

De moeizame jacht op Majorana's

In maart 2021 werd een spraakmakend *Nature*-artikel over Majoranadeeltjes teruggetrokken [1]. In dat artikel uit 2018 stelde een onderzoeksgroep onder leiding van Leo Kouwenhoven van de TU Delft, dat ze de aanwezigheid van topologische Majoranadeeltjes aangetoond had [2]. Die zouden een rol kunnen spelen in de ontwikkeling van een quantumcomputer. Na kritiek vanuit de wetenschappelijke gemeenschap bleek dat de conclusie niet standhield. Een jaar later onderging een tweede *Nature*-artikel van de onderzoeksgroep hetzelfde lot [3]. Wat maakte deze terugtrekkingen noodzakelijk?

Het bestaan van Majoranadeeltjes, of Majoranafermionen, werd in 1937 voorspeld door de Italiaanse theoretisch fysicus Ettore Majorana [4], die een jaar later spoorloos verdween tijdens een bootreis van Napels naar Palermo. Majoranadeeltjes zijn identiek aan hun eigen antideeltje. In de afgelopen tachtig jaar is er geen enkel deeltje gevonden dat deze Majorana-eigenschap overtuigend tentoonspreidt. Van alle bekende elementaire deeltjes zou alleen het neutrino deze eigenschap nog kunnen hebben. Ongeveer twintig jaar geleden lieten theoretici zien dat er ook niet-elementaire Majoranadeeltjes kunnen bestaan [5]. Die deeltjes zouden ontstaan door het collectieve topologische supergeleidende gedrag van deeltjes in vastestofsystemen. In zulke systemen kun je namelijk een equivalent hebben van een deeltje-antideeltjepaar. Een elektron is het deeltje en het antideeltje is een 'gat':

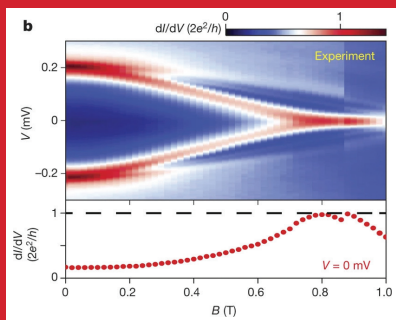
een netto positief geladen 'lege' toestand waar een elektron ontbreekt. In een supergeleidend metaal – waarin elektronenduo's Cooperparen vormen – is het mogelijk om een deeltje zonder lading samen te stellen dat bestaat uit een half elektron en een half gat. Dit samengestelde deeltje is gelijk aan zijn antideeltje en dus een Majoranadeeltje. Omdat er geen halve elektronen bestaan, zal er altijd een even aantal Majoranadeeltjes aanwezig zijn.

Deze Majoranadeeltjes kunnen bij energie nul binden aan een defect in de supergeleider. Dat kan het uiteinde van een nanodraadje zijn of een magnetische vortex (wervel). Dit worden *Majorana zero modes* (MZM) genoemd. Als aan de uiteinden van deze nanodraadjes Majoranadeeltjes opgewekt kunnen worden, dan zijn die topologisch beschermd: de eigenschappen van het materiaal en de elektronen erin zorgen ervoor dat ze geen last hebben van verstoringen.

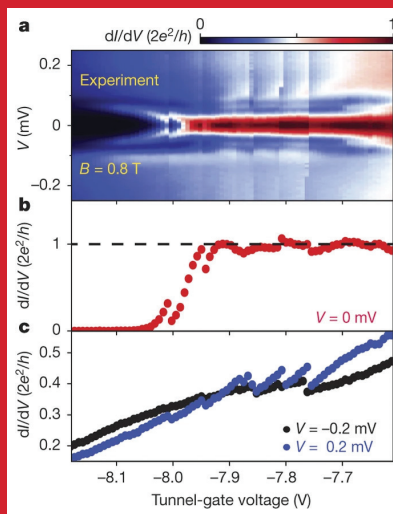
Dat betekent dat die Majoranadeeltjes zouden kunnen dienen als robuuste qubits, de bouwstenen van een quantumcomputer.

