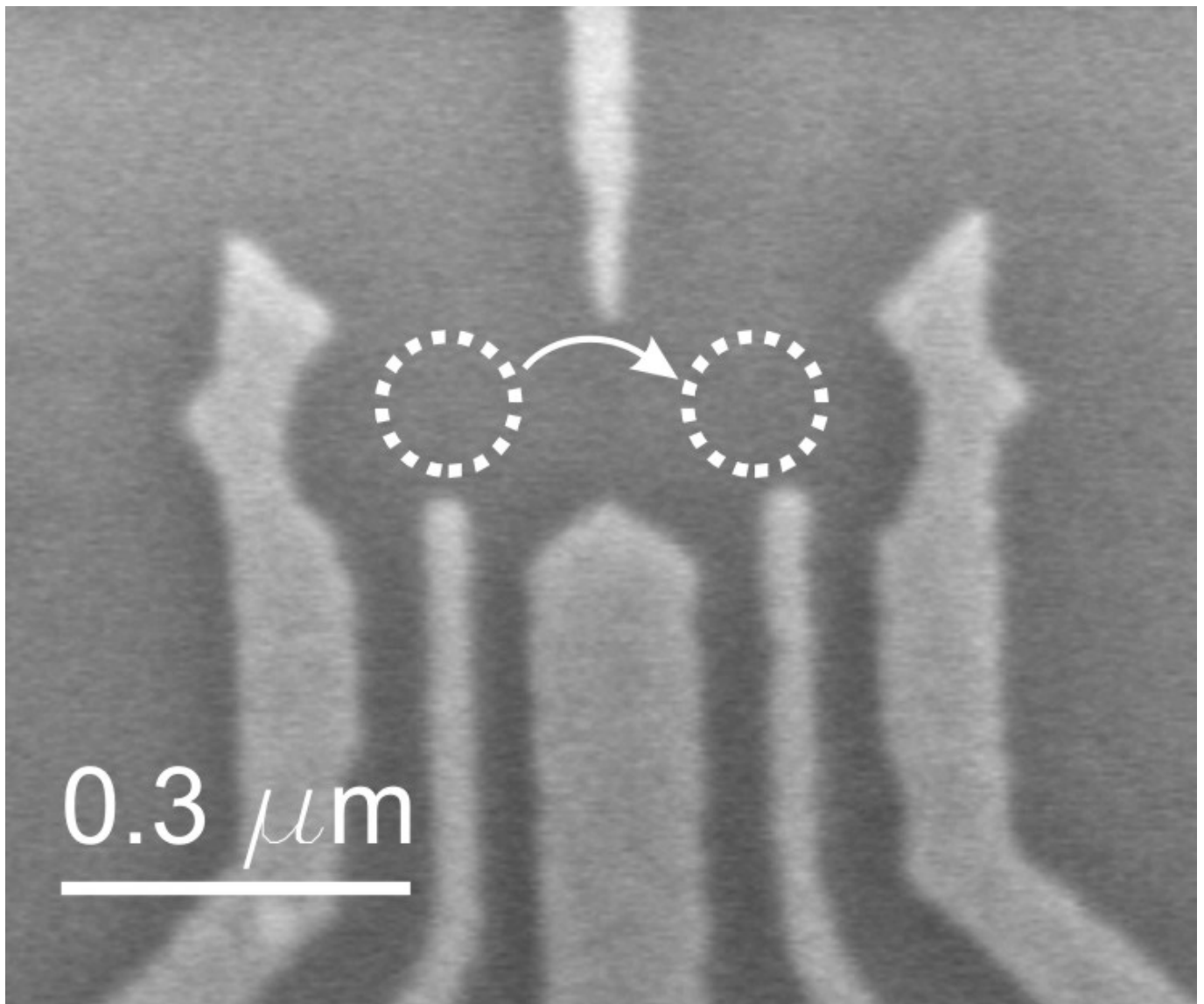


Quantumcomputers (3): Echte qubits

In [deel twee van dit dossier](#) hebben we al gezien wat qubits zijn, maar nog niet hoe ze gemaakt worden. In dit laatste deel zullen we dan eindelijk zien hoe qubits in het echt gemaakt worden. Daar zijn verschillende methoden voor, maar welke is de beste?



