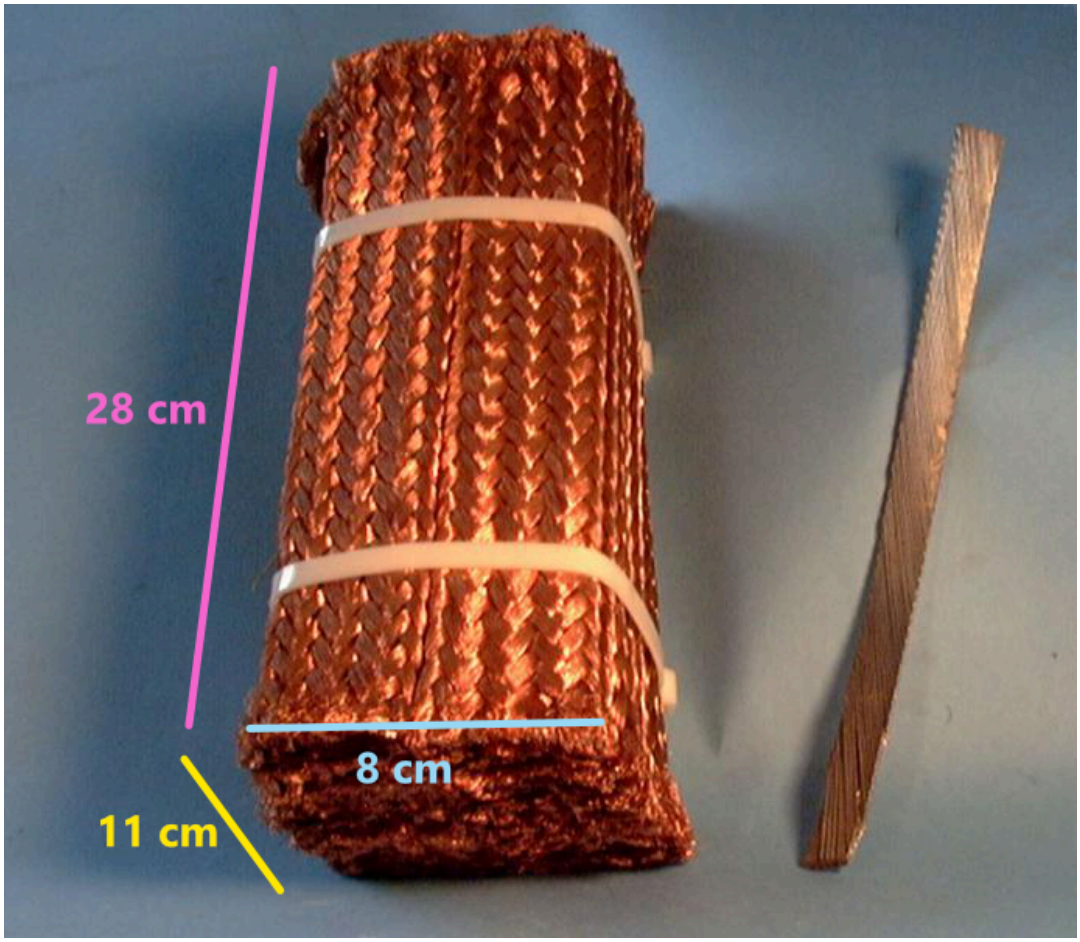
Weerstandsloze geleiding met ondeeltjes

Enkele weken geleden bespraken we het mogelijke bestaan van 'ondeeltjes': fundamentele bouwstenen van ons universum die niet beschreven worden door het standaardmodel van de deeltjesfysica. Deze niet-standaard bouwstenen zouden niet-standaard fenomenen kunnen verklaren. Hier duiken we in zo'n fenomeen: supergeleiding bij veel hogere temperaturen dan volgens gevestigde theorieën is toegestaan.



Afbeelding 1. Een vergelijking tussen koperdraad en een supergeleidende draadDe koperdraad (links) kan bij

kamertemperatuur 12.500 Ampère geleiden. De rechter draad, gemaakt van gewonden niobium-titanium, wordt bij 1,9 Kelvin supergeleidend, en kan dan evenveel stroom dragen als de linker draad. Foto: CERN.

Van geleiding naar supergeleiding

Elektrische geleiding, het (makkelijk) voortbewegen van elektronen door een materiaal, is iets wat we gebruiken in al onze elektrisch apparatuur. Bij normale geleiding gaat echter veel vermogen verloren door *weerstand*. Dit kun je zelf voelen aan apparaten die warm worden tijdens gebruik: alle energie die is omgezet in warmte is energie die we niet kunnen gebruiken als stroom.