Nanodraad met supergeleider

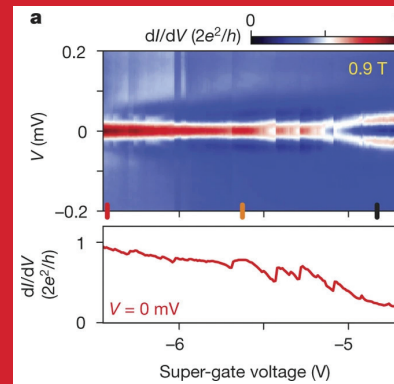
In 2010 verschenen er twee publicaties met een recept voor Majoranadeeltjes in een hybride systeem, bestaande uit een halfgeleider-nanodraadje dat bedekt is met een supergeleidend laagje [6,7]. De Majoranadeeltjes zouden ontstaan aan de uiteinden, op het grensvlak tussen de supergeleider en de halfgeleider, als je daar een aantal ingrediënten aan toevoegt, waaronder een magneetveld en een elektrische spanning om het systeem mee af te stellen. Dit lijkt misschien een kant-en-klaarrecept, maar het is complex om uit te voeren, onder meer omdat supergeleiding en magneetvelden niet goed samengaan. De onderzoeksgroep van Leo Kouwenhoven ging hiermee aan de slag. Al in 2012 publiceerden ze de



Figuur 1. Originele weergave van figuur 1b uit het teruggetrokken artikel [1]. Geleiding van nanodraad-device A als een functie van de biasspanning en een oplopend magneetveld. In het onderste paneel staat de magneetveldafhankelijkheid van de gekwantiseerde geleidingspiek ($2e^2/h$), weergegeven als zwarte stippellijn bij 0 volt (*zero bias*).



Figuur 2. Originele weergave van figuren 2a, b en c uit het teruggetrokken artikel [1]. a) Geleiding als functie van de tunnel-gatespanning bij een vaste waarde voor het magneetveld ($B = 0,8\text{ T}$). b) en c) Horizontale lijnsneden van a, die respectievelijk *zero bias*-geleiding en geleiding bij $\pm 0,2\text{ mV}$ tonen.



Figuur 3. Originele weergave van figuur 3a uit het teruggetrokken artikel [1]. De geleiding als functie van de super-gate-spanning, bij een vaste waarde voor het magneetveld ($B = 0,9\text{ T}$). Het veranderen van de super-gatespanning is bedoeld om de chemische potentiaal in het hoofddeel van de nanodraad te veranderen. Het onderste paneel toont de super-gate-spanning-afhankelijkheid van de gekwantiseerde geleidingspiek ($2e^2/h$) bij 0 volt (*zero bias*). Schommelingen zijn het gevolg van ladingssprongen.

eerste hoopvolle resultaten [8]. In hun onderzoek gebruikten ze indium-antimonide nanodraadjes (InSb) die gemaakt waren bij de groep van Erik Bakkers van de TU Eindhoven (TU/e). Op die draadjes was in het midden een supergeleidend laagje (NbTiN) aangebracht. Onder de juiste omstandigheden – zoals een temperatuur net boven het absolute nulpunt – zou een elektron kunnen opsplitsen in twee Majoranatoestanden, aan elke kant van dit supergeleidereiland één. Verder naar buiten op de nanodraad construeerden de onderzoekers een normaal contact en een tunnelbarrière. Elektronen kunnen dankzij de wetten van de quantummechanica door deze elektrisch isolerende barrière heen tunnelen. Dat maakt tunnelingspectroscopie mogelijk: een spanning, aangelegd tussen het normale deel van de draad en het deel met de supergeleider, zorgt ervoor dat er een stroom tussen gaat lopen waarbij de elektronen door de barrière

tunnelen. Door die stroom te meten kun je achterhalen of er Majoranadeeltjes zijn, omdat die het tunnelgedrag beïnvloeden. Met tunnelingspectroscopie werd de geleiding (dI/dV) gemeten aan één kant van het draadje. Als er een Majoranatoestand is, dan moet de geleiding door de nanodraad groter worden bij een lage spanning. De voorspelling is een geleidingspiek bij 0 volt en nul energie.

