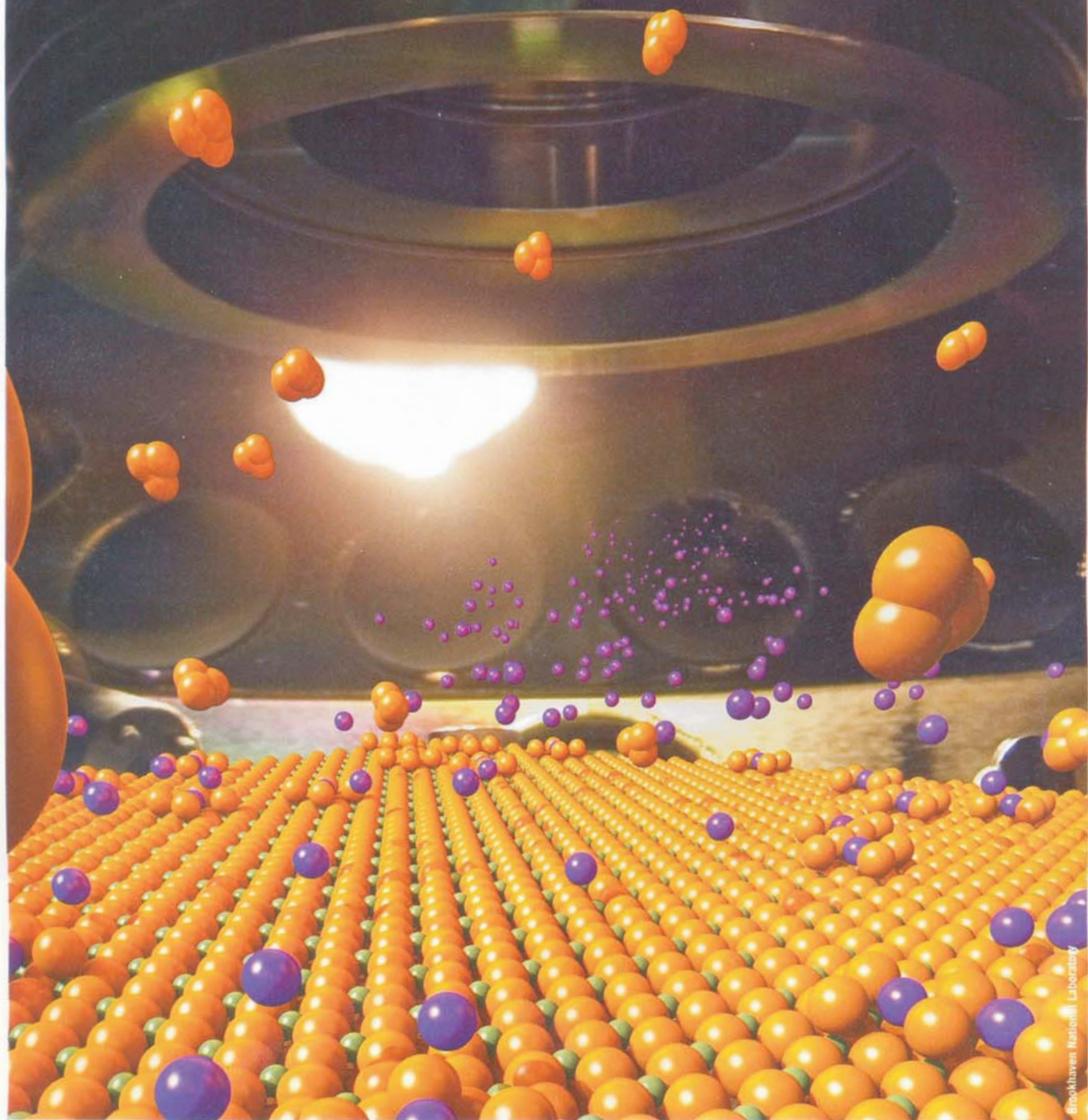


Ijskoud



Brookhaven National Laboratory

het beste

DE FASCINERENDE TOEPASSINGEN VAN SUPERGELEIDING

Supergeleiding is een raadsel. Een heel handig raadsel: bij extreem lage temperaturen hebben bepaalde materialen ineens totaal geen elektrische weerstand meer. Het fenomeen wordt al gebruikt in deeltjesversnellers, MRI-scanners en zweeftreinen. Maar hoe werkt het nu precies? En wat kunnen we er straks nog meer mee?

