

# Honderd biljoen deeltjes, niet één meer of minder!

**In een supergeleider kunnen twee soorten geladen deeltjes voorkomen: Cooperparen en quasideeltjes. Quasideeltjes zouden volgens de theorie van supergeleiding, ontwikkeld door Bardeen, Cooper en Schrieffer, bij lage temperaturen niet meer aanwezig moeten zijn. Opvallend genoeg meten wij zeer veel van deze quasideeltjes, zelfs bij een extreem lage temperatuur! We hebben een opstelling gemaakt met een supergeleidend eilandje ter grootte van enkele honderden nanometers, om te onderzoeken wat de oorzaak is van de grote hoeveelheid quasideeltjes bij lage temperaturen. Deze oorzaak hebben we gevonden en vervolgens weggenomen zodat we voor het eerst, in deze klasse supergeleiders, metingen konden doen die alleen Cooperparen betreffen. Dit is een belangrijke stap op weg naar een quantumcomputer die werkt op basis van Majoranadeeltjes.** David J. van Woerkom

72

**S**upergeleiding is een van de meest fascinerende effecten in de natuurkunde. De Groninger Heike Kamerlingh Onnes ontdekte het in Leiden en kreeg er in 1913 de Nobelprijs voor de Natuurkunde voor [1]. Supergeleiding is een weerstandsloze stroom van geladen deeltjes door materie. Essentieel voor het ontstaan van supergeleiding zijn de zogenaamde Cooperparen, een com-

binatie van twee elektronen die zich samen gedragen als één deeltje. Als een Cooperpaar 'breekt', ontstaan er zogenaamde quasideeltjes.

Supergeleiding treedt op in materialen waarin zich Cooperparen vormen beneden een kritische temperatuur ( $T_C$ ) en in afwezigheid van een groot (extern) magneetveld. Deze Cooperparen hebben allemaal dezelfde energie en kunnen ook geen ander energieniveau aannemen. Een Cooperpaar kan dus geen energie krijgen of verliezen en kan zich zodoende zonder energieverlies door materie voortbewegen. De theoretische verklaring van supergeleiding werd opgesteld door Bardeen, Cooper en Schrieffer in 1957. Hun publicatie is gratis te downloaden, zie [2].

We gebruiken de supergeleiders aluminium (Al,  $T_C \sim 1,2$  K) en niobiumtitaannitride (NbTiN,  $T_C \sim 13$  K). Als de hele aarde van aluminium zou zijn met een temperatuur van 10 mK, dan zou volgens de theorie het verwachte aan-

tal quasideeltjes minder moeten zijn dan één [2]. In onze supergeleidende opstelling zit slechts een fractie van een kubieke micrometer aan supergeleidend materiaal en toch meten we in dit eilandje soms wel iedere milliseconde de aanwezigheid van zo'n quasideeltje. Dat zijn er dus heel erg veel!

