(24): 4483-4490.
- [69] WU K H, ZHU L T, XIAO F F, *et al.* Light-regulated soliton dynamics in liquid crystals [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 7217.
- [70] DAS S, ROH S, ATZIN N, *et al.* Programming solitons in liquid crystals using surface chemistry [J]. *Langmuir*, 2022, 38(11): 3575-3584.
- [71] SOHN H R O, ACKERMAN P J, BOYLE T J, *et al.* Dynamics of topological solitons, knotted streamlines, and transport of cargo in liquid crystals [J]. *Physical Review E*, 2018, 97(5): 052701.
- [72] ACKERMAN P J, BOYLE T, SMALYUKH I I. Squirring motion of baby skyrmions in nematic fluids [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 673.
- [73] SHEN Y, DIERKING I. Electrically driven formation and dynamics of skyrmionic solitons in chiral nematics [J]. *Physical Review Applied*, 2021, 15(5): 054023.
- [74] ZHAO H Q, TAI J S B, WU J S, *et al.* Liquid crystal defect structures with Möbius strip topology [J]. *Nature Physics*, 2023, 19(3): 451-459.
- [75] ZHAO H Q, MALOMED B A, SMALYUKH I I. Topological solitonic macromolecules [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 4581.
- [76] SHEN Y, DIERKING I. Electrically tunable collective motion of dissipative solitons in chiral nematic films [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 2122.
- [77] SHEN Y, DIERKING I. Annealing and melting of active two-dimensional soliton lattices in chiral nematic films [J]. *Soft Matter*, 2022, 18(37): 7045-7050.
- [78] ZHANG H P, BE'ER A, FLORIN E L, *et al.* Collective motion and density fluctuations in bacterial colonies [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(31): 13626-13630.
- [79] YAN J, HAN M, ZHANG J, *et al.* Reconfiguring active particles by electrostatic imbalance [J]. *Nature Materials*, 2016, 15(10): 1095-1099.
- [80] SOHN H R O, LIU C D, SMALYUKH I I. Schools of skyrmions with electrically tunable elastic interactions [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4744.
- [81] ACKERMAN P J, VAN DE LAGEMAAT J, SMALYUKH I I. Self-assembly and electrostriction of arrays and chains of hopfion particles in chiral liquid crystals [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6012.
- [82] TAI J S B, SMALYUKH I I. Three-dimensional crystals of adaptive knots [J]. *Science*, 2019, 365(6460): 1449-1453.
- [83] SOHN H R O, SMALYUKH I I. Electrically powered motions of toron crystallites in chiral liquid crystals [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(12): 6437-6445.
- [84] SOHN H R O, LIU C D, VOINESCU R, *et al.* Optically enriched and guided dynamics of active skyrmions [J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6306-6319.

- [85] SOHN H R O, LIU C D, WANG Y H, *et al.* Light-controlled skyrmions and torons as reconfigurable particles [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 29055-29068.
- [86] LI B X, XIAO R L, SHIYANOVSKII S V, *et al.* Soliton-induced liquid crystal enabled electrophoresis [J]. *Physical Review Research*, 2020, 2(1): 013178.
- [87] HESS A J, POY G, TAI J S B, *et al.* Control of light by topological solitons in soft chiral birefringent media [J]. *Physical Review X*, 2020, 10(3): 031042.

作者简介:



倪洁,女,硕士研究生,2022年于苏州大学文正学院获得学士学位,主要从事液晶拓扑孤子方面的研究。E-mail: 1022020539@njupt.edu.cn



李炳祥,男,博士,教授,2019年于肯特州立大学先进材料与液晶研究所获得博士学位,主要从事液晶、刺激响应软材料、活性物质和生物物理等方面的研究。E-mail:bxli@njupt.edu.cn



汤星舟,男,博士,助理教授,2020年于肯特州立大学先进材料与液晶研究所获得博士学位,主要从事液晶、活性物质和生物物理等方面的研究。E-mail: xztang@njupt.edu.cn