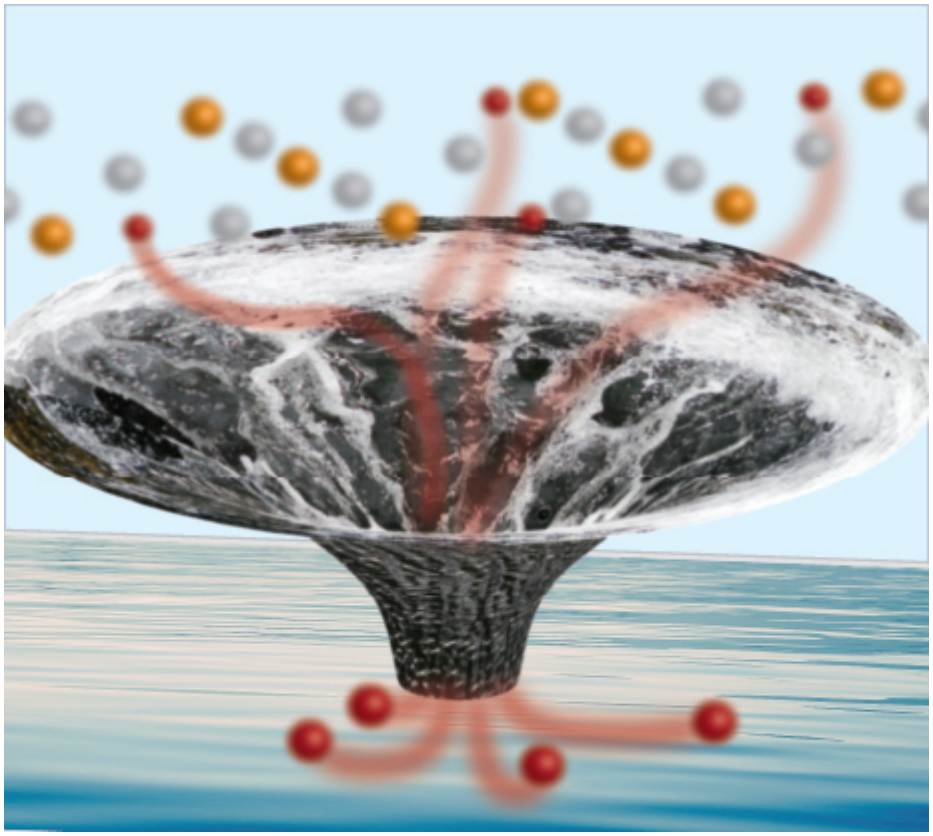
Quantumzwaartekracht en vreemde metalen

Wat hebben een quantumtheorie van de zwaartekracht en elektronen in een ‘vreemd’ metaal met elkaar te maken? Op het eerste gezicht niet zoveel, maar deze week rapporteert een Nederlands onderzoeksconsortium hun nieuwe experimentele bevindingen waaruit mogelijk toch een link blijkt.



Afbeelding 1. Metaal of ruimtetijd? Artist’s impression: de beschrijving van elektronen in vreemde metalen (de ronde deeltjes) maakt gebruik van precies dezelfde wiskunde als de beschrijving van de ruimtetijd in de snaartheorie (het gekromde oppervlak).

Supergeleiding is een fascinerend verschijnsel waarbij een materiaal beneden een zogenaamde kritieke temperatuur alle weerstand voor stroom verliest. In bepaalde

materialen zijn elektronen bij lage temperaturen met elkaar verstrengeld in een enkele, grootschalige quantumtoestand, en gedragen zich dus niet meer als individuele deeltjes maar als collectief – met supergeleiding tot gevolg. De algemene theorie voor zulk collectief gedrag van elektronen is al lang bekend, maar één familie van materialen, de *cupraten*, lijkt zich niet naar het paradigma te willen schikken. Lang werd gedacht dat voor deze materialen het mechanisme dat de elektronen 'samenlijmt' bijzonder moet zijn, maar recent is de aandacht juist verschoven en onderzoeken natuurkundigen de *niet*-supergeleidende toestand van cupraten, in de hoop zo te ontdekken wat de verschillen met gewone supergeleiders zijn.