Aan het begin van de vorige eeuw ontdekte Heike Kamerlingh Onnes in zijn Leidse laboratorium echter iets wonderlijks: sommige metalen kunnen stroom geleiden zonder weerstand! Het fenomeen van geleiding zonder weerstand noemen we *supergeleiding*, en heeft fantastische implicaties. Zo zouden we met supergeleidende leidingen minder vermogen verliezen, terwijl we per leiding minder materiaal nodig hebben (zie afbeelding 1). En dan hebben we nog niets gezegd over de interessante eigenschappen van supergeleiders in een magnetisch veld! In de video hieronder demonstreert professor Mark Goldenhoe supergeleidende treinen op magnetische treinrails wellicht de toekomst van transport zouden kunnen zijn.

Video 1. Demonstratie van een supergeleidende zweeftreinBron: Universiteit van Nederland

Supergeleiding is zo'n belangrijk fenomeen, dat Kamerlingh Onnes meerdere prijzen ontving, waaronder de Nobelprijs voor de Natuurkunde in 1913. Daarna zijn er in de afgelopen eeuw bovendien nog vier andere Nobelprijzen uitgereikt voor onderzoek naar supergeleiding!

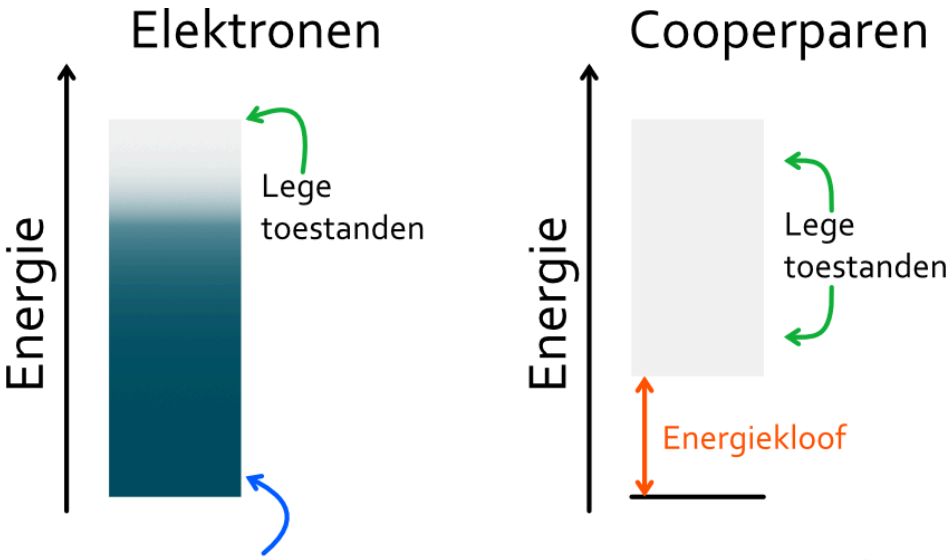
Supercool maar helaas ijskoud

Een belangrijke kanttekening bij het bovenstaande: de supergeleiding die Kamerlingh Onnes in 1911 ontdekte werkt alleen bij extreem lage temperaturen. Extreem laag betekent hier maar enkele graden boven het absolute nulpunt (nul Kelvin, gelijk aan -273,15 ˚C). De zoektocht naar supergeleiding bij kamertemperatuur is al een eeuw gaande, maar is helaas nog niet succesvol geweest.

Om te begrijpen waarom supergeleiding alleen bij zulke lage temperaturen voorkomt, moeten we ons verdiepen in hoe het verschijnsel werkt. De werking van “standaard”-supergeleiding werd beschreven door John Bardeen, Leon Cooper en Robert Schrieffer, in wat de BCS-theorie wordt genoemd – iets waar ze in 1972 de Nobelprijs voor kregen.

Centraal in deze theorie staat dat de elektronen in supergeleiders gebonden paren vormen, die we *Cooperparen* noemen. Zulke paren van elektronen gedragen zich anders dan losse elektronen. Zo houden ze zich niet aan het uitsluitingsprincipe van Pauli, wat betekent dat ze allemaal in dezelfde toestand met de laagst mogelijke energie kunnen zijn. Deze toestand is in energie gescheiden van andere energieniveaus door wat een ‘energiekloof’ heet.

Om een Cooperpaar te verstoren, dat wil zeggen: om voor weerstand te zorgen, is meer energie nodig dan de grootte van de energiekloof. Normale verstrooiingsprocessen, die tot weerstand leiden in een metaal, hebben niet genoeg energie om de kloof te overbruggen. Waar enkele geleidingselektronen gemakkelijk verstoord worden door in nabijgelegen lege energietoestanden geduwd te worden, kunnen Cooperparen zich dan ook ongestoord voortbewegen.