Afbeelding 1. Een quantumdot. Quantumdots kunnen gebruikt worden als qubits. Afbeelding: Lieven Vandersypen, QuTech.

Elektronen

Een van de veelbelovende methoden maakt gebruik van de spin van een elektron. We zullen hier eerst kort uitleggen wat een elektron is, en dan wat spin is. Wie nog meer informatie wil over dit onderwerp, kan die bijvoorbeeld vinden in [dit artikel](#).

Elektronen zijn een van de soorten elementaire deeltjes waaruit alle materie is opgebouwd. ‘Elementair’ betekent dat ze niet van iets anders gemaakt zijn. Hoewel elektronen geen onderdelen hebben, hebben ze wel bepaalde eigenschappen. Dat zijn onder andere massa, lading en spin. Deze eigenschappen zijn onveranderlijk: alle elektronen komen met dezelfde massa, lading en spin ‘uit de fabriek van de natuur’. De meeste mensen kennen het elektron misschien vooral als onderdeel van een atoom, maar elektronen kunnen ook vrij voorkomen.

De eigenschap [massa](#) ken je waarschijnlijk al goed, dus die zullen we hier verder niet behandelen. We zullen echter nog wel kort uitleggen wat lading is, en wat je ermee kunt.

Een elektron heeft een negatieve lading. Zoals we net al opmerkten heeft elk elektron dezelfde, vaste lading. Daardoor is de lading van een elektron eigenlijk een ideale eenheid. We zeggen daarom simpelweg dat de lading van een elektron $-1 e$ is, waar e de *elementaire lading* heet.

Een negatieve lading wordt *afgestoten* door een andere negatieve lading, en *aangetrokken* door een positieve lading. Op deze manier kunnen we met behulp van lading die we direct besturen, vanaf een afstandje elektronen aantrekken of afstoten.

Ook kunnen we lading heen en weer schudden. Dat veroorzaakt zogenaamde *elektromagnetische golven*. Als deze golven langs het elektron komen, kunnen ze naast de positie ook de spin, die we verderop zullen bespreken, beïnvloeden. Dankzij deze twee effecten kunnen we elektronen vanaf een afstand manipuleren.

Geleiders

Een [geleider](#), zoals goud, is een materiaal waarin elektronen nagenoeg vrij rond kunnen bewegen. Dit doen ze dan ook constant en normaal gesproken in een willekeurige richting. Hoe hoger de temperatuur van de geleider, hoe sneller de beweging van de elektronen. De elektronen kunnen echter niet zomaar aan de geleider ontsnappen. In deze zin zijn ze vrij,

maar toch gevangen in hun 'gouden kooi'. We spreken van een *stroom* van A naar B als er gemiddeld genomen meer elektronen van B naar A stromen dan andersom. (A en B zijn hier omgedraaid: volgens de definitie van stroom is die tegengesteld aan de richting waarin de negatieve elektronladingen bewegen.)

Dit is te vergelijken met vissen in een vijver. De vissen zijn de elektronen, en het water de geleider. Ook vissen zwemmen ogenschijnlijk maar wat rond. Meestal gaan ze rechtdoor totdat ze iets tegenkomen zoals een andere vis of de rand van de vijver. Hoe kouder het water, hoe langzamer de vissen bewegen. Ook kunnen vissen niet zomaar uit de vijver.



Afbeelding 2. Vissen in een vijver. De vissen in het water zijn als de elektronen in een geleider. Afbeelding: Wikipedia-gebruiker CyberCop.

