

AKTIVNA MEHKA SNOV

KLEMEN ZAJC

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

V zadnjem času je aktivna mehka snov postala zelo popularna znanstvena tematika. Tako snov sestavljajo aktivni objekti, ki se sami gibljejo naključno, združeni v skupine pa izkazujejo posebne ureditve. Te se pojavljajo v sistemih podceličnih do večkilometerskih velikosti. Glede na tipične lastnosti sistemov je predstavljena delitev na polarne oziroma nematske ter v mokre in suhe sisteme. Temu sledi najosnovnejši opis tako polarnih kot nematskih suhih sistemov. V nadaljevanju so opisani nekateri eksperimenti, ki odkrivajo lastnosti aktivnih snovi in obenem spodbujajo razvoj teoretičnih modelov.

SOFT ACTIVE MATTER

Soft active matter is recently a very popular topic among scientist. It consist of active objects, which alone move randomly, but when in group they show special arrangements. They appear on length scales from sub-cellular to oceanic. In this article is described division into polar or nematic and in wet or dry systems, followed by simplified description of both polar and nematic dry systems. In the final section are presented some latest experiments which reveal characteristics of the active matter and at the same time encourage the development of theoretical models.

1. Uvod

Aktivna mehka snov predstavlja skupinsko obnašanje velikega števila aktivnih objektov, ki so sposobni shranjeno energijo oziroma prosto energijo iz okolice spremeniti v tok. Samostojen neomejen aktivni delec se tipično giblje naključno po prostoru, ko pa povečamo številsko gostoto aktivnih organizmov, začnejo ti izražati zanimive lastnosti. Zaradi medsebojnega vpliva in interakcij z medijem, v katerem se gibljejo, se tipično pojavi urejeno gibanje na makroskopski ravni [1], kar lahko vodi do nastanka specifičnih vzorcev kot so vrtinci, spirale in zvezde. Samo dogajanje se navadno dogaja daleč od termodinamičnega ravnovesja. Vnos energije, ki je potrebna za to, se tipično dogaja na ravni posameznih delcev, kar obenem predstavlja glavno razliko od ostalih neravnovesnih sistemov, kjer to določajo robni pogoji. Dodatni dve lastnosti, ki tudi določata aktivno snov kot nov tip neravnovesnega sistema sta: (i) smer gibanja delcev, ki so pogosto anizotropne oblike, je določena z usmeritvijo delcev samih in ne z zunanjim poljem. (ii) Gibanje je tipično nadkritično dušeno in pri nizkih Reynoldsovih številih, zato so inercialni efekti tipično zanemarljivi [2].

Osnova za raziskovanje in razvoj modelov so tako živi organizmi kot tudi nekatere nežive imitacije. Velikosti sistemov segajo od nekaj μm do km (slika 1). Tipični primeri so bakterijske suspenzije [3], raztopine biofilamentov z molekulskimi motorji¹ [4], na veliko večji dolžinski skali pa jate ptic in rib [5], [6] ter seleče se črede živali. Primer neživih sistemov so koloidni delci, ki za premikanje na primer lahko izkoriščajo katalitične procese na svoji površini [1], kot zelo dobra realizacija aktivne snovi pa se je izkazala tudi vibrirana plast vodoravno ležečih paličic.

V zadnjih letih se pojavlja veliko zanimanja za opis različnih sistemov. Razumevanje njihovih statističnih in mehanskih lastnosti bi lahko bilo pomembno predvsem na področju bioloških sistemov in za nadaljnjo uporabo v medicinske namene. V tem članku so opisani različni osnovni sistemi in njihove lastnosti. Sledi teoretični opisu sistemov in pojavi, ki jih napove. V zadnjem delu so predstavljeni nekateri novejši eksperimenti in zanimive značilnosti, ki se v njih pojavljajo.

¹To so delci, ki se pojavljajo v živih organizmih in sploh omogočajo gibanje le-teh.

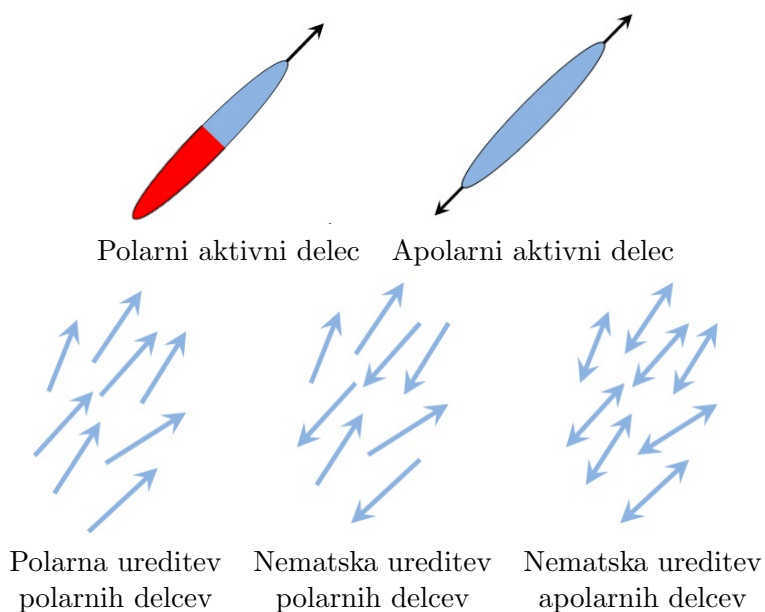


Slika 1. Sistemi aktivne mehke snovi so lahko velikosti manjših od celic (nekaj μm) do oceanskih razsežnosti. Na levi sliki je prikazana skupinska ureditev bakterij v krožeč vrtinec (avtor *J. Berger* (Max Planck Institute for Developmental Biology), objavljeno z dovoljenjem inštituta), desno pa je slika jate rib, kar je eden lepših primerov polarne ureditve² (avtor *dr. Dwayne Meadows* (NOAA/NMFS/OPR), <http://www.photolib.noaa.gov/htmls/reef0653.htm>, CC 2.0).

2. Aktivni tekoči kristali

Navkljub dejstvu, da se aktivni sistemi pojavljajo v zelo različnih oblikah in velikostnih redih, je želja, da se postavi majhno število univerzalnih razredov. Ti združujejo elemente glede na ohranitvene zakone, ki se jim sistemi podrejajo, in na simetrije, ki se v njih pojavljajo, obenem pa imajo dobro določeno obnašanje na makroskopski ravni [1].

