

INTERVIEW

'DE QUANTUMWERELD IS LOGISCHER DAN DE ONZE'



Supergeleiding treedt soms op bij temperaturen die veel hoger liggen dan een paar graden Kelvin. Niemand weet echter waarom. De Leidse fysicus Jan Zaenen denkt de oplossing te hebben gevonden. "Als supergeleiding bij kamertemperatuur mogelijk blijkt, heeft dat een enorme impact op ons dagelijks leven."

Door Ed Croonenberg en Aschwin Tenfelde

Ubent de ontdekker van de zogenaamde quantumstrepen. Wat zijn dat precies?

"Er werd lange tijd geloofd dat quantumdeeltjes twee dingen met elkaar kunnen doen: ze komen tot stilstand en vormen normale, harde materie, of ze vormen een quantum-'gas'-toestand. Net als de lucht die we inademen zijn die quantumgasen heel eenvoudig, ze hebben nauwelijks structuur. Maar de laatste twintig jaar zijn we begonnen te ontdekken dat quantumvloeistoffen soms toch veel gestructureerder kunnen zijn. Denk, in analogie met onze dagelijkse, klassieke wereld aan stroop. Stroop vormt ook een vloeistof, maar bestaat uit hele

zijn. Het is een soort van quantumstroop. Onder condities die bijvoorbeeld heersen in hoge-temperatuur-supergeleiders blijken de elektronen geen quantumniveaus maar lijntjes te vormen die op hun beurt in quantumbeweging blijven, maar soms ook een soort van quantumplastic vormen. Quantumstrepen illustreren dat de quantumwereld moeilijker in elkaar steekt dan we lange tijd geloofden."

Tegenwoordig houdt u zich bezig met supergeleiding bij (relatief) hoge temperaturen. Tot nu toe begrijpt niemand hoe dat überhaupt mogelijk is. Heeft u een begin van een idee?

"Onze grote hypothese is dat het diep van binnen te maken

"Toen ik de hoogtepunten van de snaartheorie doorkreeg, liepen de koude rillingen over mijn rug"

lange moleculen, met als gevolg dat elke beweging in de pot uiteindelijk neerkomt op uiterst gecoördineerd gedrag van ontelbare individuele stroopmoleculen. Als je dit tot in het extreme doorvoert, krijg je plastic. Diep van binnen is plastic nog altijd een vloeistof. Maar het duurt zolang voordat de bewegingen zich georganiseerd hebben, dat we het als een harde stof kunnen gebruiken. Aldus staan quantumstrepen symbool voor het gegeven dat quantumtoestanden ook heel georganiseerd kunnen

heeft met de werking van de quantumstatistiek – en dan wordt het eng. Quantummechanica zegt dat een kat tegelijk dood en levend kan zijn. Hij is niet dood of levend, maar zowel dood als levend. "Quantummechanica betekent dat alles met alles te maken heeft. We weten van alles over het quantumgedrag van losse deeltjes, maar als je hun gemeenschappelijke gedrag wilt begrijpen, heb je extra postulaten nodig. De belangrijkste postulaten zijn die van de quantumstatistiek. Dat komt hier op

neer. Alle bekende deeltjes zijn in te delen in twee groepen: fermionen en bosonen. Een boson wil zich altijd in precies dezelfde quantumtoestand bevinden – en dus hetzelfde gedragen – als alle andere bosonen. Een voorbeeld hiervan is supergeleiding.

“Elementaire materiedeeltjes, zoals elektronen en quarks, zijn altijd fermionen. Maar als je twee fermionen bij elkaar doet, krijg je een boson. Als je iets maakt uit een even aantal fermionen, is het altijd een boson. Zo zijn helium-4-atomen bosonen omdat ze gemaakt zijn van een even aantal elektronen en quarks. Als je dit helium afkoelt tot ongeveer 2 graden Kelvin wordt het een supervloeistof. Omdat al die bosonen gelijk aan elkaar willen zijn, gaan ze zich collectief gedragen als één quantummechanisch heliumatoom. Het is principieel onmogelijk om te zeggen waar één individueel heliumatoom zich bevindt. Dit is bosonstatistiek.

“De fermionstatistiek is precies het omgekeerde. Die zegt: als je een fermion bent, mag je nooit in een toestand zitten waar al een ander fermion in zit. Fermionen zijn dus hyperindividualisten. Elektronen zijn elementaire deeltjes, en dus fermionen. Door deze fermionstatistiek is de elektronenvloeistof die zich onder alledaagse omstandigheden in koperdraden bevindt, in feite heel erg quantummechanisch. Het eerste elektron gaat op het laagste niveau zitten, en beweegt langzaam. Het tweede elektron gaat op een hoger niveau van beweging zitten en de volgende wéér hoger, enzovoort. Als je dan een heleboel elektronen in een koperdraad hebt, zitten de laatste elektronen in een toestand met een quantumbewegingsenergie die je kunt uitdrukken als een temperatuur van wel 100.000 graden Celsius. Dit soort dingen leer je niet op school. Zonde eigenlijk, want het is heel spannend.”