Spin

Nu we de eigenschap 'lading' besproken hebben is het dan eindelijk tijd voor de *spin* van een elektron. Spin zou je kunnen zien als 'draaiing', zoals ook een tol een hoeveelheid 'draaiing' kan hebben. Er is echter een aantal belangrijke verschillen tussen draaiing en spin.

Het belangrijkste verschil is dat een bepaalde hoeveelheid draaiing een *toestand* van de tol is, maar dat spin een *eigenschap* van het elektron is. Een tol kan sneller of langzamer draaien maar de hoeveelheid spin van een elektron is altijd dezelfde. Wat wel kan veranderen is de richting van de spin. Hoewel spin dus op draaiing lijkt, is het een eigenschap die we niet in het dagelijks leven kennen. Spin is alleen op quantumniveau meetbaar.

Uit experimenten blijkt dat een meting van de richting van de spin langs een vooraf bepaalde as maar twee mogelijke uitkomsten heeft. De toestanden van het elektron die horen bij deze meetuitkomsten noemen we *spin up* en *spin down*. In de vergelijking met de tol zou dat overeenkomen met 'tol draait linksom' en 'tol draait rechtsom'. Zoals we in het vorige deel zagen kunnen in de quantummechanica ook superposities voorkomen: de toestand vóór de meting kan daarmee dus ook een combinatie van spin up en spin down zijn.

Elektronspin als qubit

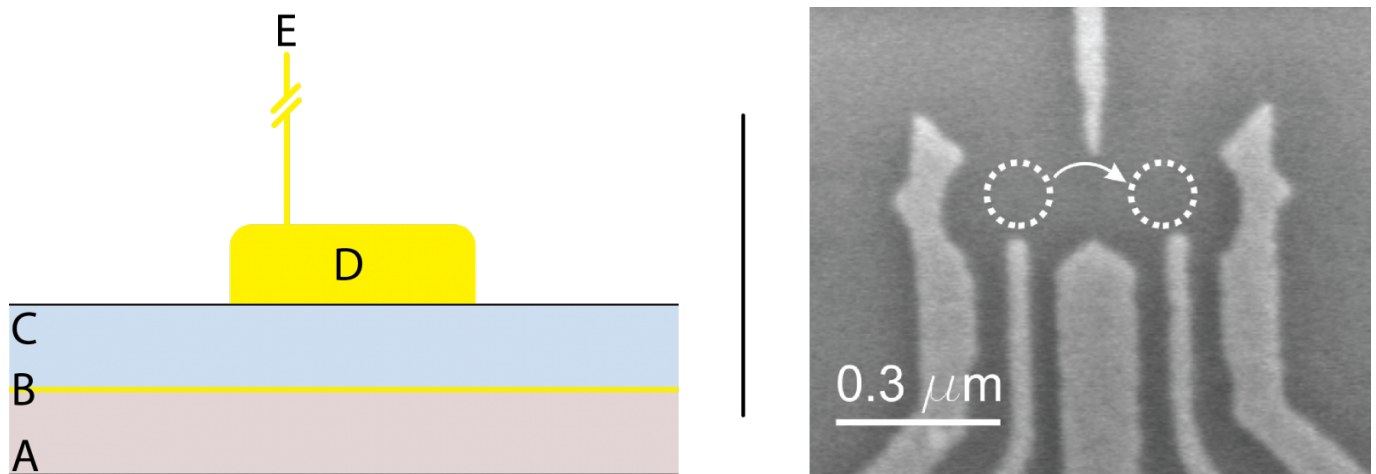
De oplettende lezer heeft misschien al gemerkt dat we nu alle ingrediënten voor een qubit in huis hebben: een quantummechanisch systeem waarvan de toestandruimte wordt gevormd door het oppervlak van een bol. De bol is hier in het spel gekomen doordat we naast de toestanden spin up en spin down ook superposities moeten kunnen aanwijzen – zie het [vorige deel](#) voor meer details daarover. We kunnen afspreken dat '0' staat voor de toestand spin up, en '1' voor de toestand spin down.