2.1 Ureditveni parametri polarnih in nematskih sistemov



Slika 2. Vrste delcev in ureditev glede na simetrijske lastnosti ureditve. Vir: [1]

Prvo delitev naredimo glede na simetrijske lastnosti delcev v urejeni fazi (slika 2). Posameznemu delcu lahko pripišemo položaj $\mathbf{r}_n(t)$ in enotski vektor $\hat{\mathbf{n}}_n(t)$, ki v vsakem trenutku kaže v smeri

²Ta in druge ureditve so opisane v poglavju 2.1

hitrosti gibajočega se delca. Za opis celotnega polja se uporabi vektorski ureditveni parameter $\mathbf{p}(\mathbf{r}, t)$ [1], [2], [7] in gostoto $\rho(\mathbf{r}, t)$, ki ju izrazimo kot

$$\rho(\mathbf{r}, t) = \sum_n \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_n(t)) \quad (1)$$

in

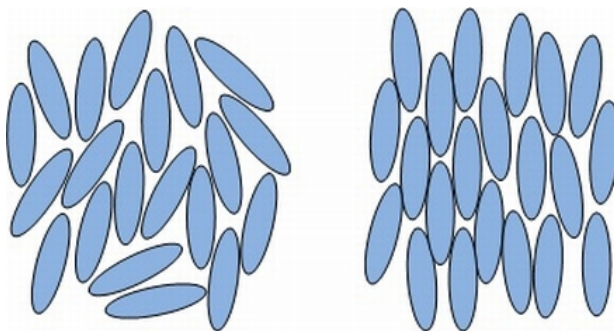
$$\mathbf{p}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\rho(\mathbf{r}, t)} \sum_n \hat{\mathbf{n}}_n(t) \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_n(t)). \quad (2)$$

Podolgovati delci so polarni, če pri njih lahko jasno ločimo glavo in rep. Skupinsko se lahko uredijo tako v *polarno* kot tudi v *nematsko fazo*. V *polarni* fazi so vsi mikroskopski objekti v povprečju obrnjeni v isto smer in takrat \mathbf{p} predstavlja kar polarizacijo aktivnega materiala. Če pa so polarni delci poravnani vzporedno, a z naključno orientacijo glava-rep, govorimo o *nematski* ureditvi. V slednjem primeru velja tudi, da sta orientaciji $\mathbf{p}(\mathbf{r}, t) \rightarrow -\mathbf{p}(\mathbf{r}, t)$ enakovredni. Prav tako govorimo o nematski fazi, kadar so urejeni delci apolarni, torej simetrični, in zato ne moremo razločiti glave od repa.

Opis nematskih sistemov z vektorskim parametrom ni vedno prikladen, zato se jih pogosto opiše s tenzorjem ureditvenega parametra \mathbf{Q} [1], [2], [8]. Tega lahko povežemo z vektorskim parametrom z vpeljavo nematske stopnje urejenosti S . Slednja je definirana kot ansambelsko povprečje drugega Legendrovega polinoma³, izvrednotenega za skalarni produkt med \mathbf{p} in $\hat{\mathbf{n}}_n(t)$ [9]. Ker je slednje kar kosinus kota med navedenima količinama (označimo s θ_n), je stopnja urejenosti

$$S = \langle P_2(\cos \theta) \rangle. \quad (3)$$

S lahko zavzame vrednosti na intervalu $[-\frac{1}{2}, 1]$, kjer $S = 1$ predstavlja popoln nematski red (slika 3), v katerem so vsi delci usmerjeni vzdolž parametra \mathbf{p} . Vrednost $S = 0$ ustreza izotropnemu stanju (slika 3), ki nima privilegirane usmeritve, druga skrajna meja $S = -\frac{1}{2}$ pa predstavlja ureditev, kjer so delci spet popolnoma poravnani, a tokrat v ravnini, pravokotni na \mathbf{p} .



Slika 3. Leva slika prikazuje izotropno stanje ($S = 0$), desna pa skoraj popoln nematski red ($S \approx 1$).

Z uporabo S in parametra \mathbf{p} se komponente tenzorja \mathbf{Q} po definicij izražajo kot

$$Q_{ij} = \frac{S}{2}(3p_i p_j - \delta_{ij}). \quad (4)$$

Tenzor \mathbf{Q} je brezsleden, iz same definicije pa je očitno, da je tudi simetričen. Njegova največja lastna vrednost določa stopnjo urejenosti S , sicer pa je glavni razlog za opis nematskih sistemov s tenzorjem, da ima več prostostnih stopenj kot \mathbf{p} . Tako lahko z njim zajamemo nekatere pojave, za katere bi pri vektorskem opisu potrebovali dodaten set enačb.

³ 2. Legendrov polinom je $P_2(x) = \frac{1}{2}(3x^2 - 1)$.

2.2 “Suhi” in “mokri” sistemi

Nadalje ločimo sisteme glede na vzrok dušenja gibanja. V *mokrih* sistemih je glavni razlog viskoznost tekočine, v kateri se delci nahajajo. Ta je v zvezi le z relativnim gibanjem okolice, zato se celoten moment tekočine ohranja. Ker hidrodinamski vplivi na ureditev aktivnih objektov niso zanemarljivi, je potrebno upoštevati tok tekočine. Slednjega opišemo z Navier-Stokesovo (NS) enačbo, pri čemer se v aktivni mehki snovi tipično predpostavi nestisljivost, zato je NS enačba oblike

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}, \quad (5)$$

kjer je \mathbf{v} hitrostno polje tekočine, ρ njena gostota, p tlak v tekočini in μ njena viskoznost. Leva stran enačbe predstavlja pospešek tekočine na volumsko enoto. Tako obliko se izpelje iz 2. Newtonovega zakona, pri čemer se zaradi premikanja tekočine dela v inercialnem sistemu. Na desni strani enačbe imamo gradient tlaka in člen, ki predstavlja viskoznost. Oba skupaj predstavljata divergenco napetosti v tekočini. Zadnji člen na desni strani, \mathbf{f} , vključuje gostoto morebitnih ostalih prostorsko porazdeljenih sil. V aktivnih sistemih so to največkrat kar termični šumi iz okolice.

