

ELEKTRONEN GEDRAGEN ZICH ALS DE AUTO'S ROND LEIDEN IN DE SPITS

# Blik in de supergeleider

In 1989 voorspelde hij hun bestaan. Nu zijn ze echt gezien. De streppatronen van Jan Zaanen. *Margriet van der Heijden*

HET BEELD dat natuurkundigen van supergeleiding hadden, leek ooit zo compleet. In 1911 liet de Leidse hoogleraar Heike Kamerlingh Onnes zien dat er bij temperaturen vlak boven het absolute nulpunt door kwik een elektrische stroom kan lopen zonder dat die stroom weerstand ondervindt. Zonder energieverlies dus. Dankzij het werk van de Amerikanen John Bardeen, Leon Cooper en Robert Schrieffer kon daarvoor in de jaren vijftig ook een sluitende verklaring worden gegeven.

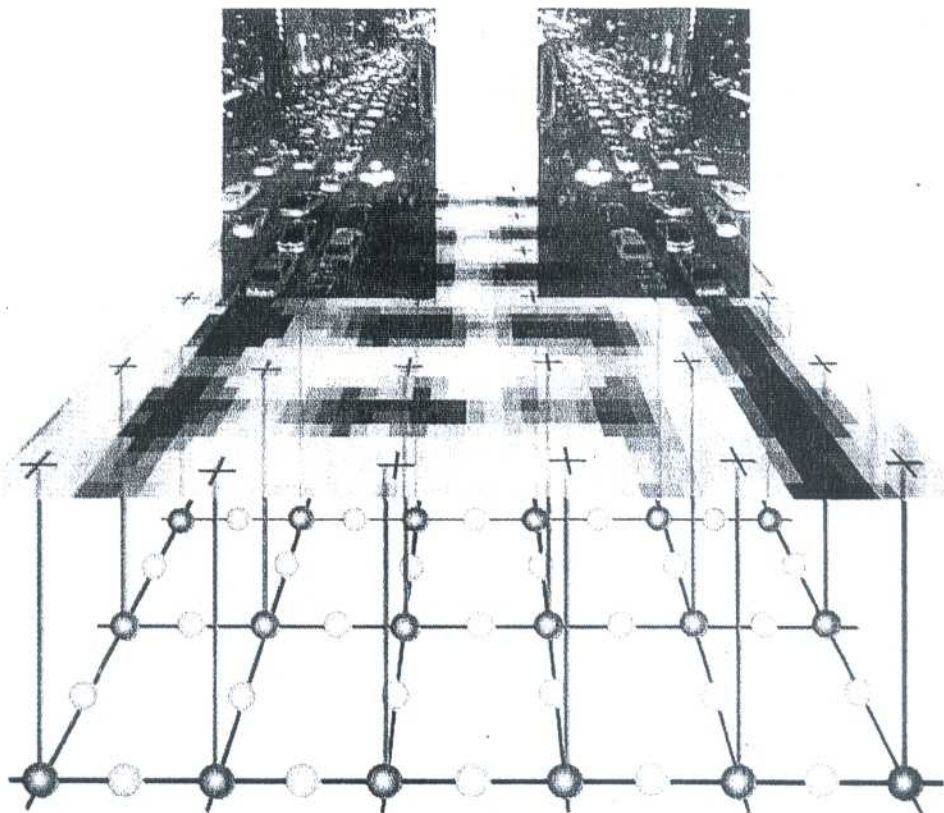
Maar toen vonden Georg Bednorz en Alex Müller bij IBM in Zürich in 1986 een nieuwe klasse van keramische materialen, waarin supergeleiding optrad bij veel hogere temperaturen. In de jaren daarna werd een record bereikt van 150 graden Kelvin. En voor dat fenomeen, dat volstrekt niet in het bestaande beeld past, is ook nu, twintig jaar later, geen sluitende verklaring.

"De geleerden zijn er niet uit", zegt Jan Zaanen, hoogleraar theoretische natuurkunde in Leiden. "Maar wel krijgen we steeds meer zicht op het gedrag van elektronen in materialen." Heel letterlijk zelfs, want onderzoekers uit de groep van Seamus Davis van Cornell University in de Verenigde Staten beschrijven deze week in *Science* hoe ze voor het eerst de bewegingen van elektronen in zo'n keramisch materiaal tot op de schaal van een enkel atoom in kaart hebben gebracht.

Zaanen schreef er in hetzelfde blad een enthousiast commentaar bij. "We zien een wereld van grote rijkdom, die voortkomt uit de quantumbewegingen van elektronen en de complexe patronen die daaruit ontstaan", schrijft hij. De elektronen bewegen er langs streepvormige banen, die een steeds wisselend zebra patroon in het materiaal vormen – en dat had Zaanen in 1989 al voorspeld.

