

Teleportatie van ele

Teleportatie is de overdracht van een onbekende quantummechanische toestand tussen twee deeltjes. Omdat de overdracht plaatsvindt zonder uitwisseling van materie, doet het een beetje denken aan het bekende *Beam me up!* van de televisieserie *StarTrek*. Carlo Beenakker

beenakker@lorentz.leidenuniv.nl



Carlo Beenakker promoveerde in 1984 aan de Universiteit Leiden en hij was zes jaar in dienst van Philips' Natuurkundig Laboratorium in Eindhoven. Sinds 1991 is hij hoogleraar in Leiden. Beenakker was PIONIER-onderzoeker van NWO en ontving in 1999 de NWO/Spinoza-premie. Overige onderscheidingen omvatten de C.J. Kok-prijs (1985), de Koninklijke/Shell-prijs (1993) en de Physica-lezing (2003). Hij is lid van de KNAW.

Teleportatie van geïsoleerde deeltjes is tien jaar geleden uitgevonden [1] en aangetoond voor fotonen in de vrije ruimte [2]. Mijn promovendus Markus Kindermann (thans postdoc op MIT) en ik hebben nu een manier bedacht om elektrische lading in de vaste stof te teleporteren [3]. Deze vondst zou nuttig kunnen zijn voor de overdracht van quantummechanische bits (qubits) in een quantumcomputer.

DE ONTMOETING

Er zijn twee type ladingsdragers in de vaste stof, elektronen en gaten. Omdat ze tegengesteld geladen zijn, kunnen ze alleen gelijktijdig bestaan als ze van elkaar gescheiden worden door een isolerende barrière. Als de barrière toch een beetje stroom doorlaat en een elektron ontmoet een gat, dan worden beiden vernietigd. Wij hebben ontdekt dat dit niet het einde van het verhaal hoeft te zijn. Onder speciale omstandigheden kan het elektron via teleportatie zijn bestaan op een verafgelegen plek voortzetten.

De ontmoeting van een elektron en een gat is afgebeeld in figuur 1. Beide deeltjes bevinden zich in de geleidingsband van een metaal of halfgeleider. Bij lage temperatuur zijn alle energieniveaus gevuld met elektronen tot aan een maximale energie. Deze 'zee' van elektronen wordt de Fermi-zee genoemd en het maximale energieniveau heet het Fermi-niveau. De volledig gevulde Fermi-zee is in evenwicht en draagt dus geen elektrische stroom. Om een stroom te laten lopen heb je excitaties nodig. Dit zijn gevulde toestanden (elektronen) boven het Fermi-niveau of lege toestanden (gaten)

eronder. De ontmoeting vindt plaats bij een isolerende barrière, die de rol vervult van een sluis: het Fermi-niveau staat wat hoger aan de ene kant van de barrière dan aan de andere kant, zodat het gat wordt opgetild naar dezelfde energie als het elektron.

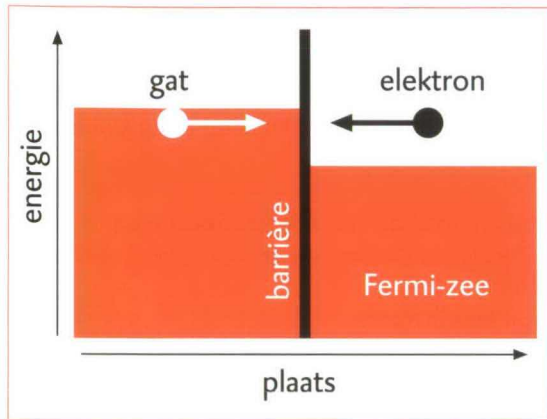
HET HEMELSE EN HET AARDSE

Meestal worden het elektron en het gat door de barrière teruggekaatst, maar bij elke ontmoeting is er een kleine kans dat het elektron door de barrière heen tunnelt en in het gat aan de andere kant valt. Dan zijn beide deeltjes spoorloos verdwenen. Einde verhaal. Tenzij... – tenzij het gat in het verleden verstrengeld was geraakt met een ander elektron, heel ergens anders in het materiaal. Dit verafgelegen elektron geef ik als bijnaam het 'hemelse' elektron en het eerder genoemde elektron is dan het 'aardse' elektron.

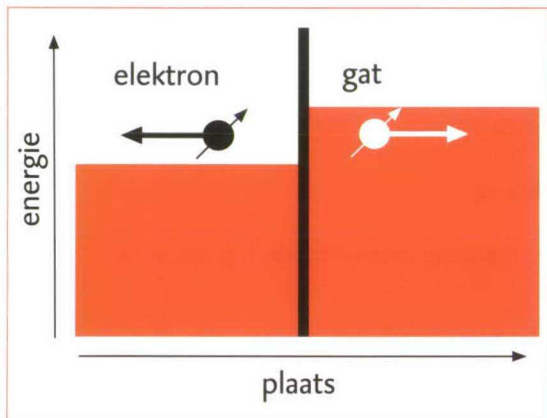
Met verstrengeling wordt bedoeld een quantummechanische correlatie tussen de spins. De spin van het gat is enerzijds volledig isotroop georiënteerd en anderzijds volledig gecorreleerd met de spin van het hemelse elektron. In de klassieke mechanica is dat niet mogelijk, maar wel in de quantummechanica. De golftoestand die zo'n verstrengelde toestand van gat en elektron beschrijft is $(|\uparrow\uparrow\rangle + |\downarrow\downarrow\rangle)/\sqrt{2}$. Het is een superpositie van twee toestanden; in de eerste toestand hebben elektron en gat beide spin \uparrow en in de tweede toestand hebben ze beide spin \downarrow . Zo'n verstrengelde toestand ontstaat vanzelf als het hemelse elektron door een barrière tunnelt en een gat achterlaat met dezelfde spin [4], zie figuur 2.