Tekst **Roel van der Heijden**

Gebouwen schieten in een noodgang voorbij, auto's op de snelweg naast je verdwijnen in *no time* in je stofwolken. Je zit in de Maglev-trein van Shanghai Airport richting het centrum van de stad. Dat ritje van 30 kilometer legt de zweef trein af met een gemiddelde snelheid van ruim 250 kilometer per uur, inclusief optrekken en remmen. Op het hoogtepunt van de rit geeft de teller zelfs een minuut lang 431 kilometer per uur aan. Aan de andere kant van de stad is zojuist de Shanghai Synchrotron Radiation Facility in gebruik genomen. In

In een supergeleidende draad kan stroom voor eeuwig blijven lopen

deze deeltjesversneller worden elektronen met bijna de lichtsnelheid door een cirkelvormig parcours gestuurd. Daardoor zenden ze röntgenstraling uit die wetenschappers weer gebruiken om bijvoorbeeld de structuur van grote biomoleculen te kunnen bepalen. En in het ziekenhuis waar de Maglev met een rotvaart langs schiet, ondergaat een persoon net een MRI-scan. Op het beeldscherm in de ruimte ernaast verschijnen zijn hersenen, in detail. Zonder dat er een scalpel aan te pas hoeft te komen. Deze op het oog onsamenhangende gebeurtenissen hebben wel degelijk iets gemeenschappelijk: de zweef-

trein, de deeltjesversneller en de MRI-scanner maken allemaal gebruik van supergeleiding. Dat is het bizarre verschijnsel dat een materiaal elektronen doorlaat zonder dat ze ook maar enige weerstand ondervinden. In een supergeleidende draad kan een stroom voor eeuwig blijven lopen, zonder dat je energie hoeft toe te voegen. De techniek profiteert er gretig van, maar hoe werkt het precies? Welke materialen hebben een weerstand van nul? En hoe kan dat eigenlijk?

Megamagneten

In alle hierboven genoemde toepassingen wordt supergeleiding gebruikt voor het opwekken van magnetische velden. Dat werkt zo: van supergeleidend materiaal wordt een draad gemaakt die in een spoel wordt gewikkeld. De spoel wekt onder invloed van een lopende stroom een magneetveld op, volgens hetzelfde principe als bij een 'gewone' elektromagneet. De sterkte van het magneetveld, die in veel toepassingen extreem groot moet zijn, loopt evenredig op met de stroomsterkte van de stroom door de spoel. Nu is bij 'gewone' elektromagneten de spoel gemaakt van een normaal geleidende stof, zoals koper. Ook daarmee kun je extreem sterke magneetvelden opwekken, beaamt Stef Wiegers van het High Field Magnet Laboratory van de Radboud Universiteit in Nijmegen: "Sterker nog; de sterkste magneetvelden worden opgewekt met gewone elektromagneten! Als je oneindig veel stroom door de spoel van een gewone elektromagneet stuurt, heb je in theorie een oneindig sterk magnetisch veld." Heel prettig, als je wilt experi- ➔

◀ Een artist impression van het maken van een enkele laag atomen die supergeleidend is. Dit jaar lukte het wetenschappers voor het eerst zo'n laag te fabriceren.

menteren met zo sterk mogelijke magneetvelden en je een directe verbinding hebt met de elektriciteitscentrale, zoals het magneetlab in Nijmegen dat heeft. “Maar als de stroom flink wordt opgevoerd, loop je wel tegen problemen aan”, vervolgt Wiegers. “Veel stroom betekent een groot vermogen, en bijna al dat vermogen wordt in de magneet omgezet in warmte. Daarom hebben we een enorme koelcapaciteit nodig. Een tweede punt vormt de gigantische stroomrekening: onze sterkste magneet verstoekt op volle sterkte maar liefst 20 megawatt.”