Te kleine piekjes

In het experiment in 2012 werd er inderdaad een piekje in de geleiding gezien bij 0 volt, wat ook wel *zero bias* wordt genoemd. Dat werd destijds gezien als een mogelijke aanwijzing voor de aanwezigheid van Majoranatoestanden. Maar het piekje was klein. Te klein, want de geleidingswaarde bij Majoranadeeltjes zou – nabij 0 kelvin – een specifieke waarde moeten hebben van $2e^2/h$, ongeacht de precieze waarde van het magneetveld en de gatespanning (de

spanning die aangebracht wordt op het draadje).

De piekjes uit 2012 haalden die waarde niet; ze lagen rond vijf procent van $2e^2/h$. Ze leidden tot enthousiasme, maar ook tot discussie. Zo zouden de metingen ook verklaard kunnen worden door de minder exotische *Andreev bound states*. Dit zijn superposities van elektronen en gaten die ook bij andere energiewaarden dan nul voorkomen en niet topologisch beschermd zijn. Dat maakt ze voor de quantumcomputer een stuk minder bruikbaar dan Majoranadeeltjes. In de jaren die volgden werden de piekjes vaker waargenomen, bij de groep van Kouwenhoven en bij anderen. Maar ze bleven klein. Ondertijd werden de nanodraaddevices verbeterd door te werken met betere technieken en dankzij een materialen-doorbraak van de groep van Peter Krogstrup en Charles Marcus uit Kopenhagen. “In het begin groeiden we de draden in Eindhoven en brach-

ten we ze naar Delft, waar de supergeleider werd aangebracht en de devices verder in elkaar werden gezet”, vertelt Erik Bakkers van de TU/e. “Dit deed de kwaliteit geen goed. Waarschijnlijk omdat de draden blootgesteld werden aan lucht. Daarom gingen we over op een techniek waarbij we de draden (InSb) bijna in situ maakten. Wij groeiden ze schuin, voor elkaar langs en in Santa Barbara werd de supergeleider (aluminium) zodanig aangebracht dat dat stukje van de draad niet meer aangeraakt hoefde te worden. Dit leverde mooiere, gladde grensvlakken op en schonere en betere devices.” Deze nieuwe devices gaven ook hogere geleidingspieken.

Heilige graal

In 2017 was ook de theorie verder ontwikkeld en werd het meten van een geleidingspiek van $2e^2/h$ bij zero bias niet langer gezien als een mogelijke, maar zelfs als een sterke aanwijzing voor Majoranadeeltjes. Die piek zou wel robuust moeten zijn en niet veranderen wanneer er gematigd gevarieerd wordt met het magneetveld, de elektronendichtheid in de nanodraad en de tunnelkans in het uiteinde van de draad. Als de piek constant blijft onder die variërende parameters, dan wordt het een plateau. Een zero bias-plateau bij $2e^2/h$ werd de ‘heilige graal’.

Het Nature-artikel uit 2018 meldde dat ze deze heilige graal gevonden hadden [2]. Voor dit artikel had de onderzoeksgroep zestig nanodraad-devices gemaakt. Elf daarvan waren uitvoerig gemeten bij extreem lage temperaturen. Twee vertoonden het gezochte gedrag dat zou kunnen duiden op Majorana’s. In het artikel ligt de focus op metingen van een van die twee devices.

Begin 2020 werden echter ernstige zorgen geuit over de conclusies in dit artikel, met name door twee oud-medewerkers van de onderzoeksgroep: Sergey Frolov en Vincent Mourik. Dit leidde in maart 2020 tot de beslissing om het artikel terug te trekken en gecorrigeerd te herschrijven. De terugtrekking gaf aanleiding voor een onderzoek naar de publi-

catie op verzoek van het college van bestuur van de TU Delft. Onderdeel hiervan is een rapport van onafhankelijke, externe experts dat in maart 2021 verscheen [9].