Terug naar het aardse elektron. Het valt in het gat en verdwijnt in de Fermi-zee. Zijn quantummechanische toestand $\alpha|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle$ was onbekend en lijkt verloren. De verstrengeling, echter, werkt als een 'ziel' die de toestand doet voortleven in het hemelse elektron. Ga maar na: om het gat te vullen moeten de

Elektrische



Figuur 1
Een elektron ontmoet een gat.



Figuur 2
Ontstaan van een versrengeld elektron-gat-paar. Beide spins zijn isotroop verdeeld maar perfect gecorreleerd. Het gat vervolgt zijn weg en wordt uiteindelijk door het elektron uit figuur 1 vernietigd. Door de versrengeling van de spins neemt dan het achtergebleven elektron de toestand van het verdwenen elektron aan.

spins van het aardse elektron en die van het gat perfect gecorreleerd zijn en de verstrengeling zorgt er voor dat die correlatie zich voortzet in de spin van het hemelse elektron. De spin van het hemelse elektron is dus niet langer isotroop verdeeld, maar heeft de toestand $\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle$ van het aardse elektron aangenomen. Deze instantane overdracht van een quantummechanische toestand tussen twee verafgelegen deeltjes is wat Bennett en anderen teleportatie genoemd hebben [1], met een knipoog naar *StarTrek*.

KLOONVERBOD

Hoewel de teleportatie instantaan is, kan Einstein gerust zijn: er is geen sprake van een instantane informatieoverdracht. Het is immers onvoorspelbaar wanneer een tunnelpoging succesvol is en dus zal er langs gewone (klassieke) wegen een boodschap verstuurd moeten worden dat de teleportatie heeft plaatsgevonden. Het verafgelegen elektron kan niet even meten of zijn toestand nog isotroop is of niet, zonder die toestand zelf te verstoren. De instantane overdracht van de toestand van het ene naar het andere elektron is noodzakelijk om te voldoen aan het kloonverbod [5] uit de quantummechanica: omdat de quantummechanische evolutie lineair is, kan een onbekende quantumtoestand niet gekopieerd (gekloond) worden. En in-

derdaad, op geen enkel moment is er meer dan één exemplaar van de toestand $\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle$ aanwezig. De toestand $\alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle$ is de qubit in een quantumcomputer. Teleportatie maakt het in principe mogelijk om die toestand te vervoeren van het ene deel van een elektrische schakeling naar het andere, zonder die toestand door een meting te hoeven verstoren. Dat is de langetermijnmotivatie van ons onderzoek, dat plaatsvindt binnen de pas opgerichte FOM-concentratiegroep voor *Solid State Quantum Information Processing*. Op de korte termijn zou het al een hele doorbraak zijn als de verstrengeling van het elektron-gat-paar zou kunnen worden gemeten. Teleportatie over een afstand van enkele micrometers is dan de logische volgende stap. Een kleine stap, misschien, voor kapitein Kirk, maar een reuzenstap voor de wetenschap.

REFERENTIES

- 1 C.H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres, W.K. Wootters, *Phys. Rev. Lett.* **70** (1993), 1895.
- 2 D. Bouwmeester, J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter, A. Zeilinger, *Nature* **390** (1997), 575.
- 3 C.W.J. Beenakker, M. Kindermann, *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004), 056801.
- 4 C.W.J. Beenakker, C. Emary, M. Kindermann, J.L. van Velsen, *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003), 147901.
- 5 W.K. Wootters, W.H. Zurek, *Nature* **299** (1982), 802; D. Dieks, *Phys. Lett. A* **92** (1982), 271.

Agenda

voor actuele informatie en andere activiteiten zie <http://www.ntvn.nl/>

16 april Symposium 'Philosophy of Geosciences'. Sprekers: Gerbrand Komen, Victor Baker, Henk de Regt, Arno Wouters en Maarten Kleinhans. Het symposium vindt plaats van 09.00 tot 17.00 uur in de grote zaal in het Aardwetenschappen-gebouw van de Universiteit Utrecht, Budapestlaan 4 (De Uithof) in Utrecht. De kosten bedragen 25 euro (studenten betalen 15 euro). Inschrijving en meer informatie, zie <http://www.geog.uu.nl/fg/philosophy/>.

23 april Mini-symposium ter gelegenheid van het emeritaat van prof.dr. Adri Lodder. Sprekers: S. Fujita (Buffalo), R. Zeller (Jü-

lich), Y.V. Nazarov (Delft). Aanvang 13.30 uur, zaal M 1.43, De Boelelaan 1081, Amsterdam.

Het afscheidscollege is om 15.45 uur in het Auditorium van de Vrije Universiteit, Hoofdgebouw, De Boelelaan 1105. Voor meer informatie kunt u contact opnemen met Klaas Allaart (allaart@nat.vu.nl).

14 mei *Fysica 2004*. Het jaarlijkse Voorjaarssymposium van de NNv wordt dit jaar gehouden op de Universiteit Twente in Enschede. Het voorlopige programma staat elders in dit nummer.