Maar hoe breng je die elektronen in een toestand waarbij supergeleiding optreedt?

“Als je de elektronen in een metaal als aluminium of lood afkoelt, gaan ze op een gegeven moment ontdekken dat ze elkaar een beetje aantrekken. Dan treedt er een raar soort quantummechanisch fenomeen op – eigenlijk een klein wonderdje: ze gaan dan paartjes vormen. En we weten dat twee elektronen één boson opleveren. Dan krijg je een gelijksoortig Bose-condensaat als in helium-4, en ontstaat er supergeleiding.

“Omdat het heel ingewikkeld is om elektronen zo gek te krijgen dat ze elkaar aantrekken, treedt die supergeleiding alleen bij heel lage temperaturen op. Van nature stoten elektronen elkaar namelijk af. Door collectieve effecten moet deze afstoting verdwijnen. Het komt er op neer dat de quantummechanische beweging ervoor zorgt dat de elektronladingen afgeschermd raken en de elektronen elkaar dus niet meer beïnvloeden. Hoe dat precies gebeurt is onduidelijk, maar we weten dat het optreedt. Hoe kouder je het maakt, hoe minder ze elkaar afstoten.

“Eigenlijk zou je dit fenomeen nog verder willen doortrekken, zodat de elektronen elkaar gaan aantrekken. In normale supergeleiders vervormt een elektron het ionenrooster van het kristal waarin het zich bevindt om vervolgens verder te vliegen. Het daaropvolgende elektron ‘ziet’ die verstoring en dat trekt het elektron aan, met als resultaat dat ze trouwen in een bosc-condenserende paartje. Lange tijd geloofde men dat dergelijke supergeleiding onmogelijk is bij temperaturen boven 30 graden Kelvin. Ondertussen weten we beter. Er zijn supergeleiders ontdekt die ook bij 90 graden Kelvin werken. Supergeleiding bij 150 graden



Kelvin werd al helemaal onmogelijk geacht, maar is in bepaalde koperoxides toch waargenomen. Om dat te kunnen verklaren, is iets nieuws nodig.”

We zijn benieuwd.

“Wij denken dat die elektronen een nieuw soort metaal vormen, en wel een heel ander metaal dan wat zich in een koperdraad bevindt. We hebben een manier gevonden waarop we een rare draai kunnen geven aan dat Pauli-principe, oftewel het fermionstatistiek-principe. Hierdoor kun je in feite dat ordinare opvullen van toestanden kwijtraken. Je krijgt dan een metallische toestand van elektronen, die schaalinvariant wordt, oftewel: fractaal. Vergelijk het met een Romanesco-bloemkool. De roosjes van die bloemkool zijn opgebouwd uit roosjes die op hun buurt ook weer uit roosjes bestaan, enzovoort. In de elektronensoep gebeurt dit ook, zij het natuurlijk op quantummechanische wijze. Daarbij verdwijnt die rare energie van 100.000 graden Kelvin uit de koperdraad en worden de elektronen veel gevoeliger voor paarvorming.

“We zijn er zo goed als zeker van dat we gelijk hebben. Als het daadwerkelijk klopt, komt dit als de ‘Krueger-Zaanan fermion-

“Als mijn oplossing klopt, komt die als de ‘Krueger-Zaanan fermionische vloeistof’ in de toekomstige leerboeken terecht.”

sche vloeistof’ in de toekomstige leerboeken terecht. Er zitten nog veel haken en ogen aan, maar we hebben de *proof of principle* in handen dat zulke fractale metalen kunnen bestaan. We zijn nu op een punt aangeland waarop we theoretisch heel hard moeten werken. Dit doen we door uitvoerig motieven uit verschillende delen van de theoretische fysica te combineren. We kunnen het in principe al mathematisch beschrijven en we zijn in het stadium dat we allerlei mathematische consistentie-checks kunnen uitvoeren. Alle dingen die goed moeten gaan, gaan ook goed. We weten dat zich in dit rare metaal inderdaad fractale eigenschappen bevinden, en we hebben een heel krachtig algemeen argument in handen dat vertelt dat als zo’n metaal bestaat, zich al bij heel hoge temperaturen elektronenparen kunnen vormen.”

Heeft u al experimenten bedacht die uw theorie kunnen ondersteunen?

“We hebben nog geen specifiek experiment gevonden, dat is de hoofdpijn op dit moment. Aan de andere kant, het aantonen van die quantumstrepen duurde ook twintig jaar. We zijn hard op zoek, en ik ben ervan overtuigd dat we op een gegeven moment iets zullen vinden. De wiskunde is stevig en onomstreden, maar in het veld wordt ons idee vooralsnog onthaald met sympathie, doch gezond sceptische gevoelens. Als je met dit soort heel grote ideeën aankomt, moet het bewijs ervoor even fantastisch zijn. En zulk bewijs hebben we op dit moment (nog) niet.”