De externe experts kregen inzicht in alle ruwe metingen. Daaruit blijkt dat de auteurs ingezoomd hebben op de metingen die de geleidingswaarde toonden waar ze naar zochten, zonder expliciet de andere metingen die daarvan afweken te benoemen en te beschrijven hoe die zich verhouden tot de gepresenteerde metingen. Als de auteurs dit opzettelijk hadden gedaan, stellen de experts, was er sprake geweest van een ernstig vergrijp. Maar daar is geen bewijs voor gevonden. Volgens de experts is de meest plausibele verklaring dat de auteurs zich lieten meeslepen door de opwindende vondst en daardoor blind waren voor de gegevens die de vondst niet ondersteunden. Ze kampten dus met *confirmation bias*, oftewel tunnelvisie.

Dit heeft volgens de experts gevolgen voor de interpretatie van de grafieken in figuur 1 van het artikel, waar de geleiding als een functie van de biasspanning en een oplopend magneetveld bekeken wordt. De geleiding lijkt op te lopen als het magneetveld toeneemt, tot die een waarde van $2e^2/h$ bereikt (bij $B=0,8$ T), waar de geleiding blijft hangen tot het magneetveld veel verder toeneemt. De auteurs hebben voor deze figuur metingen gekozen waarbij de geleiding $2e^2/h$ bereikt, even dipt en dan weer terugkeert naar $2e^2/h$. Ze benoemen niet expliciet de vele andere metingen die niet precies $2e^2/h$ bereiken, maar significant hoger of lager uitkomen.

Ladingssprong

De experts schrijven de dip en terugkeer naar $2e^2/h$ toe aan een *charge jump*, oftewel ladingssprong. Daarbij herschikken ladingen zich op een bepaalde plek in de nanodraad, waardoor de lading op die plek verandert. Dit zorgt ervoor dat parameters van het systeem, zoals de aangelegde spanning en het magneetveld, gereset worden. Daardoor kan de figuur meer op een plateau lijken dan een meting

zonder ladingssprong. Iets vergelijkbaars zien de experts in figuur 2b, die de geleiding als een functie van de tunnel-gatespanning toont bij een vaste waarde voor het magneetveld. Op andere plekken zijn de ladingssprongen juist wel uit de gepresenteerde data geknipt. Dat is gebruikelijk binnen het onderzoeksveld, maar had expliciet gemeld kunnen worden. Verder merken de experts op dat in figuur 3 enkel het deel van de data getoond wordt waarbij de geleiding net tot $2e^2/h$ komt en daar lijkt te blijven plakken. Maar uit de hele dataset blijkt dat de geleiding tot ver daarboven komt, zelfs tot $1,7 \cdot 2e^2/h$. Dat deel is weggelaten uit het artikel zonder dat te benoemen en de redenen te bespreken.

De metingen waarbij in detail gekeken werd naar een geleidingsplateau bij een variërend magneetveld komen in het artikel niet voor. Daar bestonden wel metingen van. “Een kleine verschuiving van het magneetveld deed het plateau verdwijnen”, vertelt Kouwenhoven. “De stabiliteit in het magneetveld hebben we verder niet goed gecheckt, omdat we bij het variëren van andere parameters wel metingen vonden die voldeden aan de voorspelling. We hebben alleen de metingen in het artikel gestopt die voldeden aan de voorspellingen en we hebben de beperktheid van dat positieve bewijs niet expliciet genoemd.” Dat had ermee te maken dat de auteurs het al bijzonder vonden dat ze überhaupt een plateau zagen van ongeveer $2e^2/h$. Ten tijde van de publicatie was het meten van grote pieken, zelfs al waren ze niet gekwantiseerd, al een grote stap vooruit, zeggen Bakkers en Kouwenhoven. Dat beamen de externe experts. “Zo hadden we het ook op moeten schrijven”, zegt Bakkers. “En niet als een claim van gekwantiseerde Majorana-toestanden.” Ten slotte bleek, toen de onderzoeksgroep hun meetopstelling opnieuw bekeken, dat hun geleidingsmeting niet goed gekalibreerd was, waardoor er een fout van tien procent in alle metingen zat. Daardoor zouden de ‘gekwantiseerde plateaus’ uitkomen