Twee elektronen kunnen nooit in dezelfde energietoestand zitten, dus wordt het energiespectrum gevuld van lage tot hoge energie.

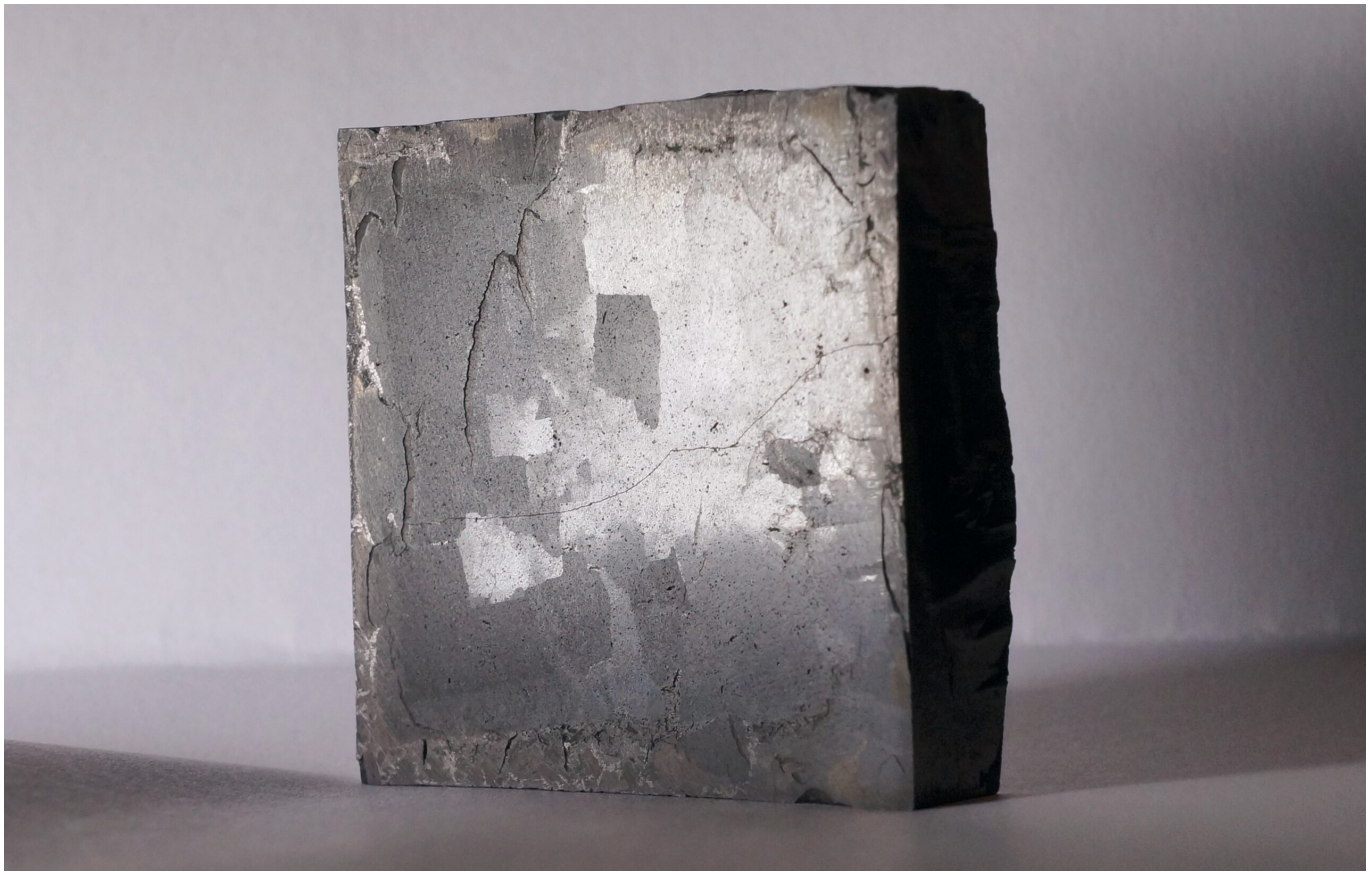
Cooperparen mogen wél allemaal in dezelfde energietoestand zitten. Zo zitten ze allemaal in het laagste energieniveau, wat gescheiden is van de rest door een energiekloof.