V sistemih, ki so v tesnem stiku s substratom (npr. ležijo med dvema ozkima stenama oz. se gibljejo skozi porozen medij), se gibanje največkrat duši zaradi trenja med delci in podlago. Ker so hidrodinamični efekti zanemarljivi, govorimo o *suhih* sistemih. Mednje zato spadajo tudi vsi modeli, kjer prevladujejo sterični oziroma stohastični učinki, čeprav se delci lahko nahajajo v tekočini. V suhih sistemih se ohranja le število delcev (ob neupoštevanju odmiranja in delitve celic), hidrodinamično polje pa določa lokalna gostota delcev [1]. Pri tem je zanimivo, da se ureditev delcev podreja enačbi, ki je zelo podobna NS enačbi (5), čeprav se pri teoretičnem opisu sploh ne upošteva hidrodinamskih vplivov. Vseeno pa se v določenih podrobnostih enačbi razlikujeta, kar je opisano tudi v njuni primerjavi v poglavju 3.1

	polarni	nematski
suhi	premikajoče živalske črede	melanociti (celice, ki v človeškem telesu proizvajajo pigment)
	premikajoče plasti celic	vibrirane zrnaste paličice
	vibrirani nesimetrični zrnasti delci	
mokri	celično ogrodje	suspendirane polarne
	bakterije, plavajoče v gruči	katalitične paličice
	Au-Pt katalitični koloidi	

Tabela 1. Primeri aktivnih sistemov, razvrščeni glede na zgornjo delitev.

3. Opisi sistemov

Ko želimo opisati nek sistem, je vedno najprej smiselno ugotoviti, v kateri razred spada - nematska/polarna ureditev in suh/moker sistem. Vsaka kombinacija ima svoje posebnosti, kar se pozna tudi pri opisu sistema. Že narejeni modeli nam pri razvijanju novega lahko znatno pomagajo, vendar je vedno potrebno upoštevati posebne lastnosti, ki se opazijo pri eksperimentih.

Ko se gradi teoretičen opis aktivne snovi, se sicer veliko poudarka da na znane opise bolj raziskanih pasivnih sistemov, vendar pa je nujno vključiti člene, ki predstavljajo aktivnost materiala. Ta se tipično odraža ali kot materialni tok ali pa kot časovno spreminjanje ureditvenega parametra. Oba ta procesa silita sistem iz globalnega ravnovesja, kakršno bi bilo značilno za pasivne sisteme.

Tukaj sledi opis nekaj najosnovnejših modelov in lastnosti, ki jih predvidijo. Količine, potrebne za opis sistemov (\mathbf{r}_n , \mathbf{n}_n , ρ , \mathbf{p} in \mathbf{Q}) so take, kot so definirane v razdelku 2.1 Natančnejše izpeljave in končne enačbe, ki opišejo tudi kompleksnejša stanja, so na voljo v [1] in [2].

3.1 Suhi polarni sistemi

V teh sistemih se zaradi interakcij z okolico gibalna količina snovi ne ohranja, zato je edina ohranjena količina število delcev (pri tem zanemarimo morebitno delitev celic oziroma njihovo odmiranje). Lokalna gostota aktivnih delcev $\rho(\mathbf{r}, t)$ obenem določa hidrodinamsko polje, zato je primerna za opis stanja. Druga količina, ki še določa ureditev, je polje polarizacije delcev $\mathbf{p}(\mathbf{r}, t)$. Samo dinamiko se poišče z minimizacijo proste energije v nastavku

$$\partial_t \mathbf{p} + \lambda_1 (\mathbf{p} \cdot \nabla) \mathbf{p} = -\frac{1}{\gamma} \frac{\partial F_p}{\partial \mathbf{p}} + \mathbf{f}. \quad (6)$$

Na levi strani enačbe nastopajo le odvodi prvega reda, saj je to nastavek za najpreprostejši model in se zato višje odvode zanemari. Prvi člen poskrbi, da je v enačbi prisotna tudi časovna odvisnost, drugi člen pa je pomemben, saj predstavlja advekcijo. Advekcija je v splošnem transportni mehanizem, ki se v tekočinah pojavi zaradi gibanja tekočine kot celote. Čeprav tukaj govorimo o ureditvenem parametru, ne pa o hitrostnem polju tekočine, ta člen v enačbi predstavlja transport delcev. Hitrostno polje delcev \mathbf{v} in parameter \mathbf{p} sta neposredno povezana - ob predpostavki, da imajo vsi delci enako velikost hitrosti v_0 velja kar preprosta zveza $\mathbf{v} = v_0 \mathbf{p}$. Konstanta pred členom advekcije, λ_1 , določa vpliv tega člena, obenem pa vnaša aktivnost snovi, kar bo pojasnjeno v nadaljevanju. Na desni strani enačaja člen \mathbf{f} vsebuje vse prisotne šume, za opis sistema pa je pomemben prvi člen. Konstanta rotacijske viskoznosti γ za sam opis nima bistvene vloge in se jo navadno v nadaljevanju vključi v druge konstante. Pomembno je minimiziranje funkcionala proste energije, ki se zapiše kot

$$F_p = \int_{\mathbf{r}} \left\{ \frac{\alpha(\rho)}{2} |\mathbf{p}|^2 + \frac{\beta}{4} |\mathbf{p}|^4 + \frac{K}{2} (\partial_\alpha p_\beta) (\partial_\beta p_\alpha) - v_0 \nabla \cdot \mathbf{p} \frac{\delta \rho}{\rho_0} \right\}. \quad (7)$$

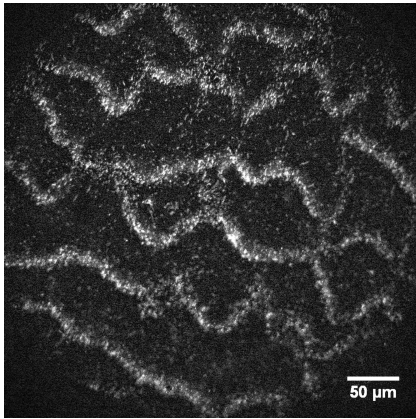
Pri tem se zaradi preprostosti pogosto zanemari odvisnost od lokalne gostote ρ , ne upošteva pa se niti difuzijskega toka in z njim povezanega šuma. Prva dva člena v (7) sta pomembna, saj določata prehod med urejeno in neurejeno fazo, ki se zgodi, ko gre α prek vrednosti 0. Za sam opis prehoda bi sicer zadoščal samo prvi člen, a se zaradi stabilnosti pri reševanju doda še člen z β , ki je vedno pozitiven. Naslednji, tretji člen, se tipično pojavlja v izrazih, ki opisujejo tekoče kristale in predstavlja višanje proste energije zaradi popačenja ureditve. To nastane zaradi razširjanja, zvijanja in upogibanja ureditve. Ob predpostavki, da ti procesi enakomerno prispevajo k višanju energije, vsem pripišemo isto Frankovo konstanto K , ki se pojavi v tem členu in je pozitivna. Zadnji člen v enačbi je lahko prisoten le v sistemih s polarno simetrijo. Predstavlja prispevek lokalne gostote ρ k spontani širitvi ureditve, pri čemer je konstanta ρ_0 povprečna gostota. Eksperimentalno opažen vpliv gostote je viden na sliki 5.