**SNELWEG** Bij elektronen in metalen, in conventionele en in hogetemperatuur-supergeleiders, zegt Zaanen, is er telkens competitie tussen quantummechanisch gedrag en gedrag dat onderworpen is aan de wisselwerkingen uit de macroscopische wereld: aan de elektromagnetische kracht. Die zorgt ervoor dat elektronen elkaar afstoten en perkt zo hun bewegingsvrijheid in. De regels van de quantummechanica streven juist 'delokalisatie' na: dwingen het elektron voortdurend in beweging te zijn, zich niet op een plek vast te pin-

FRANK KRUEGER, UNIVERSITEIT LEIDEN/SCIENCE



nen. In zijn commentaar gebruikt Zaanen de metafoer van (snel)wegen, waarbij de elektronen als auto's moeten worden gezien. De elektromagnetische krachten kunnen in dat beeld tot opstoppingen leiden, omdat ze de elektronen tot stilstand dwingen.

In een stroomdraad, zoals een koperdraadje, overheerst de quantummechanica. De elektronen bewegen vrij, alsof ze alleen op een weg rijden (waarbij ze, als een spanningsverschil wordt aangelegd, één richting opgaan). In een conventionele supergeleider koppelen de elektronen zich paarsgewijs en gaan zich daardoor gedragen als 'bosonen', deeltjes met een eigen set quantumregels. Bij heel lage temperaturen betekent het dat ze condenseren tot een Bose-Einsteincondensaat, een collectieve quantumtoestand die hen in staat stelt zich voort te bewegen alsof hun omgeving niet bestaat. Alsof ze volledig vrij baan hebben.

In de keramische materialen van hogetemperatuur-supergeleiders gebeurt iets anders. Daar bewegen de elektronen zich door de dunne laagjes koperoxide, die gesandwich liggen tussen dikkere lagen van bijvoorbeeld een strontium-lanthaanverbinding. Zaanen: "Normaal gesproken blokkeren de afstotende elektromagnetische krachten in het koperoxide elke bewe-

• *Met een scanning tunneling microscoop keken Amerikanen naar de verdeling van elektronen in een keramisch materiaal met koperoxide. De 'opstoppingen' zijn weergegeven in zwart, de gebieden met vrije doorstroom lichten op.*

ging van de elektronen. Het is als het verkeer rond Leiden als je rond negen uur 's morgens de stad uit wil komen." Maar de omgeving rond de laagjes zorgt ervoor dat hier en daar een elektron wordt weggenomen. Dat ruimte wordt gemaakt dus. "Dan zie je dat het 'verkeer' op gang komt en volgens ingewikkelde patronen gaat verlopen. Iets dat elke filerijder die de golvende beweging van rijden en stilstaan meemaakt, moet herkennen", aldus Zaanen. "Wordt dat allemaal quantummechanisch doorgekeerd, dan levert dat een streppatroon op, waarin doorgaande en geblokeerde rijbanen elkaar afwisselen."

**STREPPATRONEN** Eerder waren er al sterke aanwijzingen voor het bestaan van die theoretisch voorspelde streppatronen. "Maar het mooie van de experimenten uit Cornell is dat ze voor het eerst gewoon laten zien wat er gebeurt." Daarvoor tasten de Amerikanen het materiaal af met een STM, een scanning tunneling microscoop, die op elk punt een elektron toevoegde aan het materi-

aal, of er een elektron aan onttrok. Volgens vergeleken ze hoeveel moeite dat kostte. In de metafoer van Zaanen: een overvolle weg verlaten via een vrije afrit (een elektron onttrekken) is makkelijk. Invoegen op een weg waar iedereen stilstaat is lastig (een elektron toevoegen). Zaanen: "Een slimme truc om de 'drukte' in beeld te krijgen."

**COOPERAREN** Grote vraag is wat het berekent voor supergeleiding. De metingen werden uitgevoerd bij temperaturen net boven het punt waarbij supergeleiding optreedt. Zaanen: "Maar de strepen moeten er iets mee te maken hebben. Ze zouden de neerslag kunnen zijn – de vaste fase, zeg maar – van een quantumvloeistof die bij lagere temperaturen voor supergeleiding zorgt." En waarin wellicht weer paren van elektronen, 'Cooperparen', een cruciale rol spelen.

"Mijn geocofende oog ziet die paren overal in de meetresultaten", schrijft Zaanen in *Science*. "En ik ben niet de enige, hoor", voegt hij aan de telefoon toe. "Ook onderzoeksleider Seamus Davis denkt ze te zien. En Nobelprijswinnaar Phil Anderson, die de methode bedacht, wees er ook al op." De Cornell-groep werkt nu aan een verdere analyse die misschien meer zekerheid daarover kan bieden. "Maar dat is voor de toekomst."