op $1,1 \cdot 2e^2/h$ in plaats van $1,0 \cdot 2e^2/h$. Volgens het rapport is dat, gezien de fluctuaties rond die waarde, een significant verschil.

Lessen

In maart 2020 hebben de auteurs met een editor van *Nature* besloten het artikel uit 2018 terug te trekken, omdat de hierboven beschreven punten de interpretatie van de meetresultaten veranderen. Zo interpreteren de externe experts de meetresultaten uit figuur 1 en 2 dus niet als plateaus, maar als ladingssprongen. Ook blijkt dat de metingen de conclusie – bewijs voor gekwantiseerde Majorana-toestanden – niet onderbouwen. Daarop verscheen er een *editorial concern* [9]. De definitieve terugtrekking en de publicatie van de bijbehorende *rewrite* verschenen in maart 2021 [1], omdat er is gewacht op de uitkomst van het complete onderzoek van de onafhankelijke experts [10]. Kouwenhoven: “Het onderzoek bij de TU Delft heeft een jaar vertraging gegeven.”

Iets wat niet meespeelde in de terugtrekking, maar wel belangrijk is voor het vakgebied, is het voortschrijdend inzicht dat een plateau bij $2e^2/h$ geen garantie is voor de gewilde topologisch beschermde Majoranadeeltjes. Er zijn inmiddels Andreev bound states gemeten die zich in bepaalde situaties kunnen gedragen op een manier die vergelijkbaar is met de Majoranadeeltjes, inclusief een plateau bij $2e^2/h$. Ook zijn er quasi-Majorana's, die in bijna alle opzichten op Majorana's lijken en mogelijk zelfs een voorloper ervan zijn. Net als Andreev bound states missen deze quasi-Majorana's de topologie die nodig is voor een stabiele qubit. Devices moeten nu meer tests doorstaan voordat ze aangemerkt kunnen worden als mogelijke Majoranatoestanden. Hiervoor is een protocol ontwikkeld. “We hebben de afgelopen jaren veel geleerd over de verschillende toestanden die in het materiaal mogelijk zijn”, zegt Kouwenhoven. “Pas nu wordt dat landschap duidelijk. Als ik terugkijk naar de artikelen tussen 2012 en 2020

VERVOLGONDERZOEK NAAR MAJORANA'S

Leo Kouwenhoven zoekt ondertussen verder naar Majoranatoestanden. In november 2022 verscheen een nieuwe publicatie van zijn groep in *Nature*. In dat onderzoek is onder meer de geleiding aan beide uiteinden van de nanodraad – dus bij beide Majoranatoestanden – gemeten. Een tweede publicatie is in aantocht. Daarnaast werkt hij nu aan een Kitaev-ketting, die bestaat uit een ketting van afwisselend quantumdots en supergeleiders. Kouwenhoven: “Dat komt dichterbij de ideale 1D-draad die Kitaev twintig jaar geleden voorstelde. En je kunt de ketting per onderdeel (of per 'kraal') tunen waardoor je onzuiverheden en wanorde er makkelijker uit kunt halen dan bij de andere nanodraadjes.” Een Kitaev-ketting is fundamenteel interessant om het bestaan van Majoranadeeltjes aan te tonen, maar het lijkt lastig om hiermee een grootschalige quantumcomputer te bouwen. Daarnaast werkt de onderzoeksgroep van Bakkers samen met andere groepen aan andere materiaalsystemen, zoals nanodraadjes van tintelluride, die intrinsiek topologisch zijn en dus niet eerst topologisch gemaakt moeten worden met een magneetveld. Volgens Beenakker is gebleken dat het lastig is om Majoranadeeltjes te vinden, maar hij is er nog steeds van overtuigd dat ze gevonden zullen worden. “De fysica erachter is volkomen zuiver en solide. Als je het mij vraagt dan zijn de nanodraadjes geen veelbelovende aanpak. Ik voorspel dat Majoranadeeltjes gevonden zullen worden door iemand die een heel andere methode gebruikt.”

dan denk ik dat ze bijna allemaal een vernieuwde interpretatie nodig hebben.”