Keramische supergeleiders

Zie daar de aantrekkingskracht van de supergeleiden- de elektromagneet. Stroom door een supergeleidende spoel kan moeiteloos jaren blijven lopen zonder dat de stroomsterkte vermindert, en zolang die stroom loopt maakt hij een magnetisch veld. Enkel het aanleggen van het veld kost energie; daarna hoeft er geen energie meer bij. Weg is je torenhoge stroomrekening.

En er is nog een reden om te kiezen voor supergeleiden- de magneten: je kunt er enorm constante magneetvel- den mee aanleggen. Dat is cruciaal voor de toepassing in MRI-scanners. Alleen met volledig stabiele velden kun je een beeld van iemands binnenste opbouwen. Wiegers: “Gewone elektromagnetten geven altijd kleine

Een voor de hand liggende toepassing is stroomtransport

variaties, doordat ze gebruik maken van stroom- voedingen die voor schommelingen zorgen. Dat pro- bleem ben je kwijt met de supergeleidende variant.” Helaas heeft supergeleiding niet alleen maar voor- delen. Alle bekende materialen die supergeleiding vertonen, doen dat alleen bij extreme kou. Dat be- tekent dat installaties die er gebruik van maken, ge- compliceerde koelsystemen moeten hebben, waarin vloeibaar helium of stikstof circuleert. De installatie plus het onderhoud van deze systemen brengt weer veel kosten met zich mee.

We hebben het nu steeds over supergeleiding, maar feitelijk zijn er twee types supergeleiders. De klassieke supergeleiders bestaan uit metalen die bij extreem lage temperaturen (vaak enkele graden boven het absolute nulpunt; -273 graden Celsius) plots geen weerstand meer bieden aan een elektronenstroom. Niet alle metalen zijn supergeleiders: goud, zilver en koper zijn weliswaar uitstekende geleiders, maar vertonen bij extreme kou géén supergeleiding. Het tweede type supergeleiders is bijna altijd een legering of een keramisch materiaal – een zogenoemd cupraat – met lange structuurformules. Ook deze materialen moeten extreem worden gekoeld om supergeleiding mogelijk te maken, zij het een stukje minder extreem. Het keramische materiaal met de imposante structuurformule $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_9$ is bij de ‘hoge’ temperatuur van -135 graden Celsius al supergeleidend – het record tot nu toe (onder druk geleid het zelfs al bij -113 graden Celsius).

Vrij reizen

Hoe kan het dat elektronen vrij door zo'n materiaal ‘reizen’? Gewone geleiding, in bijvoorbeeld een me- taal, ontstaat wanneer de buitenste elektronen van de metaalatomen onder invloed van een elektrische spanning loslaten en vrij door het materiaal gaan bewegen. De kans dat zo'n elektron daarbij vervol- gens tegen een ander atoom botst – oftewel weerstand ondervindt – is groot. Daarbij draagt het elektron energie over aan het atoom, die vrijkomt als wrijvings- warmte.

Maar in een supergeleidend materiaal gedragen de geleidingselektronen zich raar. Deze negatief geladen deeltjes vormen opeens paartjes, ook wel Cooper- paren genoemd. Dat zijn bijzondere stelletjes, want elektronen stoten elkaar normaal gesproken af. Blijkbaar is er een manier waarop de deeltjes in deze Cooperparen elkaars afstoting kunnen weerstaan. Dat doen ze met behulp van trillingen, ook wel fononen genoemd. De verklarende theorie stelt dat een Cooperpaar altijd in zijn laagste mogelijke energietoestand zit. Het gevolg daarvan is dat de deeltjes bij een mogelijke botsing met een atoom simpelweg geen energie meer *kunnen* overdragen aan dat atoom. Bovendien kan het atoom óók geen energie overdragen aan het Cooperpaar, want door de lage temperatuur bezit het materiaal te weinig energie om het stel in een hogere energietoestand te brengen.