Z upoštevanjem (6) in (7) tako lahko pridemo do dinamike za \mathbf{p}

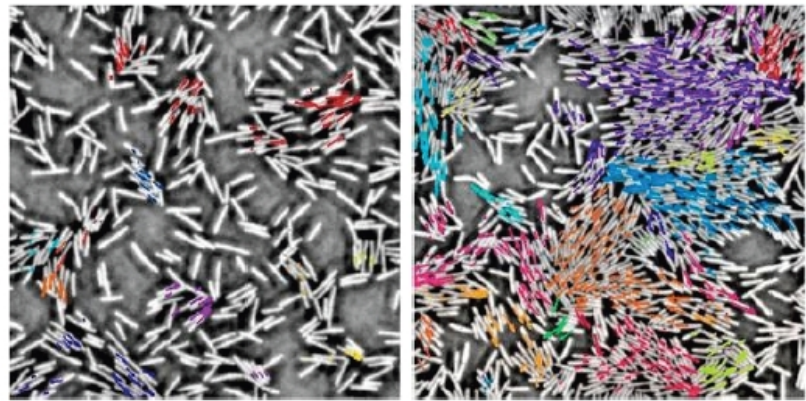
$$\partial_t \mathbf{p} + \lambda_1 (\mathbf{p} \cdot \nabla) \mathbf{p} = - [\alpha(\rho) + \beta |\mathbf{p}|^2] \mathbf{p} + K \nabla^2 \mathbf{p} - v_0 \nabla \frac{\rho}{\rho_0} + \mathbf{f}. \quad (8)$$

Kljub temu, da ta enačba opisuje suhe sisteme, kjer hidrodinamski vplivi nimajo bistvene vloge, jo lahko primerjamo z Navier-Stokesovo enačbo za preprosto tekočino (enačba (5)). Če bi bila $\lambda_1 = v_0$, bi bila leva stran povsem ustrezna NS enačbi (zaradi povezave \mathbf{p} in \mathbf{v}). V tem primeru bi enačba opisovala pasivno mehko snov. V aktivni snovi sicer velja $\lambda_1 \propto v_0$, a je sorazmernostni faktor vedno večji od 1 in tako večja vpliv advekcije. To pa pomeni, da je transport delcev večji kot v neaktivnih snoveh. Na desni strani enačbe lahko v drugem členu prepoznamo sile ekvivalentne viskoznosti, saj je \mathbf{p} sorazmeren s hitrostjo toka. Tudi tretji člen je mogoče v določenih približkih zapisati kot gradient tlaka, ki se pojavi v NS enačbi. Člen, ki se tukaj bistveno loči od NS enačbe pa je prvi na desni strani, saj se pojavi zaradi vpliva \mathbf{p} pri urejanju delcev, kar nima neposredne analogije v ravnovesnem toku. Skupaj z λ_1 tako določata bistveno razliko od pasivnih sistemov.

Sama enačba (8) nima eksplisitne rešitve in se jo v taki obliki lahko rešuje le numerično. Vseeno pa se da za posebne sisteme in ob določenih dodatnih poenostavitvah napovedati različne pojave, ki se pojavljajo tudi v eksperimentih. Tako je mogoče določiti, pri katerem razmerju α in β pride do prehoda iz neurejene v urejeno fazo, kakšno je obnašanje pri prehodu in za katere vrednosti parametrov iz enačbe (8) je stanje sploh stabilno. Z lineariziranjem (8) se predvidi tudi dva zanimiva pojava - velike številske fluktuacije v sicer stabilnem in urejenem redu ter širjenje valov po sredstvu (slika 4). Pri slednjem je potrebno opozoriti, da to niso valovi, kot jih poznamo v navadnih sredstvih. V teh se valovanje širi, če velja ohranitev gibalne količine, kar pa za suhe aktivne sisteme ne drži. Tukaj se valovanje pojavi kot posledica lokalnih zlomov rotacijskih simetrij, širi pa se predvsem za velike valovne dolžine [2]. Poleg teh lastnosti lahko za dvodimenzionalne aktivne sisteme napovemo tudi urejenost na prostorski skali, ki bistveno presega velikosti samih aktivnih delcev.



Slika 4. Na sliki so vidna potujoča valovna čela v gosti suspenziji aktina⁴, ki so jih v eksperimentu opazili Schaller *in dr.* Objavljeno z dovoljenjem A. Bauscha [10].



Slika 5. Na levi izmed gornjih dveh slik je prikazano urejanje plavajočih bakterij pri nizki številski gostoti. Z barvami so označene lokalne vzpostavitve polarne reda, ki so tukaj precej redke. Ob povečanju gostote (desna slika) je opazno bistveno povečanje urejenih območij. Objavljeno z dovoljenjem H. Zhanga. Vir: [3]

3.2 Aktivni nematik na substratu

Tudi tu obravnavamo suh sistem, le da tu polarnost posameznega delca ni pomembna. Za opis stanja še vedno potrebujemo gostoto delcev $\rho(\mathbf{r}, t)$, namesto vektorskega pa uporabimo tenzorski ureditveni parameter \mathbf{Q} . Slednji meri skupno poravnano osi delcev, pri čemer ne loči glave in repa. Ker v teh sistemih zanemarimo vztrajnost in tok tekočine, se orientacija podreja enačbi

$$\gamma_Q \partial_t \mathbf{Q} = -\frac{\delta F_Q}{\delta \mathbf{Q}} + \mathbf{f}_Q. \quad (9)$$

Na levi strani so navori zaradi trenja, pri čemer je γ_Q rotacijska viskoznost, na desni pa prvi člen predstavlja termodinamske navori, dobljene iz funkcionala proste energije F_Q . Člen \mathbf{f}_Q je izotropen tenzor, ki vključuje statistični beli šum, ki je lahko termalnega ali aktivnega izvora. Vsi ti členi so brezsledni in simetrični. F_Q se za aktivne nematike v dveh dimenzijah zapiše kot

$$F_Q = \int_{\mathbf{r}} \left[\frac{\alpha_Q(\rho)}{2} \mathbf{Q} : \mathbf{Q} + \frac{\beta_Q}{4} (\mathbf{Q} : \mathbf{Q})^2 + \frac{K_Q}{2} (\nabla \mathbf{Q})^2 + C_Q \mathbf{Q} : \nabla \nabla \frac{\delta \rho}{\rho_0} + \frac{A}{2} \left(\frac{\delta \rho}{\rho_0} \right)^2 \right]. \quad (10)$$