Afbeelding 2. Energiespectra van elektronen en CooperparenOmdat er een energiekloof zit tussen de energietoestand waarin alle Cooperparen zich bevinden en toestanden met hogere energie, worden Cooperparen niet verstrooid door verstoringen met lage energie. De energiespectra zien er anders uit omdat elektronen *fermionen* zijn, maar Cooperparen zich gedragen als *bosonen*. Afbeelding: Jans Henke

Het weerstandsloos bewegen van Cooperparen werkt echter alleen bij temperaturen waarbij er minder warmte-energie is dan de grootte van de bandkloof. Als E de grootte van de energiekloof is, in eenheden van energie, willen wem in een formule uitgedrukt, dat $E > kT$. De k in deze uitdrukking is de Boltzmannconstante, en T is de temperatuur in Kelvin. Voor standaard-Cooperparen is E rond de 0,001 eV; omdat k ongeveer gelijk is aan 0,0001 eV/K, werkt het hierboven beschreven mechanisme dus alleen bij een temperatuur van ten hoogste zo'n 10 K. Bij hogere temperaturen is er genoeg energie om Cooperparen te verstrooien en weer op te breken in twee losse elektronen.

Onbegrijpelijke supergeleiders

Toch zijn er supergeleiders die niet werken volgens de BCS-theorie. Hieronder vallen bijvoorbeeld de *cupraten*, een groep keramische materialen die supergeleiden tot en met 150 K (rond -120 ˚C). Dat is nog geen kamertemperatuur, maar wel tien keer zo hoog als wat je zou verwachten van een BCS-supergeleider. De ontdekking van deze materialen was overigens ook Nobelprijswaardig (1987).

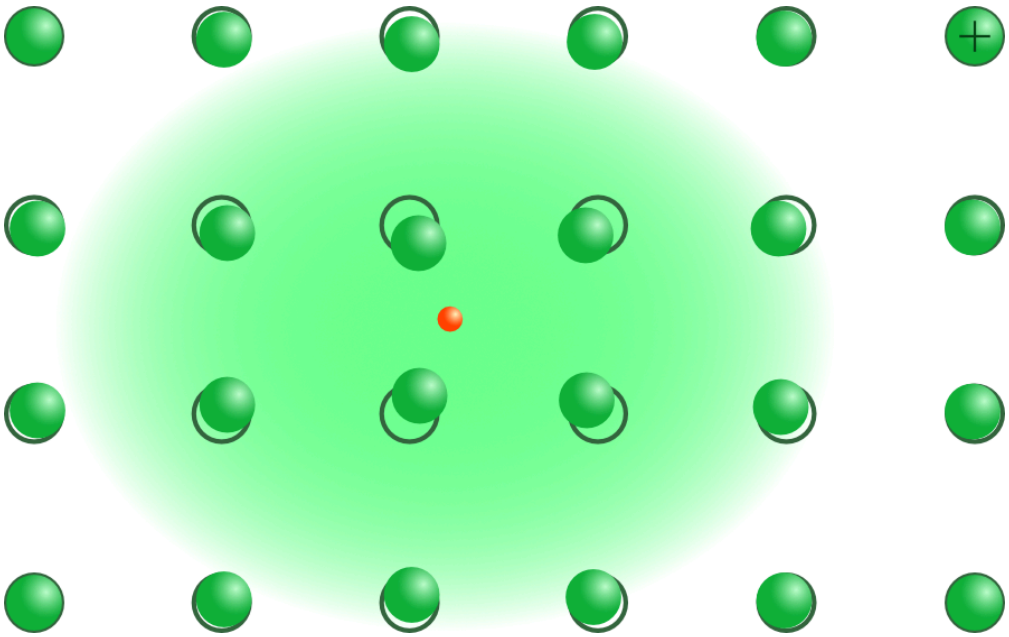


Afbeelding 3. De hogetemperatuursupergeleider YBCODe cupraat YBCO is supergeleidend tot bij 92 Kelvin. Afbeelding: Maxim Bilovitskiy.

Hoe de supergeleiding in cupraten precies werkt weten we – meer dan dertig jaar na hun ontdekking! – nog steeds niet. Wel is het duidelijk dat hier een compleet ander mechanisme een rol moet spelen. Dit is waar ondeeltjes mogelijk een rol spelen.

