

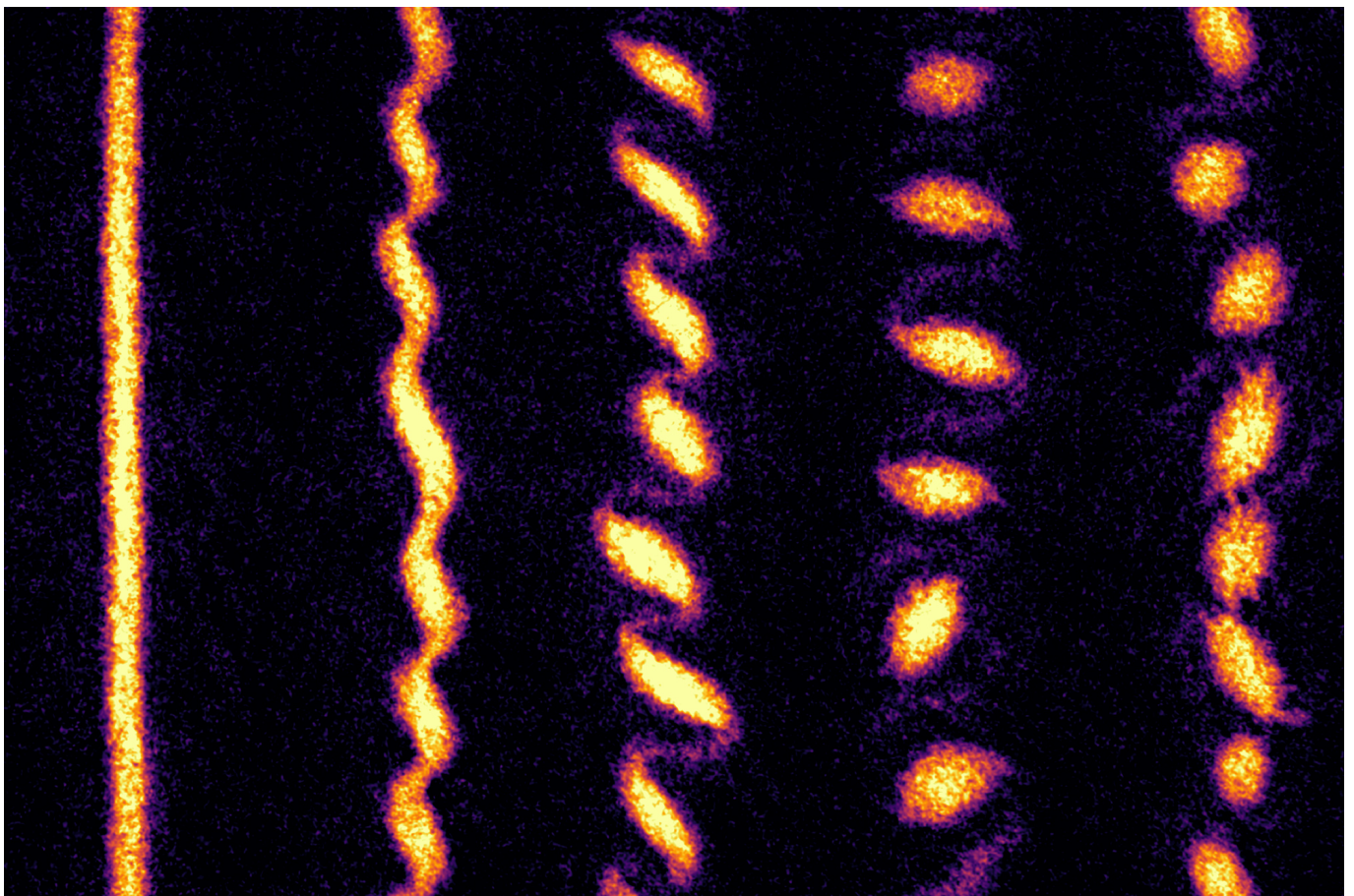
Een kristal van quantumtornado's

Quantumgedrag van deeltjes is vaak moeilijk vast te leggen. Een groep natuurkundigen is er nu in geslaagd om met ultrakoude atomen een kristal van 'tornado's' te maken; een verschijnsel dat een typisch quantumeffect is, maar dat relatief eenvoudig waargenomen en bestudeerd kan worden.