Vreemde metalen

Voor vrijwel alle supergeleiders is het zo dat ze, als ze tot boven hun kritieke temperatuur worden opgewarmd, veranderen in een 'gewoon' metaal. De quantumverstrengeling die het collectieve gedrag van de elektronen veroorzaakt vervaagt, en de elektronen gaan zich gedragen als een gewoon 'gas' van geladen deeltjes.

Cupraten zijn allereerst bijzonder omdat hun kritieke temperatuur beduidend hoger is dan die van andere supergeleiders. Daarnaast zijn hun meetbare eigenschappen ook in de 'metaalfase' bijzonder. In 2009 werd door natuurkundige Nigel Hussey experimenteel vastgesteld dat de elektronen in deze materialen een nieuw soort structuur vormen, anders dan in gewone metalen, en de term 'vreemd metaal' werd geboren.

Vrijwel tegelijkertijd kwam in Stanford in de Verenigde Staten een beweging op gang waarbij de theoretische machinerie van de snaartheorie – een theorie voor een heel ander natuurverschijnsel, het gedrag van de *zwaartekracht* op quantumniveau – werd toegepast op de beschrijving van elektronen in metalen. Volledig onverwacht bleek deze machinerie een aantal voorspellingen te kunnen doen voor verschijnselen die bekend waren uit experimenten aan cupraten en andere vreemde metalen. Theoretisch fysici Jan Zaanen en Koenraad Schalm (Universiteit Leiden) waren al vroeg betrokken bij deze ontwikkelingen en hebben er belangrijke bijdragen aan geleverd. Het pionierswerk werd in 2017 omgezet in een door NWO gefinancierd nationaal onderzoeksprogramma: *Strange Metals*. Het programma is een bijzondere samenwerking tussen experimentele en theoretische groepen.

Bijzonder gedrag bij lage temperaturen

Hoe hoger de temperatuur van een materiaal, hoe meer ‘ruis’ metingen zullen vertonen. Om de bijzondere eigenschappen van de vreemd-metaaltoestand goed zichtbaar te maken, zou je een materiaal dus het liefst willen onderzoeken bij een zo laag mogelijke temperatuur, hooguit 1 graad boven het absolute nulpunt van -273°C. Het struikelblok daarbij is de supergeleiding zelf: de meeste vreemde metalen worden al beneden -200°C supergeleiders. Binnen het *Strange Metals*-programma is er om die reden voor gekozen alle pijlen te richten op een materiaal met de scheikundige aanduiding $Bi_2Sr_2CuO_6$, ook wel ‘Bi2201’ genoemd. Dit materiaal wordt pas zo’n 35 graden boven het absolute nulpunt supergeleidend. Dat is nog steeds te warm voor goede metingen, maar vervolgens kunnen de onderzoekers een truc toepassen: supergeleiding kan met een magneetveld onderdrukt worden.

Over het algemeen geldt: hoe hoger de kritieke temperatuur van een materiaal, hoe sterker het magneetveld dat nodig is om supergeleiding te onderdrukken. Doordat in Bi2201 de kritieke temperatuur al betrekkelijk laag is, komt het benodigde magneetveld nét binnen het bereik van de grootste magneten die Nederland rijk is. Promovendi Jake Ayres en Maarten Berben binnen de groepen van Hussey (HFML-FELIX, Bristol) en van Heumen konden hierdoor uiteindelijk de elektrische eigenschappen van de vreemd-metaaltoestand van Bi2201 bestuderen bij verschillende lage temperaturen en verschillende magnetische veldsterktes.