Maar hoe verander je nu de toestand van de qubit? Elektromagnetische golven beïnvloeden de spin van een elektron. Natuurkundigen begrijpen heel gedetailleerd hoe deze invloed werkt, en zijn daardoor in staat de spin van een elektron heel precies te veranderen. In andere woorden: door 'met wat lading te schudden' kunnen ze het punt dat wordt aangewezen op de Blochbol ([zie deel 2](#)) heel precies besturen.

Ondanks het feit dat er overal in de natuur ontzettend veel elektronen zijn is het erg moeilijk

om een enkel elektron te vangen. Dat is nu gelukt door in een geleider met behulp van lading van buitenaf een val te zetten waar precies één elektron in past. Zo'n val, die men ook wel een quantumdot^[1] noemt, werkt als volgt.

Allereest neemt men een plat stuk van een bepaald materiaal A. (Zie afbeelding 3.) Daarbovenop maakt men een stuk van een bepaald materiaal C vast. Het blijkt dat, bij de juiste keuze van materialen, hoewel A en C zelf geen echte geleiders zijn, het *contactoppervlak* van materiaal A en C wel geleiding toestaat. Het contactoppervlak is dus als een tweedimensionale geleider, en die noemen we B. Als je wilt kun je denken aan een vijver die zo plat is dat de vissen niet boven of onder elkaar door kunnen.



Afbeelding 3. Een quantumdot. Links: een schematische weergave van de doorsnede van een quantumdot. Rechts: bovenaanzicht van twee quantumdots. De lichtgrijze delen zijn de draden D, en het donkergrijze gebied is materiaal C. De twee elektronen worden gevangen onder de gestippelde circels, in geleider B. De pijl geeft aan, dat men ook in staat is een elektron van de ene naar de andere quantumdot te verplaatsen. Afbeelding rechts: Lieven Vandersypen, QuTech.

Vervolgens maakt men bovenop materiaal B wat draden van een geleider, zoals goud. De verzameling van deze draden noemen we D. Deze draden gaan uiteindelijk naar apparaten E waarmee heel precies de hoeveelheid lading op elk van de draden in D afzonderlijk geregeld kan worden. Ook kunnen we met deze apparaten lading in D laten schudden. Hierdoor ontstaan er elektromagnetische golven. Zo kunnen we met behulp van ladingen in D de elektronen in B manipuleren.

Op deze manier is het mogelijk om een 'val' in B te zetten waar precies één elektron in past.

De elektronen worden zo gevangen onder de gestippelde cirkels op het bovenaanzicht. Om de elektronen in hun val te houden moeten ze echter niet te veel bewegen. Dit wordt bereikt door het geheel A-D af te koelen tot een paar graden boven het absolute nulpunt. Als al het bovenstaande perfect lukt, hebben we de perfecte qubit.

Deze techniek heeft verschillende voor- en nadelen. Een van de grootste voordelen is dat de apparaten waarmee de draden D worden aangebracht al bestaan. Met dezelfde apparaten worden op dit moment namelijk ook gewone chips gemaakt. Het is dus relatief goedkoop om de draden D aan te brengen.

Het grote nadeel is echter, dat het geheel A-D gekoeld moet worden tot een paar graden boven het absolute nulpunt. Dit kan door het in een extreem koude koelkast te stoppen. Het probleem is echter dat het niet mogelijk is om de apparatuur die de qubit aanstuurt ook zo koud te krijgen. De draden moeten dus vanaf de apparatuur door de wand van de koelkast naar de qubits. Helaas geleiden de draden naast stroom ook warmte! Een van de redenen dat er nog geen quantumcomputers bestaan met meer dan ongeveer 10 qubits, is dat men niet genoeg draden naar de qubits kan krijgen terwijl ze ook nog koud genoeg blijven.