Členi v tem izrazu so po pomenu ekvivalentni tistim iz (7), ki opisuje prosto energijo za polarne sisteme iz prejšnjega poglavja. Upoštevamo le, da imamo tu opravka s tenzorjem, v (7) pa je

⁴Aktin je beljakovina, ki sodeluje pri krčenju mišic in na splošno pri gibanju celic. Zaradi tega se jo pogosto uporablja pri preučevanju lastnosti aktivnih snovi.

nastopal vektor. Prva dva člena (10) določata ureditev, pri čemer se nematski red ustvari za $\alpha_Q < 0$ in $\beta_Q > 0$. V tem primeru ta dva faktorja izhajata iz nematske stopnje urejenosti S , opisane v 2.1 Tretji člen se zopet pojavi zaradi popačenja ureditve, K_Q pa je Frankova elastičnost. Zadnji člen določa prispevek k spremembi ureditvi zaradi fluktuacij $\delta\rho$ okrog srednje vrednosti ρ_0 , pri čemer velikost konstante A določa dejanski vpliv. Predzadnji člen v (10) predstavlja sklopitev med Q in ρ in predstavlja največje ovire pri teoretičnem razvoju teorije, saj v splošnem ni zanemarljiv.

Če primerjamo enačbo (9) z nastavkom za polarne sisteme (6), opazimo, da tukaj na levi strani ni prisotnega adveksijskega člena. Posebne fizikalne lastnosti sistema zato vpeljemo prek kontinuitetne enačbe

$$\partial_t \rho = -\nabla \cdot \mathbf{J}, \quad (11)$$

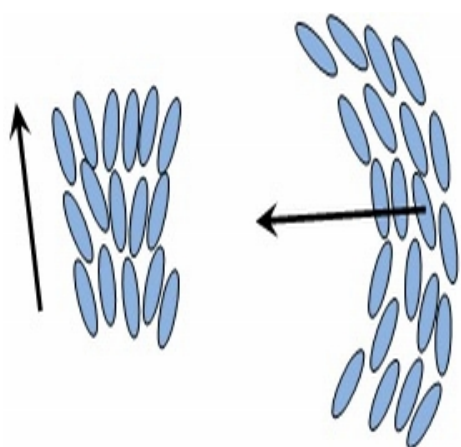
kjer se aktivni prispevki kažejo v toku \mathbf{J} . Prispevke k slednjem se lahko določi na več načinov. Tukaj bom omenil le argument, ki sledi iz slike 6, nekaj ostalih pa je opisanih v [1]. V sistemu, ki ima le apolarni ureditveni parameter, ukrivljenost $\nabla \cdot \mathbf{Q}$ implicira lokalno polarnost. V neravnovesnem stanju, ki ga vzdržuje neničelna aktivnost, je zato tok oblike

$$\mathbf{J}_{aktivni} = \zeta_Q \nabla \cdot \mathbf{Q}, \quad (12)$$

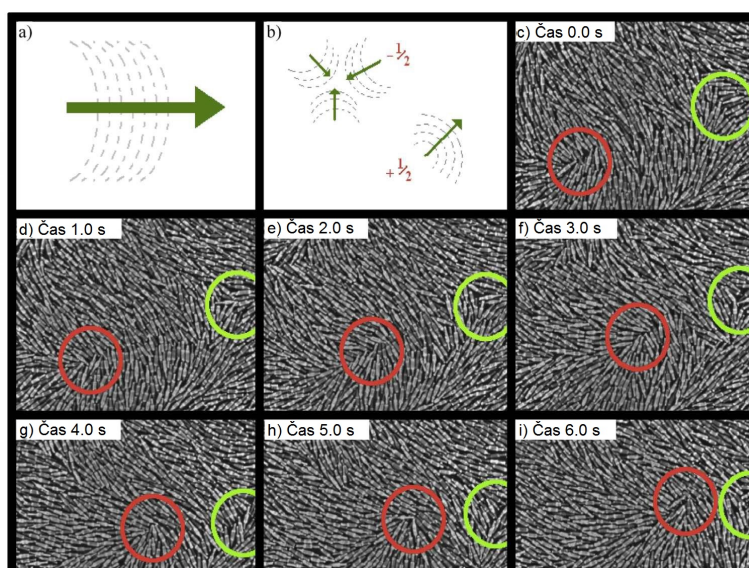
kjer je ζ_Q fenomenološki parameter. Če je $\zeta_Q = 0$, to predstavlja pasivno mehko snov, saj se tam tokovi ne pojavljajo. V aktivnih sistemih velja $\zeta_Q \neq 0$, kar pomeni, da so prisotni tokovi, ki jih sicer v pasivni snovi ne bi bilo.

Da ukrivljenost res povzroči premikanje, je razvidno tudi iz slike 7. Če se pojavi le en lok, je tak defekt označen s $+1/2$ in se giblje v smeri, ki ga ukrivljenost določa. Druga vrsta opaženih defektov (oznaka $-1/2$) pa so trije loki, katerih usmeritve kažejo proti središču trikotnika, ki ga tvorijo loki. Zato ne obstaja preferenčna smer, kamor bi se tak defekt gibal in ostane na mestu (slika 7). V neaktivni snovi so taki defekti posledica robnih pogojev oziroma notranjih napetosti, v aktivnih snoveh pa njihov obstoj kaže na edinstveno časovnoprostorsko dinamiko.

Kot pri polarnem sistemu, se tudi tukaj prek enačb (9) - (12) pride do časovno odvisne zveze med gostoto ρ in ureditvenim parametrom Q . Ta je še zahtevnejše oblike in kot taka ne omogoča



Slika 6. Spontano razširjanje in ukrivljanje gruče delcev povzroči lokalno polarnost v nematiku. Vir: [1]



Slika 7. Tok, ki ga povzroči defekt $+1/2$ (obkrožen rdeče) in stacionarni defekt $-1/2$ (obkrožen zeleno). Objavljeno z dovoljenjem V. Narayana Vir: [11]

preproste interpretacije ali primerjave s kakšno znano enačbo. Tudi njeno reševanje poteka predvsem numerično, saj pri analitičnem pristopu največjo oviro predstavlja sklopitev Q in ρ . Iz tega razloga za te sisteme ne obstaja veliko teoretičnih napovedi. Najpogosteje so predvidene velike fluktuacije gostote v sicer mirujočem sistemu, ki pa je bila doslej potrjena le v računalniških simulacijah in s pomočjo vibrirane plasti paličic, ni pa še bilo opravljenega eksperimenta z živim sistemom.