Natuurkundigen zien ultrakoude atomen een kristal van quantumtornado's vormen

Nieuwe waarnemingen leggen een cruciale overgang vast tussen klassiek en quantumgedrag

Geschreven door Jennifer Chu (MIT News Office), vertaling van de [Engelse versie](#) door Marcel Vonk



Afbeelding 1. Een kristal van quantumtornado's. Net als hoe weerpatronen op aarde zich vormen, breekt hier een draaiende vloeistof van quantumdeeltjes uiteen in een kristal dat bestaat uit wervelende, tornado-achtige structuren. Afbeelding: B. Mukherjee, A. Shaffer, P. B. Patel et al.

De wereld zoals we die ervaren wordt geregeerd door klassieke natuurkunde. Hoe we bewegen, waar we zijn, en hoe snel we gaan wordt allemaal bepaald door de klassieke aanname dat we op elk moment maar op één plaats kunnen bestaan.

In de quantumwereld wordt het gedrag van individuele atomen echter geregeerd door het griezelige principe dat de plaats van een deeltje een waarschijnlijkheid is. Een atoom heeft bijvoorbeeld een bepaalde kans om op de ene plaats te zijn, en een andere kans om op een andere plaats te zijn – op precies hetzelfde moment.

Als deeltjes interacties hebben zou het gevolg, puur als gevolg van zulke quantumeffecten, een scala aan vreemde fenomenen moeten zijn. Het waarnemen van zulk zuiver quantummechanisch gedrag tussen wisselwerkende deeltjes, te midden van het overweldigende lawaai van de klassieke wereld, is echter een lastige onderneming.

Natuurkundigen van MIT (VS) hebben nu rechtstreeks het samenspel van interacties en quantummechanica kunnen waarnemen in een bijzondere materietoestand: een ronddraaiende vloeistof van ultrakoude atomen. Onderzoekers hebben voorspeld dat in een draaiende vloeistof de interacties zullen domineren, en de deeltjes ertoe zullen dwingen exotisch, niet eerder gezien gedrag te vertonen.

In een onderzoek dat recent in Nature werd gepubliceerd, liet het MIT-team een quantumvloeistof van ultrakoude atomen snel ronddraaien. Ze zagen de oorspronkelijk ronde wolk van atomen eerst vervormen tot een dunne, naald-achtige structuur. Vervolgens, op het punt waar klassieke effecten onderdrukt zouden moeten zijn, zodat alleen interacties en quantumwetten het gedrag van de atomen kon beïnvloeden, brak de naald spontaan uiteen in een kristalvormig patroon dat leek op een reeks mini-quantumtornado's.

“De kristallisatie wordt alleen door interacties gedreven, en vertelt ons dat we overgaan van de klassieke wereld naar de quantumwereld,” zegt Richard Fletcher, universitair docent in de natuurkunde aan MIT.

De resultaten vormen de eerste rechte, in situ vastlegging van de evolutie van een snel draaiend quantumgas. Martin Zwierlein, de Thomas A. Frank-hoogleraar in de natuurkunde aan MIT, zegt dat de evolutie van de ronddraaiende atomen in grote lijnen lijkt op hoe de draaiing van de aarde grootschalige weersystemen sneller laat ronddraaien.

“Het corioliseffect dat het draai-effect van de aarde verklaart, lijkt op de Lorentzkracht die bepaalt hoe geladen deeltjes zich in een magnetisch veld gedragen,” merkt Zwierlein op. “Zelfs in de klassieke natuurkunde geeft dit aanleiding tot intrigerende patroonvorming, zoals wolken die rond de aarde draperen in prachtige spiraalbewegingen. Nu kunnen we dit ook in de quantumwereld bestuderen.”

Onder de mede-auteurs van het onderzoek zijn Biswaroop Mukherjee, Airlia Shaffer, Parth B. Patel, Zhenjie Yan, Cedric Wilson en Valentin Crépel, allemaal verbonden aan het MIT-Harvard Center for Ultracold Atoms en het Research Laboratory of Electronics van MIT.

Draaiende vervangers

In de jaren 80 begonnen natuurkundigen een nieuwe klasse van materie te bestuderen, die bekend staat onder de naam quantum-Hallvloeiëistoffen. Zulke materietoestanden bestaan uit wolken van elektronen die in magnetische velden zweven. In plaats van elkaar af te stoten en een kristal te vormen – wat klassieke natuurkunde zou voorspellen – passen de deeltjes hun gedrag aan aan wat hun buren doen, op een samenhangende quantummanier.

