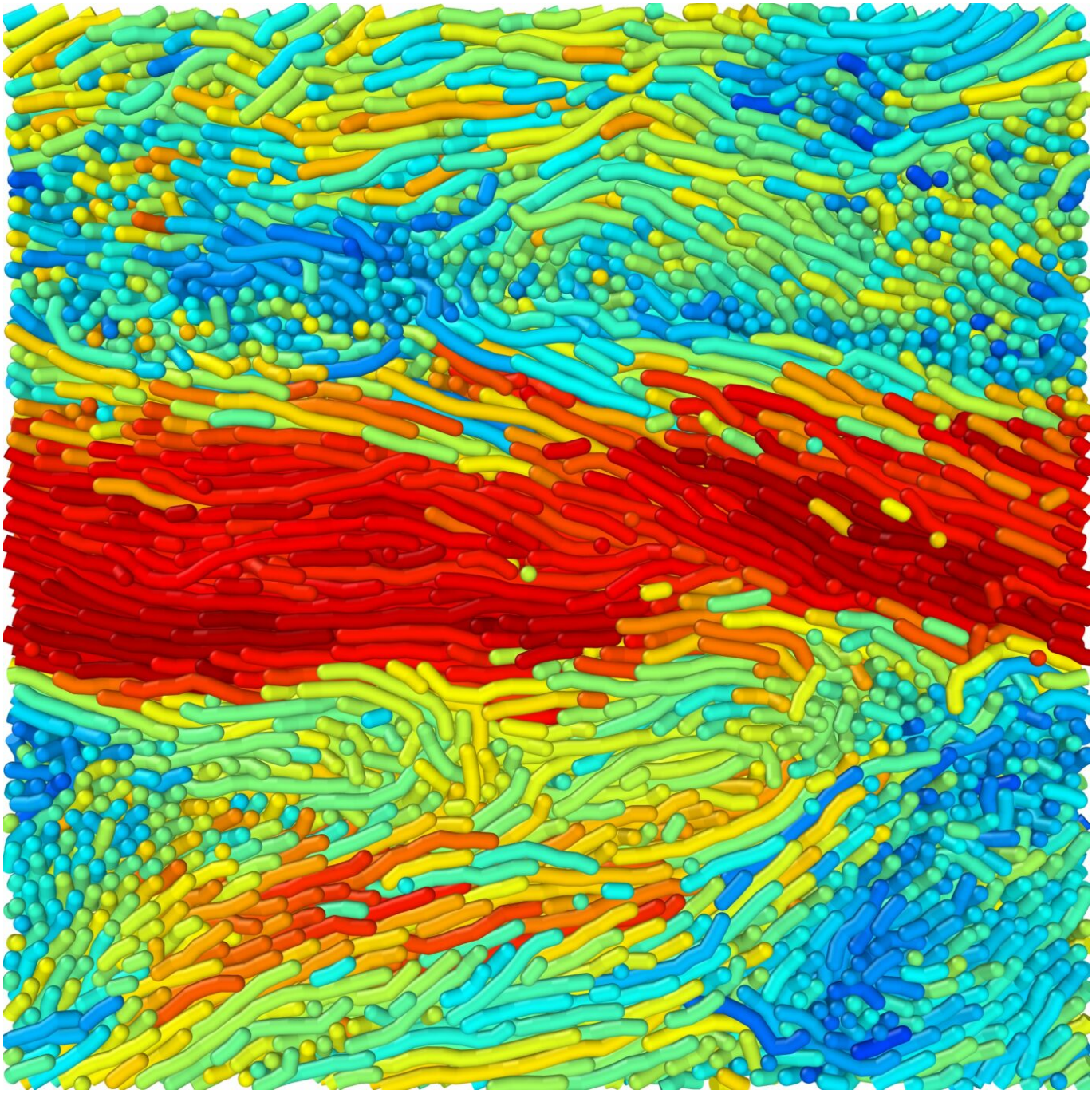
Wanneer beweging orde verhindert

Als je genoeg draadachtige objecten bij elkaar propt, zullen ze in ongeveer dezelfde richting gaan wijzen. Maar vervang de draadjes door wormen of bacteriën die in je darmen leven, en deze zelforganisatie wordt veel moeilijker. Recent onderzoek van UvA-natuurkundigen toont aan dat *activiteit* een van de belangrijkste faseovergangen in de zachte materiefysica fundamenteel kan veranderen.



Een gesimuleerde verzameling actieve filamenten. In rode gebieden zijn de filamenten uitgelijnd (geordend), in gele en groene gebieden is de uitlijning gedeeltelijk, en in de blauwe gebieden zijn ze niet uitgelijnd (ongeordend). Afbeelding: Twan Hooijschuur.

Veel systemen in de natuur organiseren zich spontaan: vogels in zwermen stemmen hun vliegrichting op elkaar af; scholen vissen bewegen zich collectief; slangen en wormen beschermen zichzelf door dicht op elkaar gepakte clusters te vormen; en zelfs moleculen kunnen hun oriëntatie coördineren om geordende fasen te vormen.

Bij draadachtige objecten, ofwel filamenten, vindt een belangrijke overgang plaats wanneer ze dichter en dichter op elkaar komen te zitten. Bij een lage dichtheid wijzen ze in willekeurige richtingen, als een menigte mensen die doelloos over een stadsplein loopt. Fysici noemen dit de isotrope fase. Naarmate er meer filamenten worden toegevoegd, beginnen ze zich echter op elkaar af te stemmen. Uiteindelijk wijzen de meeste filamenten ongeveer in dezelfde richting, waardoor een geordende toestand ontstaat die bekend staat als de nematische fase.