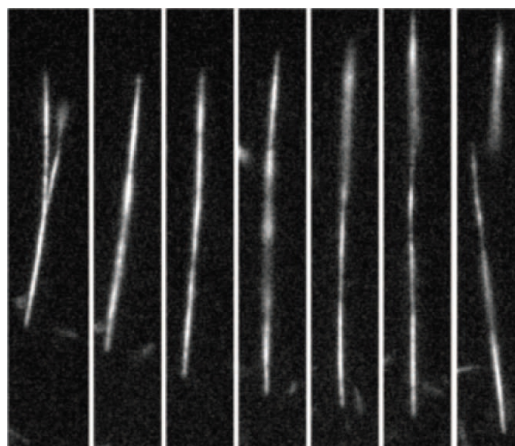
4. Eksperimenti

Eksperimenti so ključnega pomena pri razvoju teorij aktivnih mehkih snovi. Zaradi rezultatov, ki jih dajejo, se sploh pojavi potreba po snovanju novih modelov, obenem pa omogočajo ugotoviti, kateri dejavniki najbolj vplivajo na dogajanje v aktivnih sistemih. V tem poglavju sledi podrobnejša predstavitev dveh eksperimentov, na koncu pa je omenjenih še nekaj drugih, ki tudi izražajo posebne lastnosti aktivne snovi.

4.1 Prvi povsem ponovljiv eksperiment

Tim Sanchez *in dr.* so preučevali aktivne materiale, ki so jih tvorili deli živih celic in molekule, ki so v živih organizmih prisotne pri gibanju [12]. Leta 2012 jim je kot prvim uspelo narediti in opisati eksperiment z aktivnim nematikom, ki omogoča ponovljivost. To pomeni, da večkratne ponovitve eksperimenta dajejo rezultate, ki se le malo razlikujejo med seboj. Enake poskuse lahko zato opravijo tudi drugi laboratoriji, predvsem pa je njihov uspeh pomemben, saj v nadzorovanih sistemih lahko poljubno⁵ spreminjajo parametre, ki vplivajo na ureditev. S tem lahko natančno določijo snovne lastnosti, ki so pomembne za kvantitativen opis aktivnih sistemov. Iz eksperimentov, narejenih pred tem, je bilo namreč težko z gotovostjo določiti prevladujoče vplive in posledično velikosti parametrov, značilnih za snov.

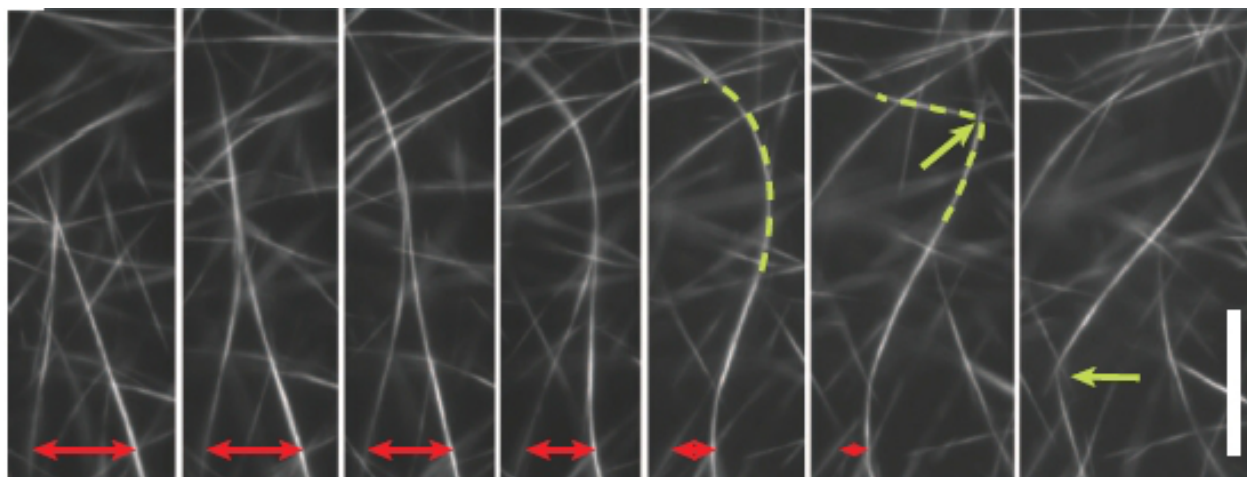
V tem eksperimentu so opazili več lastnosti, ki so značilne za aktivne sisteme, v pasivnih pa se ne pojavijo. Ena od teh je združevanje aktivnih delcev v snope, med katerimi se zaradi aktivnosti delcev pojavijo drsne sile in zato premikanje. Samo premikanje nato privede do srečanj različnih snopov in posledično do združitve. Če je novonastali snop presegel določeno kritično velikost, je prišlo do zloma, kar prikazuje tudi slika 8.



Slika 8. Na desni je zaporedje slik, ki predstavlja združitev dveh snopov (vsaka slika predstavlja korak v času). Na prvi sliki pride do srečanja dveh snopov (drugi je postavljen za prvim, kar mogoče zaradi slabe globinske ločljivosti slike ni takoj povsem očitno). V naslednjih petih slikah je prikazano združevanje, kar privede do takojšnjega raztezanja. Ker nov snop preseže kritično velikost, pride na koncu do zloma, kar je očitno na zadnji sliki. Objavljeno z dovoljenjem *Z. Dogica*. Vir: [12]

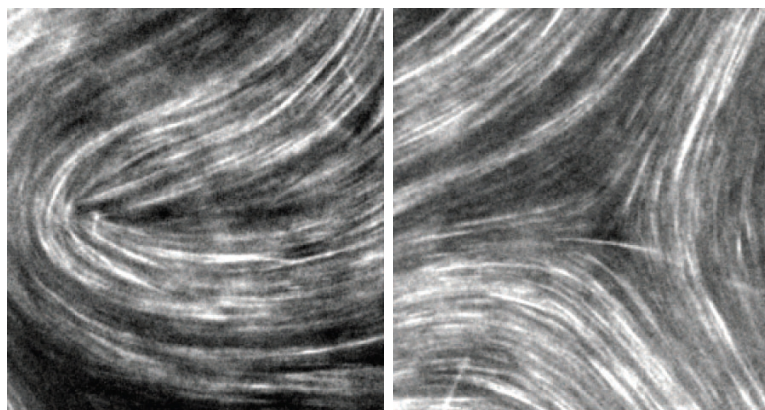
Na zgornji sliki je prikazana interakcija med dvema snopoma, ki se dogaja v raztopini z majhno številsko gostoto aktivnih delcev. Ko so slednje povečali, se je po pričakovanjih povečala pogostost zgoraj opisanega procesa. Ustvarile so se mreže aktivnih delcev, v katerih so se pojavili ciklični združevanja in razpadanja snopov (slika 9). To je na velikostni ravni delcev seveda vplivalo na njihovo urejenost, na bistveno večjih razdaljah pa se je odražalo kot stalen snovni tok.