Na de terugtrekking van het *Nature*-artikel uit 2018 [1] werd in april 2022 nogmaals een *Nature*-publicatie van deze onderzoeksgroep teruggetrokken [3]. Deze keer was het een artikel uit 2017 met TU/e-onderzoekers als eerste en laatste auteur. “Daar zijn ook datapunten uit de Delftse data weggehaald, zonder fysische reden”, zegt Bakkers. “Dat bleek voor de claims niet zo belangrijk, maar uiteindelijk was de conclusie dat het toch moest worden teruggetrokken.”

“Beide artikelen hebben we in onze groep besproken”, vertelt Bakkers. “Voor mij is het belangrijkste dat we er iets van leren en het proberen te voorkomen. Misschien wel de beste maatregel die we daarvoor genomen hebben is dat we alle data op Zenodo (online digital academic repository voor publicaties en data) zetten, voordat we het artikel opsturen naar een tijdschrift [11]. Dan weet iedereen dat alle data openbaar worden, dus dat de data goed moeten zijn.” Hoogleraar Carlo Beenakker van de Universiteit Leiden beaamt dat: “Hoge-energie-fysici zijn daar heel bedreven in. Die hebben allerlei veiligheidsmechanismen in hun manier van analyseren. Wij, andere fysici, moeten nu gaan

leren om meer te werken zoals die hoge-energiefysici.”

Dorine Schenk studeerde af in de (astro)deeltjesfysica en werkt sindsdien als freelancewetenschapsjournalist in opdracht van onder meer NRC, New Scientist en Tweakers. dorineschenk@hotmail.com

REFERENTIES

- 1 Hao Zhang et al., Retraction Note: Quantized Majorana conductance, *Nature* **591**, E30 (2021). www.nature.com/articles/nature26142.
- 2 Hao Zhang et al., RETRACTED ARTICLE: Quantized Majorana conductance, *Nature* **556**, 74–79 (2018).
- 3 Sasa Gazibegovic et al., Retraction Note: Epitaxy of advanced nanowire quantum devices, *Nature* **604**, 786 (2022). Oorspronkelijk artikel *Nature* **548**, 434–438 (2017).
- 4 E. Majorana, Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone, *Nuovo Cimento* **14**, 171–184 (1937).
- 5 Nicholas Read et al., Paired states of fermions in two dimensions with breaking of parity and time-reversal symmetries, and the fractional quantum Hall effect, *Physical Review B* **61**, 10267–10297 (2000).
- 6 Roman M. Lutchyn et al., Majorana Fermions and a Topological Phase Transition in Semiconductor-Superconductor Heterostructures, *Physical Review Letters* **105**-7, 077001 (2010).
- 7 Oreg, Yuval et al., Helical Liquids and Majorana Bound States in Quantum Wires, *Physical Review Letters* **105**-17, 177002 (2010).
- 8 Mourik V. et al., Signatures of Majorana fermions in hybrid superconductor-semiconductor nanowire devices, *Science* **336**, 1003–7 (2012) (New York, N.Y.).
- 9 Hao Zhang et al., Editorial Expression of Concern: Quantized Majorana conductance, *Nature* **581**, E4 (2020). www.nature.com/articles/s41586-020-2252-6.
- 10 Piet Brouwer et al., Nature paper “Quantized Majorana conductance”, Report from independent experts, https://zenodo.org/record/4545812#_Y3evY3bMKCg.
- 11 <https://zenodo.org>.