Het resultaat is dat de elektronen en de atomen op geen enkele manier energie met elkaar kunnen uit- wisselen; eenmaal op snelheid gebracht, blijven de elektronen gewoon doorreizen. Ze botsen niet meer met de atomen in het geleidende materiaal, want dat zou onvermijdelijk een uitwisseling van energie betekenen.

Deze BCS-theorie, genoemd naar zijn bedenkers Bardeen, Cooper en Schrieffer, is onder wetenschap- pers geaccepteerd voor de klassieke supergeleiders, maar de supergeleidende eigenschappen van het tweede type kunnen er niet mee worden verklaard. De temperaturen waarbij deze legeringen of cupraten supergeleidend zijn, zouden veel te hoog zijn om de elektronen via fononen met elkaar te laten binden. “Na de ontdekking van supergeleiding in keramische materialen in 1986 ontstond er een overdaad aan ideeën en modellen om deze variant van supergelei- ding te verklaren”, vertelt Alexander Brinkman van de afdeling Lage Temperaturen van de Universiteit Twente. “In korte tijd werden er wel honderd nieuwe theorieën geopperd. Maar tegenwoordig zijn er ruw- weg nog twee kampen die met elkaar strijden. Aan de ene kant heb je wetenschappers die zeggen dat het precies zo werkt als bij klassieke supergeleiders. Het andere kamp zegt dat het te maken heeft met de magnetische interacties van het materiaal met de elektronen.”

Ideaal overloopvat

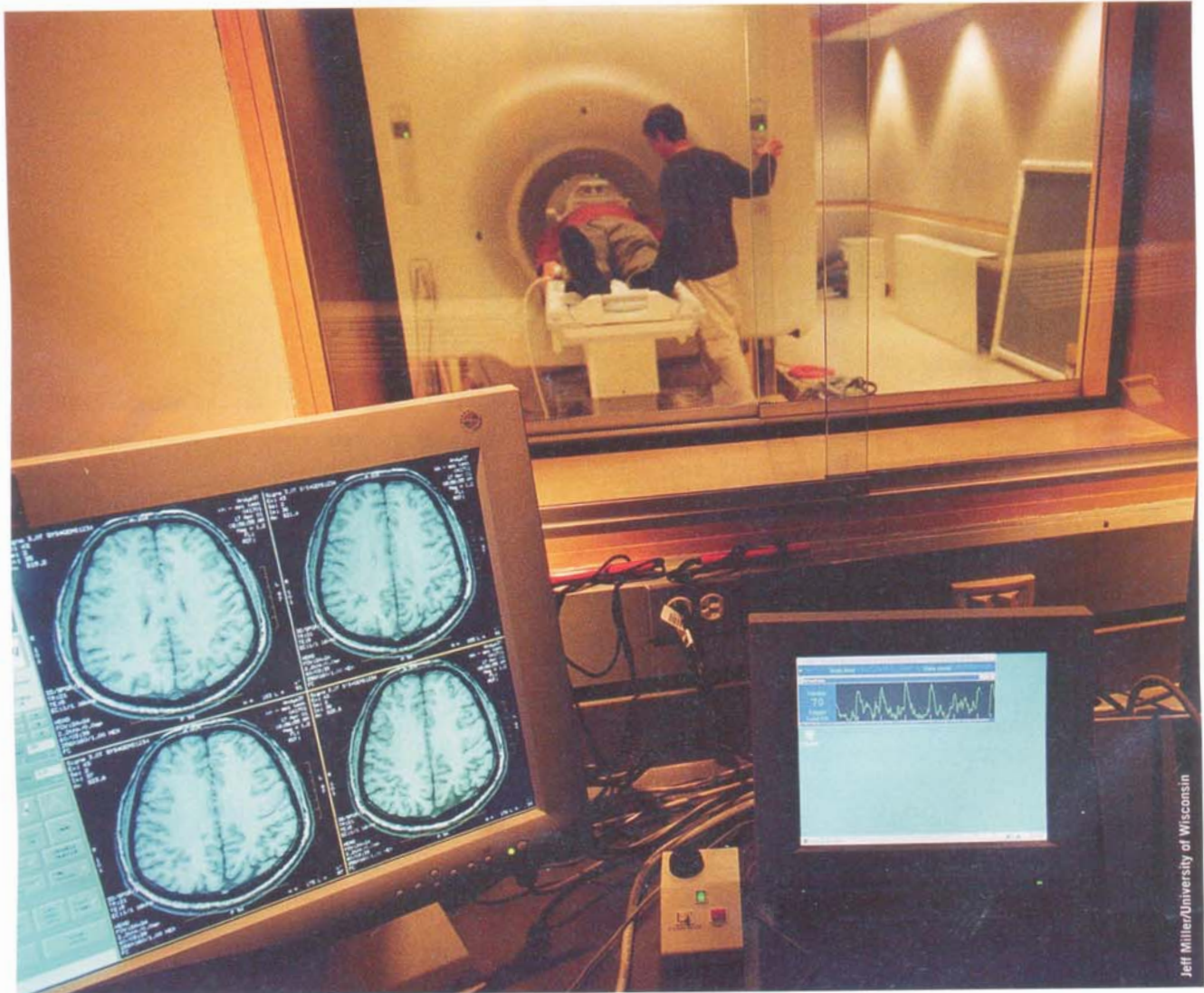
Ook al zijn er nog theoretische vragen, feit is dat supergeleiding werkt. En we zouden er nog veel meer mee kunnen doen dan nu het geval is. Een voor de hand liggende toepassing is stroomtransport over lange afstand. Stroomverliezen zouden met supergeleiding gereduceerd kunnen worden tot