⁵Poljubno spreminjanje v območju, ki je za določen parameter smiselno in praktično dosegljivo.



Slika 9. Zaporedje slik predstavlja časovno dinamiko mreže aktivnih delcev, vidno pod mikroskopom. Rdeče puščice označujejo združevanje dveh snopov, rumene črtice in puščice pa njihovo zlamljanje. Na 5. in 6. slikici je vidno, da, še preden se del mreže združi, ta na drugem mestu že razpada. Taka konstantna aktivnost na mikroskopski ravni se makroskopsko odraža v nastanku snovnih tokov. Objavljeno z dovoljenjem Z. Dogica. Vir: [12]

Za paličaste molekule, s kakršnimi so delali, je znano, da pri večanju koncentracije preidejo v tekočo nemaatsko fazo. Za opazovanje te ureditve so ustvarili tanko plast, kjer so aktivni delci zavzeli celotno površino in se lokalno uredili. Pri tem sta nastali obe vrsti defektov (opisani v 3.2), ki sta prikazani na sliki 10.

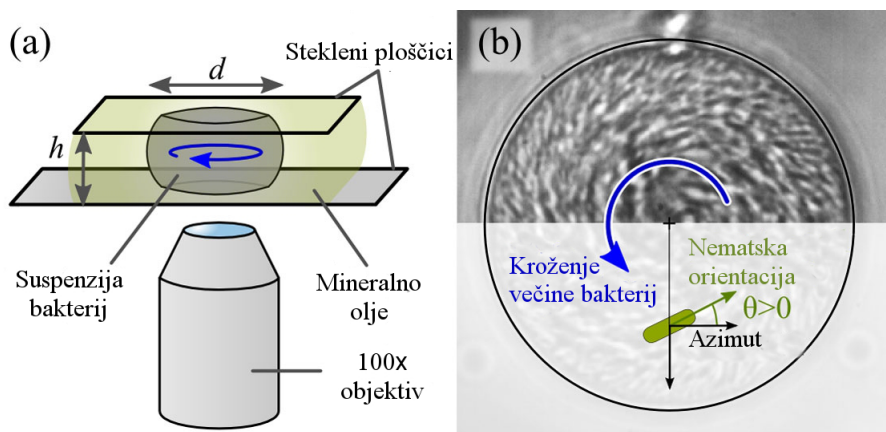


Slika 10. Leva slika prikazuje defekt $+1/2$, ki se premika po površini. Na desni je viden defekt $-1/2$, ki je sestavljen iz treh $+1/2$ defektov. Zaradi takšne postavitve se ti ne morejo gibati in defekt $-1/2$ kot celota miruje. Objavljeno z dovoljenjem Z. Dogica. Vir: [12]

Na koncu so raziskali še, kaj se zgodi, če mreže aktivnih objektov omejijo. To so naredili tako, da so jih ujeli v kapljice vode v emulziji z oljem ter z dveh strani omejili s trdo podlago. V dovolj velikih kapljicah (premer $> 30\mu\text{m}$) so se aktivni delci adsorbirali na mejo med oljem in vodo. Tam so ustvarili spontan tok, ker pa so bili tudi v stiku s podlago, se je zaradi trenja začela premikati celotna kapljica. To je seveda bistveno drugače kot v emulziji olja in vode brez aktivnih delcev, kjer do takega gibanja ne pride.

4.2 Bakterijska suspenzija

V raziskavi, ki so jo opravili Wioland *in dr.*, so preučevali, kako se obnaša suspenzija bakterij, ko jo omejimo v prostoru [13]. Znano je namreč, da geometrijska oblika mej in interakcije podlage s snovjo vplivajo na ureditev in transport snovi npr. v tekočih kristalih, ni pa še bilo narejenih podrobnejših raziskav glede aktivne snovi. V tem eksperimentu so natančneje preučevali, kako ukrivljenost mejnih površin vpliva na stabilnost in topologijo skupinske dinamike. Kot aktivno snov so uporabili vodno raztopino suspenzije bakterije *Bacillus Subtillis*, katera je bila v obliki kapljic ujeta v olje (slika



Slika 11. a) shema eksperimenta, b) vrtničasta ureditev omejenih bakterij v eni od kapljic. Objavljeno z dovoljenjem avtorjev H. Wiolanda in R. E. Goldsteina. Vir: [13]

11a). Pri kapljicah premera $d = 30 - 70 \mu\text{m}$ in višine $h \sim 25 \mu\text{m}$ se je snov uredila v stabilen vrtinec (slika 11b). Ta je obstajal, dokler je bilo na voljo dovolj kisika. Pri tem so opazili, da se v manjših kapljicah (torej večanje ukrivljenosti mejne površine) vrtinci sploh ne pojavijo, v večjih (manjša ukrivljenost površine) pa sicer se, a je prisoten vedno večji nered.

Tok, ki opiše vrtinec, je povsem azimutalen, zanimivo pa je, da se ob meji pojavi tanka plast bakterij, ki plavajo v nasprotno smer, kar ni bilo pričakovano. Razlog za to so našli v tem, da olje zaradi viskoznosti predstavlja za robne bakterije praktično neдрsečo podlago, obenem pa kroženje sredinske gručice na njih ustvarja strižne sile. Na tako situacijo se robne celice odzovejo s plavanjem v nasprotno smer. Slednji pojav je bil pri bakterijah opažen že prej, nima pa nobenega fizikalnega ozadja.

Tudi ta celoten eksperiment, ki ga je opravila ta raziskovalna skupina, omogoča ponovljivost in natančno nadziranje parametrov. Iz ugotovitev, do katerih so prišli prek eksperimentov, so lahko naredili dokaj preprost model, ki med drugim vključuje tudi ukrivljenost mejne ploskve, kar je bil njihov cilj. Model zelo natančno popiše opaženo dogajanje (tako nastanek vrtinca kot nasproti krožeče plasti) in je predstavljen v [13].