In dit domein worden de verschillen tussen vreemde metalen en gewone metalen goed zichtbaar. Voor gewone metalen wordt bijvoorbeeld verwacht dat de elektrische weerstand van een materiaal kwadratisch toeneemt met de temperatuur: bij een twee keer zo hoge temperatuur wordt de weerstand maar liefst vier keer zo groot. Hetzelfde geldt als niet de temperatuur maar de magnetische veldsterkte wordt opgeschroefd. Het Nederlandse/VK-team heeft nu aangetoond dat deze gouden regels voor cupraten niet gelden. In die materialen bestaat een nieuwe fase waar de weerstand *lineair* van temperatuur en veldsterkte afhangt: als die twee keer zo groot worden, neemt de weerstand slechts met een factor twee toe. In tegenstelling tot eerdere resultaten ontdekte de groep dat dit gedrag voor een groot bereik van de parameters geldt.

Vooralsnog bestaan er twee breed gedragen theorieën die het bijzondere lineaire gedrag van de weerstand kunnen verklaren. De eerste theorie gaat ervan uit dat het lineaire gedrag

alleen in de buurt van heel specifieke waarden voor temperatuur en magneetveld voorkomt. Die theorie is met de nieuwe metingen zwaar onder druk komen te staan. De tweede theorie is die van extreme quantumverstrengeling die beschreven wordt met de snaartheoretische benadering. Binnen die theorie is het wél mogelijk om over een groot gebied van parameters het lineaire gedrag waar te nemen. Verrassend genoeg lijkt om vreemde metalen te beschrijven dus daadwerkelijk een theorie nodig waarmee je ook quantumzwaartekracht kunt beschrijven!

Quantumzwaartekracht in het lab

De link tussen vreemde metalen en quantumzwaartekracht heeft bijzondere waarneembare gevolgen. Met een uitgebreide analyse laat het team zien dat het binnen de conventionele modellen voor elektrisch transport absoluut onmogelijk is om de data goed te verklaren. Hun analyse wijst erop dat er een niet eerder waargenomen mechanisme is waardoor elektronen energie verliezen. Dit verlies vindt plaats op een extreem korte tijdschaal die gerelateerd is aan een fundamentele natuurconstante uit de quantummechanica, de constante van Planck. Volgens de theorie is dat de kortst mogelijke tijd waarbinnen een quantumsysteem energie kan verliezen – iets wat bovendien alleen mogelijk is als het systeem maximaal is verstrengeld. Deze vingerafdruk van quantumzwaartekracht-gedrag in de data doet het hart van veel aanhangers van de link met de snaartheorie harder kloppen: het zou een eerste aanwijzing zijn van natuurkunde ver buiten het gebruikelijke model van metalen.

Om de spanning tussen ‘normaal’ en ‘vreemd’ gedrag van metalen verder uit te pluizen zijn verdere experimenten nodig. Wat dat betreft ligt er binnen het *Strange Metals*-programma nog het nodige in het verschiet. Van Heumen verwacht, met behulp van een techniek die ‘optische spectroscopie’ heet, op korte termijn verder nieuws te kunnen brengen, en ook de groepen van Mark Golden (Amsterdam) en Milan Allan (Leiden) werken aan resultaten die nog de nodige nieuwe verrassingen kunnen opleveren rond de mysterieuze relatie tussen quantumzwaartekracht en vreemde metalen.

Publicatie

Incoherent transport across the strange metal regime of overdoped cuprates, J. Ayres, M. Berben, M. Čulo, Y.-T. Hsu, E. van Heumen, Y. Huang, J. Zaanen, T. Kondo, T. Takeuchi, J. R. Cooper, C. Putzke, S. Friedemann, A. Carrington en N. E. Hussey. Nature 595 (2021) 661-666.

In de zomerperiode publiceert de QU-site elke vrijdag een artikel. In september gaan we weer terug naar het schema van twee artikelen per week: elke dinsdag en elke vrijdag.