Leidt dit alles uiteindelijk tot de supergeleider die bij kamertemperatuur werkt?

“Dat is een fundamentele en tegelijk heel praktische vraag. Want als supergeleiding bij kamertemperatuur mogelijk is, zou dat meteen een enorme impact op ons dagelijks leven hebben.”

U heeft uzelf wel eens een natuurfilosoof genoemd. Mogen we uw mening vragen over een aantal andere fundamentele kwesties in de natuurkunde?

“Zeker.”

Wat vindt u van de theorie van het quantumschuim [Een theorie die zegt dat het heelal op de kleinste schaal bestaat uit een soort schuim] van de Utrechts geleerde Renate Loll?

“Het mooiste en diepste probleem in de natuurkunde is de quantumzwaartekracht. Ik ben er hevig door gefascineerd. Ik geloof niet dat het iets verklaart over supergeleiding, maar er zijn indirecte verbanden te vinden tussen die strak georganiseerde elektronenwerelden in hoge-temperatuur-supergeleiders en Renate’s quantumschuim. Er is een analogie te vinden tussen quantum-ruimtetijd en een wereld die je kunt bakken van die quantumstrepen. Ruimtetijd kun je opvatten als iets wat lijkt op de normale, mechanische wereld, zoals bijvoorbeeld de tafel waaraan ik zit, maar zich in cruciale opzichten toch heel anders gedraagt. Ruimtetijd is op te vatten als een mechanisch medium dat gedeeltelijk quantumgesmolten is. De enige eigenschap die in zo’n quantumvloeibaar kristal overblijft is de weerstand die het biedt tegen kromming.

“Normale vloeibare kristallen zijn vormen van klassieke materie die tussen vast en vloeibaar in hangen, ze worden met veel succes gebruikt in LCD-schermen. Bij nultemperatuur kun je in principe ‘quantumvloeibare kristallen’ vormen (al zijn ze tot nu toe niet experimenteel aangetoond), een tussenvorm tussen een harde stof en quantumvloeistof. Deze quantumvloeibare kristallen hebben het een en ander gemeen met Renate’s quantumschuim. (zie *Scientific American* nr. 2, 2006)

“Het fascinerende van Loll is dat ze zich heel druk maakt over de werking van causaliteit, dus oorzaak en gevolg. Het universum kun je immers zien als een soort organisatiefenomeen in de quantumfysica. In de normale quantumfysica blijkt er geen echte causaliteit te bestaan.”

Daar kan toch niemand zich nog wat bij voorstellen?

“De fundamentele quantumwereld is eenvoudiger dan onze wereld, want hij heeft eenvoudigere regels. Wij mensen nemen die quantumwereld niet waar. Wij moeten dat eerst leren, en dat is een hele toer. Zelf ben ik wel in een situatie terechtgekomen waarin ik net zo gemakkelijk door de quantumwereld kan lopen als door een stad. Ik ken de regels en voorspelbaarheid van die wereld, en zie hem als een volstrekt logische wereld – zelfs logischer dan onze wereld.

“Een wereld zonder causaliteit is in feite eenvoudiger dan een wereld met causaliteit. Renate Loll heeft een manier gevonden om causaliteit terug te brengen in de quantumfysica door op een fundamentele manier te spelen met de werking van de quantummechanica, toegepast op de structuur van ruimtetijd. Ik weet niet of het klopt, maar de gedachte is heel spannend.”

Is het een alternatief voor de snaartheorie?

“De snaartheorie is op dit moment het meest omstreden gebeuren in de theoretische natuurkunde. Het debat over de snaartheorie draait om de grote haast die men heeft om wiskundige waarheden uit de snaartheorie te interpreteren als echte theorie. Snaartheoretici geloven dat er een diepe kern van waarheid in zit, maar niemand kan echt zeggen wat die waarheid is. Het is zelfs mogelijk dat die theorie helemaal niet over de natuur gaat. Het is wel degelijk zo dat de snaartheorie heel bijzondere verbanden legt, bijvoorbeeld tussen de zwaartekracht en de quantummechanica. Die verbanden zijn niet eenduidig fysisch te interpreteren, maar men wil ze wel toepassen op de werkelijkheid zoals wij die kennen. Velen zijn van mening dat snaartheoretici daarbij te kort door de bocht gaan en de zaak te hard verkopen. Tegen de buitenwereld zeggen ze dat dat allemaal wel opgelost is, maar het tegendeel is waar. Wat ze daadwerkelijk in handen hebben is helemaal niets. Dit alles neemt niet weg dat de snaartheorie formidabele wiskunde is, ontzettend mooi gewoon. Ik vergelijk het met de Algemene Relativiteitstheorie van Einstein. Als je die begint te begrijpen, lopen de koude rillingen over je rug. Toen ik eenmaal enkele hoogtepunten van de snaartheorie doorkreeg, voelde ik precies dezelfde rillingen.” ■