► Deze Japanse Maglevtrein heeft het snelheidsrecord voor treinen in handen. In 2003 haalde hij op de testbaan bij de stad Yamanashi 581 kilometer per uur.

► Een proefpersoon wordt in een MRI-scanner geleid. De MRI-techniek laat niet alleen de structuur van (in dit geval) het brein zien, maar kan ook hersenactiviteit meten.



Hashimoto, Nebraska/Syama/Corbis



Jeff Miller/University of Wisconsin

Een eeuw supergeleiding



1911

De Nederlander Heike Kamerlingh Onnes ontdekt in zijn Leidse laboratorium dat de weerstand van een staafje kwik bij een temperatuur van 4,2 kelvin (-269 graden Celsius) of lager onmeetbaar klein wordt. Een verrassing voor veel wetenschappers, want tot dan toe werd gedacht dat de weerstand juist heel groot zou worden bij extreem lage temperaturen.



1911-1930

Allerlei elementen worden aan het lijstje van klassieke supergeleiders toegevoegd. Met als hoogtepunt het metaal niobium dat supergeleidend blijkt te zijn tot 9,3 kelvin (-263 graden Celsius).

1930-1950

Bepaalde legeringen, veelal met niobium, blijken al rond de 10 kelvin geen weerstand meer te hebben. Met kleine stapjes kruipt het resultaat omhoog naar 15 kelvin.



1957

John Bardeen, Leon Neil Cooper en John Robert Schrieffer stellen een theorie op die supergeleiding in alle tot dan toe bekende gevallen kan verklaren.

1957-1970

Gestaag wordt het lijstje supergeleiders langer. De overgangstemperaturen van de heetste geleiders loopt op tot 20 kelvin (-253 graden Celsius).



1972

Bardeen, Cooper en Schrieffer krijgen de Nobelprijs voor de natuurkunde voor hun theorie uit 1957.