4.3 Drugi eksperimenti

Veliko drugih eksperimentov je pokazalo še druge posebnosti, ki se pojavijo v aktivnih sredstvih. Szabó *in dr.*, so preučevali, kaj se dogaja, ko se celice v petrijevki delijo in se s tem večja njihova gostota. Tako so lahko opazovali prehod iz neurejene faze (majhna gostota) v urejeno fazo pri neki kritični gostoti [14]. Več raziskav je preučevalo vibrirano plast trdih paličic. Te se vsaj na lokalni ravni uredijo, kažejo pa tudi velike številske fluktuacije [11], [15], [16]. Aktivni delci vplivajo tudi na viskoznost tekočine, kar je opisano v [2], [17]. Še več poskusov in njihovih rezultatov je navedenih v [1], [2].

5. Zaključek

V članku so bili predstavljeni osrednji danes zelo popularni eksperimentalni in teoretični pristopi v preučevanju aktivnih nematskih mehkih snovi. Področje je v hitrem razvoju, z osrednjim ciljem povezati in posplošiti različne predlagane pristope. V članku so bili predstavljeni osrednji fizikalni mehanizmi in modeli. Čeprav je bilo v zadnjem času narejenega veliko dela in razvitih več natančnejših modelov za posebne sisteme, je to področje, kjer bo potrebno narediti še precej raziskav, predvsem za kompleksnejše procese v živih bitjih, kjer je prisotna aktivna snov (npr. celjenje ran,

razvoj tkiv, celične delitve in oscilacije ...). Glede slednjih je veliko znanega na kvalitativnem nivoju, ni pa še dobrih kvantitativnih opisov. Mogoče je razlog v tem, da tukaj niso zanemarljivi vplivi bioceličnih signalov, ki dodatno urejajo gibanje, in v dozdašnjih modelih še niso zajeti. Biosignali imajo analogijo tudi na zelo velikih prostorskih skalah, saj se jate ptic oziroma črede konj v resnici dostikrat premikajo glede na vplive kot so količina hrane, položaj sonca, vonj ... V teh večjih sistemih je v naravi dostikrat prisoten tudi poseben vodilni člen (delec), kar tudi še ni upoštevano v teoretičnih opisih.

Na eksperimentalnem področju je želja ustvariti nove nežive imitacije bioloških sistemov, saj je delo s slednjimi pogostokrat težavno in ne omogoča obsežnega spreminjanja parametrov. Cilj je ustvariti tridimenzionalne sisteme, kjer bi delce poganjala ali svetloba ali pa kemijske reakcije, kar bi dalo popolnoma nov - tudi aplikativni in tehnološki - potencial opisanim aktivnim materialom.

LITERATURA

- [1] M. C. Marchetti, J.F. Joanny, S. Ramaswamy, T. B. Liverpool, J. Prost, M. Rao, R. Aditi Simha, *Hydrodynamics of soft active matter*, Rev. Mod. Phys. **85** (2013), 1143-1189.
- [2] S. Ramaswamy, *The Mechanics and Statistics of Active Matter*, Annu. Rev. Condens. Matter Phys. **1**, (2010), 323-345.
- [3] H. P. Zhang, A. Be'er, E.-L. Florin, H. L. Swinney, *Collective motion and density fluctuations in bacterial colonies*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **107** (2010), 13626-13630.
- [4] G. H. Koenderink, Z. Dogic, F. Nakamura, P. M. Bendix, F. C. MacKintosh, J. H. Hartwig, T. P. Stossel, D. A. Weitz, *An active biopolymer network controlled by molecular motors*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **106** (2009), 15192-15197.
- [5] A. Cavagna, A. Cimarelli, I. Giardina, G. Parisi, R. Santagati, F. Stefanini, M. Viale, *Scale-free correlations in starling flocks*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **107** (2010), 11865-11870.
- [6] Y. Katz, K. Tunstrom, C. C. Ioannou, C. Huepe, I. D. Couzin, *Inferring the structure and dynamics of interactions in schooling fish*, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. **108** (2011), 18720-18725.
- [7] E. Bertin, M. Droz, G. Grégoire, *Boltzmann and hydrodynamic description for self-propelled particles*, Phys. Rev. E **74** (2006), 022101-022105.
- [8] S. P. Thampi, R. Golestanian, J. M. Yeomans, *Velocity Correlations in an Active Nematic*, Phys. Rev. Lett. **111** (2013), 118101-118105.
- [9] M. Ravnik, *Colloidal Structures Confined to Thin Nematic Layers*, (University of Ljubljana, January 2009, Advisor: Prof. Slobodan Žumer).
- [10] V. Schaller, C. Weber, C. Semmrich, E. Frey, A. R. Bausch, *Polar patterns of driven filaments*, Nature **467** (2010), 73-77.
- [11] V. Narayan, S. Ramaswamy, N. Menon, *Long-Lived Giant Number Fluctuations in a Swarming Granular Nematic*, Science **317** (2007), 105-108.
- [12] T. Sanchez, D. T. N. Chen, S. J. DeCamp, M. Heymann, Z. Dogic, *Spontaneous motion in hierarchically assembled active matter.*, Nature **491** (2012), 431-435.
- [13] H. Wioland, F. G. Woodhouse, J. Dunkel, J. O. Kessler, R. E. Goldstein, *Confinement Stabilizes a Bacterial Suspension into a Spiral Vortex*, Phys. Rev. Lett. **110** (2013), 268102-268107.
- [14] B. Szabó, G. J. Szöllösi, B. Gönci, Zs. Jurányi, D. Selmeczi, T. Vicsek, *Phase transition in the collective migration of tissue cells: Experiment and model*, Phys. Rev. E **74** (2006), 061908-061913.
- [15] A. Kudrolli, G. Lumay, D. Volfson, L. S. Tsimring, *Swarming and Swirling in Self-Propelled Polar Granular Rods*, Phys. Rev. Lett. **100** (2008), 058001-058005.
- [16] V. Narayan, S. Ramaswamy, N. Menon, *Nonequilibrium steady states in a vibrated-rod monolayer: tetratic, nematic, and smectic correlations*, JSTAT **1**, (2006), 01005-01022.
- [17] S. Rafai, L. Jibuti, P. Peyla, *Effective Viscosity of Microswimmer Suspensions*, Phys. Rev. Lett. **104** (2010), 098102-098106.