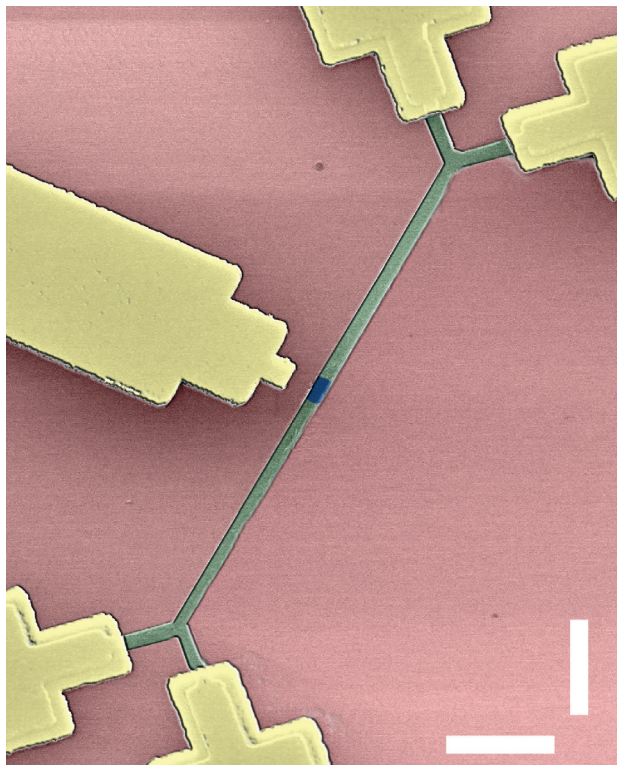
## De opstelling

De supergeleidende opstelling bevat een eilandje van niobiumtitaannitride. Dit eilandje is ongeveer 250 bij 500 nm groot en wordt gemaakt door moderne nanofabricage. In figuur 1 is de opstelling, met het eilandje blauw gekleurd, te zien in een foto gemaakt met een elektronenmicroscop. Dit eilandje is geïsoleerd van twee aluminium supergeleidende contacten met behulp van een dunne (1-2 nm) isolerende laag van geoxideerd aluminium. We weten dat het eilandje daadwerkelijk geïsoleerd is van de contacten en de omgeving omdat we een ladingse energie moeten leveren als we een enkel elektron aan het eiland wil-

David van Woerkom is promovendus aan de TU Delft en doet zijn onderzoek bij QuTech. David is voorheen student geweest aan de TH Rijswijk en heeft daar de bachelor technische natuurkunde gehaald in 2009. In 2012 heeft David een master toegepaste natuurkunde gedaan aan de TU Delft. Hij studeerde af bij Leo Kouwenhoven, die hem een promotieplek aanbood.



d.j.vanwoerkom@tudelft.nl



**Figuur 1** Een ingekleurde elektronenmicroscopiefoto van de supergeleidende opstelling. Het donkerblauwe is het NbTiN, het groene is het aluminium en het gele is het goud. De witte lijnen geven 2 micrometer aan.



**Figuur 2** De buitenste kan van de meetopstelling die uiteindelijk in de kern 10 mK wordt. Links en midden achter is een grijs en zwart meetrek zichtbaar met apparatuur waarmee stroompjes tot wel 50 femtoampère worden gemeten.

len toevoegen. Dit laatste kunnen we meten door het creëren van een sterk magneetveld waardoor het supergeleidende aluminium weer normaal geleidend (niet-supergeleidend) wordt, vrij van Cooperparen.

Wanneer er wel supergeleiding is, kunnen Cooperparen door de isolatie heen. Dit is een vreemd quantummechanisch effect, genaamd ‘tunnelen’. Ook al kunnen de Cooperparen zich nooit echt in de isolerende laag zelf bevinden, omdat deze niet geleidend is, toch komen ze aan de andere kant. De aangelegde stroom gaat door het hele eiland, van het ene aluminium contact naar het andere, zonder dat er een elektrische spanning aanwezig is. Het is een echte superstroom.

Door een goede keuze van de grootte van de ladingsenergie, de materialen en de dikte van de isolerende laag, hebben we het voor elkaar gekregen dat we een verschillende maximale superstroom meten wanneer we op het eiland een even of oneven aantal elementaire ladingen hebben [3]. Hierdoor maken we het eiland dus gevoelig voor de quasideeltjes. Als er bijvoorbeeld één miljard Cooperparen en één quasideeltje (oneven situatie) op het eiland zijn, dan meten we een andere maximale superstroom dan

zonder quasideeltjes (even situatie). Er kan geen onderscheid worden gemaakt tussen geen of een even aantal quasideeltjes. Maar de aanwezigheid van een oneven aantal quasideeltjes zorgt altijd voor een verschil en dat kunnen we meten.

### Quasideeltjes meten

Onze werkwijze is als volgt. We voeren de (super)stroom op, totdat we bij een waarde komen die hoort bij de hoge maximale superstroom. Zolang de elektrische spanning over het eilandje nul is, weten we dat we alleen stroom hebben via de Cooperparen. Als er een quasideeltje naar het eilandje tunnelt (of ervan af tunnelt) zodat er een oneven aantal ontstaat, is er een elektrische spanning te meten. Wat blijkt nu: elke seconde zien we wel 100 tot 1000 van deze quasideeltjes het eiland op of af springen. De overeenkomstige dichtheid van de quasideeltjes correspondeert met een effectieve gemiddelde temperatuur van 120 mK. En dat terwijl de temperatuur slechts 10 mK zou moeten zijn! Het aantal quasideeltjes is dus veel te groot.