1986

De supergeleidende wereld schudt op zijn grondvesten. Johannes Bednorz en Karl Müller ontdekken een (keramisch!) materiaal dat bestaat uit barium-, lanthanum-, koper- en zuurstofatomen, dat supergeleidend is tot een temperatuur van maar liefst 35 kelvin (-238 graden Celsius).



1987

Ruim een jaar na hun ontdekking ontvangen Bednorz en Müller de Nobelprijs voor de natuurkunde.

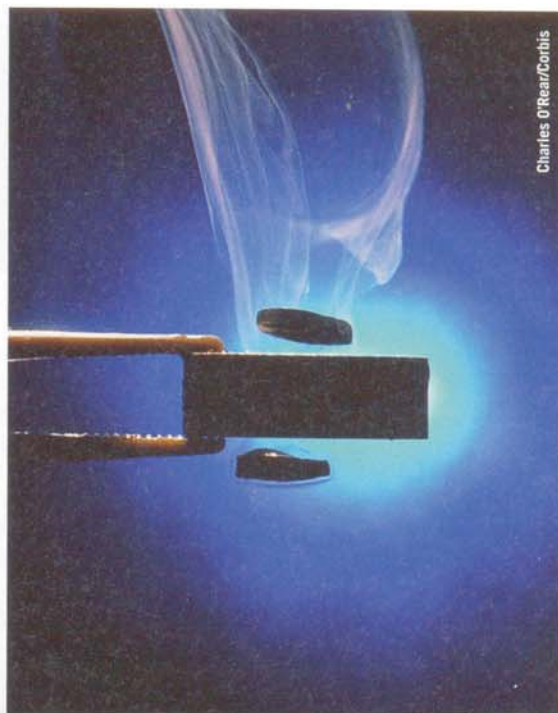
1990

Wetenschappers ontdekken de nieuwe supergeleider $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_9$, met een overgangstemperatuur van 138 kelvin (-135 graden Celsius). Dat is tot op de dag van vandaag het record. Onder druk vertoont het materiaal het zelfs al supergeleiding bij 160 kelvin (-113 graden Celsius).



2009

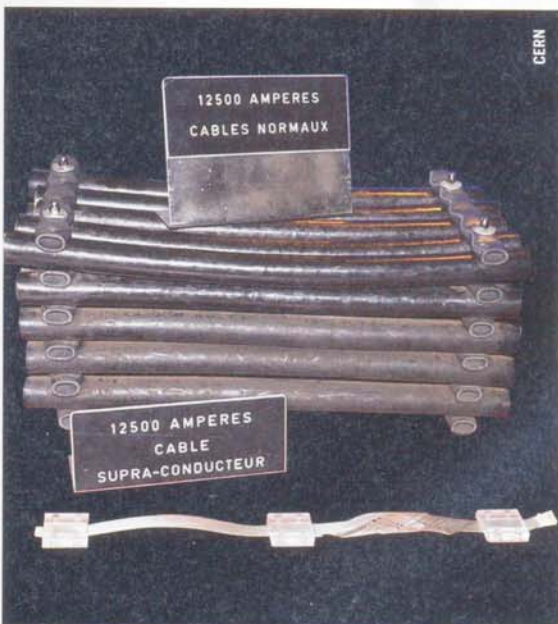
De LHC-deeltjesversneller (Large Hadron Collider) wordt in gebruik genomen. Dit wetenschappelijke megaproject in de buurt van Genève bevat meer dan negenduizend supergeleidende magneten om de deeltjes in de juiste baan te houden.



Charles O'Rear/Corbis



SSRF



CERN

▶ Deze inktijk in de Large Helical Device (LHD) laat de supergeleidende spoelen zien die een superheet plasma in bedwang moeten houden. Met de LHD doet men kernfusie-experimenten.