Deze overgang van wanorde naar orde is goed begrepen voor passieve systemen, waar de filamenten simpelweg reageren op thermische fluctuaties (beweging uit temperatuur). Maar de meeste biologische systemen zijn helemaal niet passief. Cytoskeletfilamenten in levende cellen, bacteriële ketens en clusters van wormen verbruiken continu energie om hun eigen beweging te genereren. Zulke systemen behoren tot het snelgroeiende onderzoeksveld van actieve materie.

In een recent gepubliceerde studie in *Physical Review Letters* laat het onderzoeksteam van de UvA zien dat activiteit veel meer doet dan alleen extra beweging introduceren. Twan Hooijschuur, promovendus en eerste auteur van het artikel, zegt: “We denken vaak dat activiteit systemen helpt nieuwe configuraties te verkennen. Wat ons verraste, is dat activiteit een systeem ervan kan weerhouden zich in een geordende toestand te vestigen.”

De nieuwe resultaten suggereren dat levende systemen activiteit niet alleen gebruiken om beweging te genereren, maar ook als een manier om hun eigen mate van organisatie te reguleren. Dankzij hun activiteit kunnen biologische systemen wendbaar en responsief blijven in plaats van vast te komen zitten in rigide geordende toestanden.

Een gesimuleerde verzameling actieve filamenten in beweging. De kleur geeft aan hoe goed de filamenten zich in dezelfde richting oriënteren. In rode gebieden zijn de filamenten uitgelijnd en vormen ze een lokaal geordende ‘nematische’ fase. In gele en groene gebieden is de uitlijning gedeeltelijk, en in de blauwe gebieden zijn ze niet uitgelijnd en ongeordend. Video: Twan Hooijschuur.

Een ander soort faseovergang

Voor het onderzoek voerde het team grootschalige computersimulaties uit van actieve, semi-

flexibele polymeren. Deze langwerpige filamenten bewegen zich voort langs hun eigen contouren, terwijl ze flexibel genoeg blijven om te buigen en te vervormen.

De simulaties onthulden een opvallend resultaat. In passieve systemen vindt de overgang van wanorde naar orde vrij abrupt plaats zodra een kritische dichtheid is bereikt. De filamenten wijzen plotseling in dezelfde richting en vormen een nematische fase.

Voor actieve filamenten verandert dit proces echter drastisch. Naarmate de activiteit toeneemt, wordt het begin van de nematische fase naar steeds hogere dichtheden verschoven. Tegelijkertijd wordt de overgang steeds vloeiender en geleidelijker.

Hooijschuur legt uit: “In plaats van plotseling geordend te raken, organiseren de actieve polymeren zich veel langzamer. Hoe sterker de activiteit, hoe moeilijker het voor het systeem wordt om zich collectief te ordenen. Het systeem probeert zich continu uit te lijnen, terwijl de actieve fluctuaties die uitlijning voortdurend verstoren.”

Bij voldoende hoge activiteitsniveaus ontdekten de onderzoekers dat er helemaal geen volledig geordende toestand ontstaat. In plaats van zich globaal uit te lijnen, buigen, draaien en fluctueren de polymeren voortdurend. Geordende en ongeordende gebieden bestaan naast elkaar in het materiaal, waardoor een dynamische toestand ontstaat die noch volledig willekeurig, noch volledig georganiseerd is.

Doordat actieve filamenten duwen en bewegen, vervormen ze voortdurend hun buren. Deze interacties creëren grootschalige buigbewegingen die de uitlijning over lange afstanden destabiliseren. Hoewel individuele gebieden lokaal geordend kunnen raken, voorkomen deze bewegingen dat het hele systeem zich coördineert tot één enkele uitgelijnde toestand.

Een groeiend onderzoeksveld

De studie maakt deel uit van een bredere inspanning om actieve materie te begrijpen. Hieronder vallen alle systemen waarvan de individuele componenten continu energie verbruiken en gezamenlijk complex gedrag genereren.

In de afgelopen tien jaar hebben onderzoekers vele voorbeelden ontdekt waarbij activiteit leidt tot geheel nieuwe vormen van organisatie. Dit onderzoek toont aan dat activiteit ook een van de meest fundamentele concepten in de natuurkunde kan veranderen: de aard van

een faseovergang zelf.

De onderzoekers zijn van plan verder te onderzoeken hoe activiteit de collectieve ordening beïnvloedt in meer realistische biologische en synthetische systemen. Hoewel deze studie het fysieke mechanisme identificeert dat verantwoordelijk is voor de vertraagde overgang, blijven er veel open vragen over hoe actieve fluctuaties andere soorten faseovergangen in de natuur beïnvloeden.

De bevindingen kunnen onderzoekers ook helpen bij het ontwerpen van nieuwe soorten adaptieve materialen. Dergelijke materialen zouden, zonder hun samenstelling te veranderen, kunnen schakelen tussen geordende en ongeordende configuraties aan de hand van de ingestelde interne activiteit.

Sara Jabbari-Farouji, die het onderzoek leidde, merkt op: “De natuur opereert vaak ver van evenwicht. Begrijpen hoe activiteit de fundamentele regels van zelforganisatie verandert, is essentieel als we materialen willen bouwen die zich meer gedragen als levende systemen.”

Publicatie

Emergent Isotropic-Nematic Transition in 3D Semiflexible Active Polymers, T. Hooijschuur, E. Irani, A. Deblais en S. Jabbari-Farouji. *Physical Review Letters* **136** (2026), 228101.