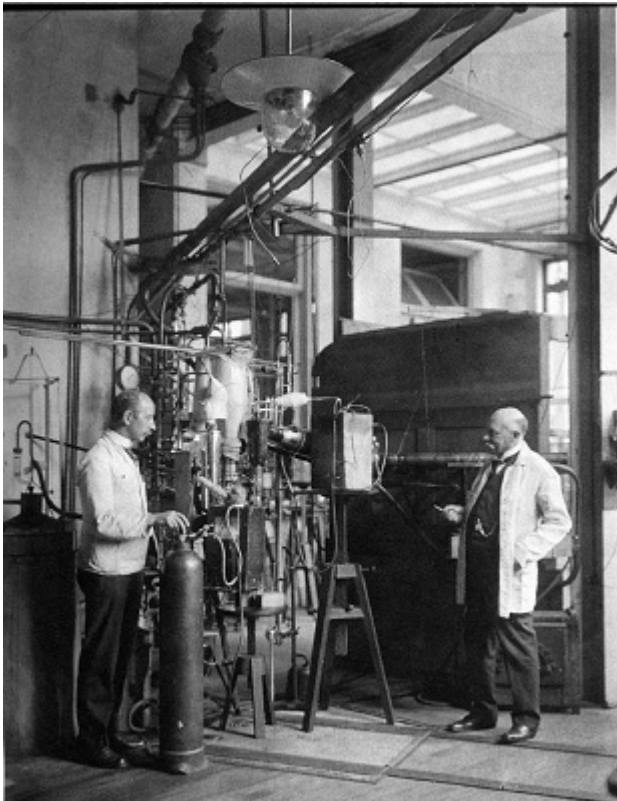
Ironisch genoeg zaten de ontwikkelaars van de normale computer in het begin met een vergelijkbaar probleem. Zoals Richard Feynman rond 1987 al schreef over normale computers^[2]:

Most theorists don't notice that wire space is a problem. For them a wire is an idealized thin string that doesn't take up any space, but real computer designers soon discover that they just can't get enough wires in.

- Richard Feynman

Supergeleidende qubits

In 1911 werd er in Leiden een spectaculaire ontdekking gedaan: wanneer de temperatuur onder een bepaalde waarde kwam, ondervond een elektrische stroom door een geleider (in dit geval kwik) *geen enkele* weerstand meer. Dit effect werd [supergeleiding](#) genoemd.



Afbeelding 4. G. J. Flim en H. Kamerlingh Onnes. G. J. Flim (links) en H. Kamerlingh Onnes bij de installatie voor het maken van vloeibaar helium, dat werd gebruikt voor het koelen van het kwik. Foto: [Leiden Institute of Physics](#).