De oorsprong van de quasideeltjes is al tientallen jaren bekend: (warmte-) straling [4]. Elk voorwerp dat een eindige temperatuur heeft, alles dus,

zendt straling uit. Hoe hoger de temperatuur, hoe hoger de gemiddelde energie van de warmtestraling. De straling kan gemakkelijk enkele duizendsten van een elektronvolt energie hebben en dit is genoeg om de koude Cooperparen te ‘breken’ zodat je daarna met quasideeltjes zit opgescheept. Om deze warmtestraling tegen te gaan, hebben wij meerdere temperatuurstappen in onze koelkast. Wij koelen namelijk niet onze supergeleidende opstelling af in een ruimte op kamertemperatuur maar in een ruimte die 10 mK is. Deze ruimte sluiten we af door een koperen kan om onze sample te schroeven. Deze kleine 10 mK-kan zit in een grotere kan die 50 mK is en die zit in een kan die 700 mK is en die zit in een kan van 3,8 K en die zit in een kan van 50 K en die zit in een kan die de temperatuur van de kamer heeft. De buitenste kan is te zien in figuur 2 samen met enkele andere externe onderdelen van de koelkast. Al deze temperatuurstappen zijn nodig om te zorgen dat de kanen niet opwarmen door de warmtestraling van een te warme omgeving. Maar toch hebben we nog last van de warmtestraling, hoe komt dat? Dit komt omdat de relevante warmtestraling een typische golflengte van 1 mm

## NTvN-Prijsvraag – Uitslag

Het NTvN looft ieder jaar een prijs uit voor promovendi en pas-gepromoveerden die hun onderzoek op een pakkende manier weten op te schrijven. De 21<sup>e</sup> editie van deze prijsvraag is dit jaar gewonnen door David van Woerkom, promovendus bij Leo Kouwenhoven aan de Technische Universiteit Delft. Hij schrijft over de oorsprong van quasideeltjes in supergeleidende materialen en hoe dit uiteindelijk bijdraagt aan een quantumcomputer die werkt op basis van Majoranadeeltjes.

De jury, bestaande uit vier redactieleden van het NTvN, was het er unaniem over eens dat het artikel een goede opbouw heeft en mooi verhalend is. Bovendien is het pakkend en enthousiast opgeschreven, met name ook voor lezers die minder bekend zijn met het onderwerp. De prijs van 1000 euro zal op FYSICA 2015 aan David van Woerkom worden uitgereikt.

Veel leesplezier!

Claud Biemans, Helko van den Brom, Fiona van der Burgt en Wim Verkleij,  
Jury van de NTvN-prijsvraag

of zelfs nog korter heeft. De straling kan eenvoudig door kiertjes gaan of om bochten heen en alsnog de supergeleidende opstelling bereiken.

### Drie belangrijke verbeteringen

Wij hebben drie belangrijke verbeteringen aangebracht ten opzichte van een standaard 10 mK-koelkastopstelling. Als eerste zijn alle kiertjes met dikke koperen tape dicht gemaakt. Ook hebben we veel zwarte verf gebruikt om straling te absorberen in plaats van te reflecteren, hetgeen de kans verkleint dat de straling onze kleine opstelling kan bereiken. Deze speciale verf absorbeert vooral de straling waar wij last van hebben, kan tegen lage temperaturen en verdampt bijna niet. Dit laatste is belangrijk, niet voor het behouden van de aangename frisse geur in ons lab, maar omdat alles in de 10 mK-koelkast in vacuüm is en dan kun je je geen verf veroorloven die langzaam verdampt. Deze speciale verf wordt bijvoorbeeld ook in de Hubble Space Telescoop gebruikt, ook hier om straling te absorberen.

En als laatste hebben we goud gedeponeerd op onze supergeleidende contacten, op vijf micrometer afstand van het eilandje. En we maken een extra elektrode, ook wel een gate genoemd, om het elektrisch veld in de omgeving van het eiland te veranderen. Het goud is geel ingekleurd op de elektronenmicroscopiefoto in figuur 1, de gate is de structuur links midden op de foto. Het deponeren van goud op de contac-

ten hebben we om de volgende reden gedaan. Een quasideeltje in een supergeleider heeft een minimale energie nodig. In goud echter, dat niet supergeleidt, heeft het geen extra energie nodig. Wanneer een quasideeltje nu in de buurt van het goud komt, wordt het als het ware opgeslokt en kan het niet meer naar de supergeleidende opstelling komen. Het kan immers nergens meer de minimale energie krijgen die nodig is om op het supergeleidende eiland te komen. We hebben dus een soort afvoerputje gemaakt voor quasideeltjes.