Ondeeltjes-lijm

Elektronen stoten elkaar onderling af, omdat ze negatief geladen zijn. Wat Cooperparen bijeenhoudt in de BCS-theorie zijn bewegingen van het atoomrooster van het metaal, bewegingen die we *fononen* noemen. Hoe dit proces werkt kun je als volgt begrijpen. Elektronen in een goed geleidend metaal kunnen zich met redelijk gemak losmaken van hun atomen en rondbewegen, waarbij ze positief geladen ionen achterlaten. Wanneer een elektron in een metaal voortbeweegt, trekt het alle nabijgelegen ionen van het materiaal een heel klein beetje naar zich toe. Hiermee creëert het elektron een regio die iets meer positief geladen is dan de rest van het metaal, wat genoeg is om een ander elektron aan te trekken en zo een Cooperpaar te vormen.



Afbeelding 4. Een elektron trekt positief geladen ionen in een metaal naar zich toe. Zo creëert een elektron een gebiedje dat meer positief geladen is dan de rest van het metaal. Hiermee kan een ander elektron worden aangetrokken, wat samen met het eerste elektron een Cooperpaar vormt. Afbeelding: Jans Henke.

Fononen vormen echter maar een hele zwakke ‘lijm’ om elektronen samen te binden. Omdat de aantrekkingskracht zo klein is, is ook de grootte van de hierboven genoemde energiekloof klein, waardoor Cooperparen alleen bij heel lage temperaturen stabiel zijn. Hogetemperatuursupergeleiders zoals de cupraten moeten dus wel een ander mechanisme gebruiken om elektronen samen te binden.

De onderzoekers James LeBlanc en Adolfo Grushin bedachten onlangs dat ondeeltjes die rol mogelijk zouden kunnen vervullen [1]. Hun idee werkt als volgt: stel dat er ondeeltjes in ons universum bestaan die zich enigszins gedragen als fotonen. Fotonen (let op: iets anders dan fo*n*onen!) zijn deeltjes van licht, die in het standaardmodel van de deeltjesfysica verantwoordelijk zijn voor het overbrengen van de elektromagnetische kracht. Die kracht is verantwoordelijk voor de onderlinge afstoting tussen elektronen, de zogeheten *Coulomb-interactie*.

Dergelijke foton-achtige ondeeltjes zijn zelf geen fotonen, omdat ze een (schaalbare) massa hebben, maar ze zouden wel een foton-achtige kracht kunnen uitoefenen op de elektronen. De wiskunde die ondeeltjes beschrijft staat toe dat deze kracht twee negatief geladen elektronen samenbindt. In plaats van fo*n*onen die in het materiaal Cooperparen

samenbinden, zou deze Coulomb-achtige interactie met ondeeltjes dus hetzelfde kunnen doen.

Ondeeltjes in plaats van elektronen?

Een andere groep natuurkundigen [2] bedacht dat cupraten misschien juist supergeleiden omdat (een deel van) de geleidingselektronen zich als ondeeltjes gedragen. Hierbij is relevant dat ondeeltjes *schaalinvariant* zijn, zoals uitgelegd in ons eerdere artikel. In BCS-theorie is de relevante energieschaal voor supergeleiding de grootte van de energiekloof (afbeelding 2). Ondeeltjes zouden hun schaalinvariante gedrag kunnen gebruiken om Cooperparen te vormen die stabiel zijn tot veel hogere temperaturen.

Het enige jammere – maar natuurlijk ook interessante – aan deze beschrijving is dat ondeeltjes het niet toestaan om de gebruikelijke wiskunde te gebruiken om hun gedrag te beschrijven. In tegenstelling tot BCS-theorie, die is uitgedrukt in termen van wisselwerkingen tussen elektronen en fononen – twee soorten *(quasi)deeltjes* – kunnen ondeeltjes alleen beschreven worden in termen van meer abstracte quantumvelden. Sterker nog: om de fysica van ondeeltjes te beschrijven, moet je beginnen met een wiskundige beschrijving met een extra dimensie, alsof er vier ruimte-dimensies zijn in plaats van drie!

Zo sluipt er een beetje *holografie* de wereld van supergeleiders in. Met wiskunde die wordt ‘geleend’ uit andere hoeken van de natuurkunde, zoals snaartheorie, is de hoop dat we eindelijk de decennia-oude puzzel van hogetemperatuursupergeleiding zullen kunnen oplossen. Zover zijn we nog niet, maar als het lukt, zijn we weer een stap dichterbij het ontwerpen van de eerste supergeleider die echt bij kamertemperatuur werkt. Ook dat zal zeker een Nobelprijs waard zijn!

[1] J.P.F. LeBlanc, en A.G. Grushin. Unparticle mediated superconductivity. *New Journal of Physics* **17**, 033039 (2015)

[2] P.W. Phillips, B.W. Langley en J.A. Hutasoit. Un-Fermi liquids: Unparticles in strongly correlated electron matter. *Physical Review B* **88**, 115129 (2013)