“Men ontdekte allerlei verbazende eigenschappen, en de reden was dat elektronen in een magnetisch veld (klassiek) in de ruimte ‘bevroren zijn’ – al hun bewegingsenergie is verdwenen, en het enige wat overblijft zijn interacties,” zegt Fletcher. “Een heel nieuwe wereld kwam tevoorschijn. Maar het was extreem moeilijk om die wereld waar te nemen en te begrijpen.”

In het bijzonder is het zo dat elektronen zich in een magnetisch veld verplaatsen met heel kleine bewegingen die moeilijk zichtbaar zijn. Zwierlein en zijn collega's beredeneerden dat ze, aangezien de beweging van atomen tijdens een draaiing op veel grotere schaal plaatsvinden, wellicht ultrakoude atomen als vervangers voor elektronen konden gebruiken, en zo identieke natuurkunde zichtbaar konden maken.

“We dachten: laten we zorgen dat de atomen zich gedragen alsof het elektronen in een

magneetveld zijn, maar zó dat we ze heel precies kunnen manipuleren,” zegt Zwierlein. “Dan kunnen we in beeld brengen wat individuele atomen doen, en zo zien of ze aan dezelfde quantummechanische natuurkunde voldoen.”

Weer in een carrousel

In hun nieuwe onderzoek gebruikten de natuurkundigen lasers om een wolk van ongeveer een miljoen natriumatomen te vangen, en koelden die atomen vervolgens naar een temperatuur rond de 100 nanokelvin. Daarna gebruikten ze een systeem van elektromagneten om een val te genereren die de atomen in hun beweging beperkte, en draaiden het collectief van atomen in het rond, als knikkers in een kom, met ongeveer honderd omwentelingen per seconde.

Het team nam de wolk op met een camera, waarbij een perspectief ontstond als dat van een kind dat naar het midden van een draaimolen kijkt. Na zo'n 100 milliseconden zagen de onderzoekers dat de atomen begonnen te draaien in een lange, naaldachtige structuur, die een kritieke kleinste quantumdikte bereikte.

“In een klassiek stromende substantie zoals sigarettenrook zou de structuur steeds dunner worden,” zegt Zwierlein. “Maar in de quantumwereld bereikt een vloeistof een grens van hoe dun hij kan worden.”

“Toen we zagen dat die grens bereikt werd, hadden we een goede reden om aan te nemen dat we aan de poort van interessante quantumfysica stonden,” voegt Fletcher toe, die met Zwierlein de resultaten tot aan dit punt in een eerder artikel in Science publiceerde. “De volgende vraag was: wat zou deze naald-dunne vloeistof doen onder invloed van alleen maar draaiing en interacties?”

In het nieuwe artikel zette het team met hun experiment een cruciale vervolgstap, waarbij ze keken hoe de naaldachtige vloeistof zich verder ontwikkelde. Terwijl de vloeistof verder draaide zagen ze dat een quantuminstabiliteit zichtbaar werd: de naald begon te wiebelen, daarna te spiraliseren, en brak uiteindelijk in een opeenvolging van draaiende klodders, of miniatuurtornado's – een quantumkristal, dat enkel en alleen ontstond door het samenspel van de draaiing van het gas en de krachten tussen de atomen.

“Die verandering heeft te maken met het idee dat een vlinder in China hier een storm kan veroorzaken, door de instabiliteiten die turbulentie veroorzaken,” legt Zwierlein uit. “In dit geval hebben we quantumweer: de vloeistof fragmenteert, op basis van alleen quantuminstabiliteiten, in een kristalstructuur van kleinere wolken en draaikolkjes. Dat we de quantumeffecten rechtstreeks kunnen zien is een grote doorbraak.”

Het onderzoek werd deels gefinancierd door de National Science Foundation, het Air Force Office of Scientific Research, het Office of Naval Research, de Vannevar Bush Faculty Fellowship en DARPA.

Publicatie: [Crystallization of bosonic quantum Hall states in a rotating quantum gas.](#)

Biswaroop Mukherjee, Airlia Shaffer, Parth B. Patel, Zhenjie Yan, Cedric C. Wilson, Valentin Crépel, Richard J. Fletcher en Martin Zwierlein. Nature 601, p. 58-62 (2022)

Gepubliceerd met toestemming van [MIT News](#).