Het record voor zo min mogelijk tunneling van quasideeltjes stond hier voor op een gemiddelde van 1 keer per 125 milliseconden [5]. Dit is gemeten in een opstelling met alleen een supergeleidende structuur van aluminium, die eenvoudiger te fabriceren is dan de supergeleidende structuren van NbTiN. Aluminium kan helaas niet worden gebruikt omdat de sterkte van het magneetveld waar beneden aluminium zijn supergeleidende eigenschappen verliest voor ons doel te klein is. En wij hebben zowel supergeleiding als een groot magneetveld nodig en NbTiN voldoet ruim aan deze eisen. Onze inspanningen hebben het aantal quasideeltjes dermate gereduceerd dat gemiddeld deze tunneling slechts 1 keer per 90 seconden optreedt en dat zelfs met het nuttigere NbTiN. In die 90 seconden gaan er typisch zo'n  $10^{14}$  Cooperparen door het eiland, maar het tunnelen van dat ene quasideeltje kunnen wij meten.

## Quantumcomputer

Waarom is dit interessant en waarom is het nuttig om het aantal quasideeltjes te minimaliseren? Allereerst is het natuurlijk vreemd dat je volgens de theorie eigenlijk niet één quasideeltje zou moeten hebben, maar er toch ontzettend veel meet. Het is van fundamenteel belang om de natuurkundige achtergrond hiervan te begrijpen. Ten tweede is er een praktisch belang met betrekking tot de ontwikkeling van een quantumcomputer. Er zijn wereldwijd meerdere onderzoeksgroepen, zowel op universiteiten als bij bedrijven en overheden, die een computer willen bouwen die gebaseerd is op quantumeffecten. De hoop is gevestigd op supergeleidende structuren, omdat een supergeleider een macroscopisch, eenvoudig te maken en goed beïnvloedbaar quantumstelsel is. Het tunnelen van een quasideeltje verstoort echter de quantuminformatie en dus ook de werking van een quantumcomputer en dat willen we natuurlijk voorkomen [6]. Een intrigerende nieuwe mogelijkheid voor het maken van een quantumcomputer is gebaseerd op zogenaamde Majoranadeeltjes. Deze computer berust juist op het aantal (oneven of even) elementaire ladingen op supergeleiden- de eilandjes. Hier is het dus belangrijk het aantal quasideeltjes langdurig onder controle te kunnen houden. Het hier beschreven onderzoek is dan ook een belangrijke stap op weg naar een quantumcomputer gebaseerd op Majoranadeeltjes [7].

## Referenties

- 1 Heike Kamerlingh Onnes - Biographical. Nobelprize.org. Nobel Media 2014. Web. 17 Nov 2014. [www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1913/onnes-bio.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1913/onnes-bio.html).
- 2 J. Bardeen, L. N. Cooper en J. R. Schrieffer, *Phys. Rev.* **108** (1957) 1175 (Dit is de theorie van supergeleiding en is gratis te downloaden via deze link <http://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.108.1175>).
- 3 P. Joyez, P. Lafarge, A. Filipe, D. Esteve en M.H. Devoret, *Phys. Rev. Lett.* **72** (1994) 2458.
- 4 C. S. Owen en D. J. Scalapino, *Phys. Rev. Lett.* **28** (1972) 1559.
- 5 O.-P. Saira, A. Kemppinen, V. F. Maisi en J. P. Pekola, *Phys. Rev. B* **85** (2012) 012504.
- 6 D. Ristè, C. C. Bultink, M. J. Tiggelman, R. N. Schouten, K.W. Lehnert en L. DiCarlo, *Nat. Commun.* **4** (2013) 1913.
- 7 T. Hyart, B. van Heck, I. C. Fulga, M. Burrello, A. R. Akhmerov en C. W. J. Beenakker, *Phys. Rev. B* **88** (2013) 035121.