◀ Door het zogenoemde Meisner-effect blijft een magneetje boven een supergeleider zweven. Dit is een manier om te testen of een materiaal supergeleidend is.

bijna nul. Alleen zitten daar praktisch nog wel wat haken en ogen aan. “Supergeleidende kabels zouden continu moeten worden gekoeld met bijvoorbeeld vloeibaar stikstof”, zegt Stef Wiegers. “Dat maakt zo’n infrastructuur onbetaalbaar.” Ook bij het materiaal zijn bedenkingen: “De zogenoemde hogetemperatuur-supergeleiders zijn gemaakt van heel broze materialen. Het is heel moeilijk daar kabels van te maken en in de grond te stoppen zonder dat ze daarbij breken.” Desondanks wordt supergeleiding op sommige

Kamertemperatuur

Hoe gaat het verder? Wat de wereld van supergeleiding een flinke boost zou geven, is de ontdekking van materialen die al bij kamertemperatuur supergeleidend zijn. Er zijn dan geen gigantische koelinstallaties meer nodig om de materialen überhaupt supergeleidend te maken. In het ideale geval zouden de nieuw te ontdekken materialen ook minder breekbaar moeten zijn dan de materialen die nu bij relatief hoge temperaturen supergeleiden.

“Wij krijgen weleens materiaalmonsters opgestuurd, samen met de claim dat er eindelijk supergeleiding bij kamertemperatuur mogelijk is”, vertelt Brinkman. “Helaas moeten we de ‘ontdekkers’ in kwestie eigenlijk altijd teleurstellen.”

Het onderzoek naar supergeleidende materialen gaat intussen gestaag door, ook in Nederland. Wiegers: “ITER, de experimentele kernfusiereactor die in Frankrijk wordt gebouwd, is momenteel een belangrijke drijfveer voor onderzoek naar toegepaste supergeleiding. Voor die installatie zoeken ze namelijk supergeleiders die een hoge stroomdichtheid kunnen verdragen. Maar wanneer de eerste supergeleider op kamertemperatuur er is? Als ik dat toch eens kon voorspellen... Hij komt eraan, maar of het volgend jaar of over vijftig jaar wordt, dat is de grote vraag.”

◀ De Shanghai Synchrotron Radiation Facility opende afgelopen jaar zijn deuren. In een cirkel van 432 meter worden elektronen tot bijna de lichtsnelheid versneld om röntgenstraling te produceren.

Er wordt hard gezocht naar supergeleiders op kamertemperatuur

plekken al gebruikt in het stroomnet. In verschillende Amerikaanse en Japanse steden zijn supergeleidende kabels verwerkt in de installaties van elektriciteitscentrales. En je hebt de zogenoemde SMES-systemen (Superconducting Magnetic Energy Storage). “Dat is een supergeleidende spoel waar razendsnel stroom in en uit kan worden ‘gepompt’”, legt Brinkman uit. “Die spoelen worden gebruikt als overloopvat van het elektriciteitsnet. Dat werkt veel beter dan – trage – batterijen of accu’s. Wanneer een centrale uitvalt, kunnen SMES-systemen voorkomen dat er een lawine-effect optreedt en grote delen van het land of zelfs gebieden daarbuiten zonder stroom komen te zitten.” Ook in de computerwereld is een interessante rol weggelegd voor supergeleiding. In conventionele computers zou het kunnen worden gebruikt om de warmteontwikkeling te beperken. Neem je de weerstand in computercircuits weg, door ze van een supergeleidend materiaal te maken, dan ben je af van die warmte. Daarmee is de weg vrij voor veel verder opgevoerde chips.

◀ Deze foto laat goed zien wat de voordelen van supergeleiding in het stroomnet kunnen zijn. Het supergeleidende draadje (onder) kan dezelfde stroomsterkte verdragen als de dikke conventionele kabel (boven).

Roel van der Heijden sprak met Stef Wiegers (Radboud Universiteit Nijmegen) en Alexander Brinkman (Universiteit Twente) en gebruikte de volgende literatuur:

- > John Jewett en Raymond Serway: **Physics** Cengage Learning (2008)
- > Carl Koppeschaar: **Supergeleiding. Wachten op de volgende doorbraak** KIJK (januari 1988)

Ga voor de geraadpleegde sites naar www.kijk.nl/links