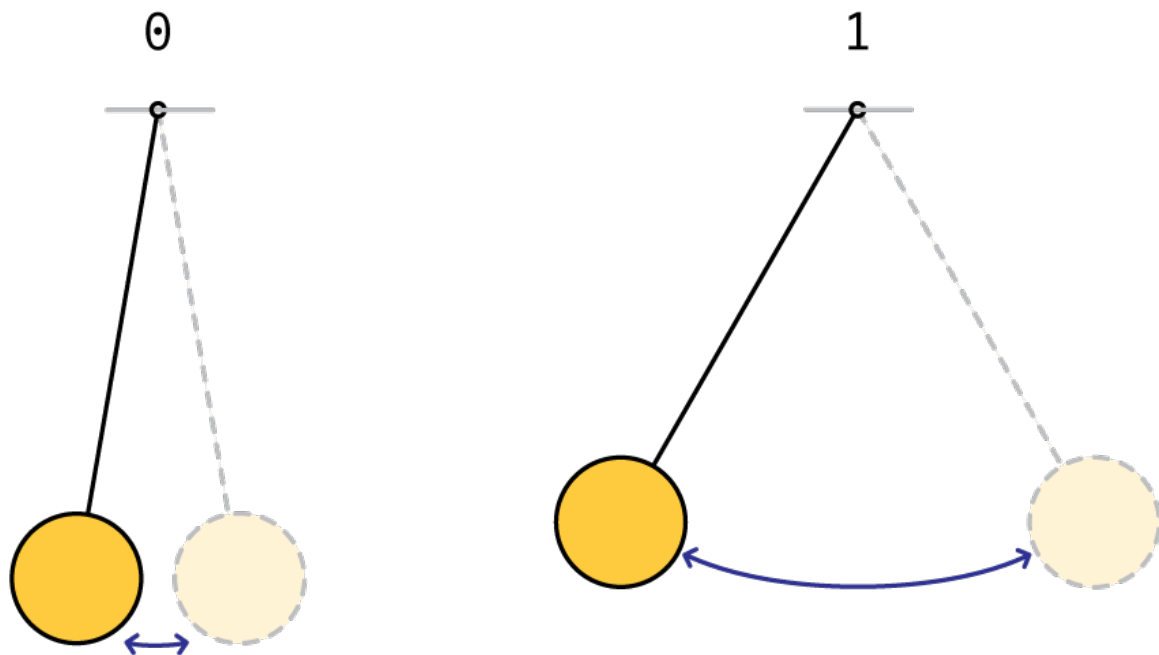
Nu, meer dan honderd jaar later, weten we nog maar deels hoe supergeleiding werkt. Er valt dus nog genoeg te verklaren! Gelukkig begrijpen we supergeleiding al wel goed genoeg om er qubits mee te maken. Onder andere in bij QuTech in Delft, op nog geen 20 km van de plek waar supergeleiding ontdekt werd, worden zulke qubits gebruikt voor het onderzoek naar quantumcomputers.

Die supergeleidende qubits werken als volgt^[3]. Naast het feit dat de elektronen langzamer gaan als je de temperatuur steeds lager maakt, gedragen ze zich daarbij ook steeds 'quantummechanischer'. Bij de temperaturen waarbij supergeleiding optreedt, vormen de elektronen een zogenaamd *condensaat*. Je zou dit condensaat als één quantummechanisch geheel van elektronen kunnen zien.

Met behulp van elektromagnetische golven kan er een zetje aan dit geheel worden gegeven. Omdat de elektronen niet zomaar uit de geleider kunnen, maar verder geen enkele weerstand ondervinden, gaat het geheel heen en weer. Dit is goed te vergelijken met het

heen en weer gaan van een slinger.

Nu blijkt dat we de elektronen op twee manieren heen en weer kunnen laten gaan: 'zacht' of 'hard', en dit zijn precies de toestanden die we respectievelijk '0' en '1' noemen. Omdat dit quantummechanische systeem in twee mogelijke toestanden kan zijn, en dus ook in superposities van die toestanden, hebben we weer een qubit.



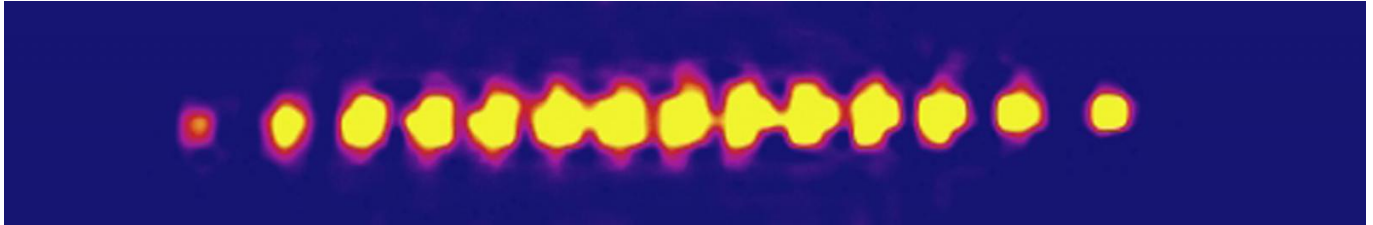
Afbeelding 5. Een slinger.In een supergeleidende qubit gaan de elektronen heen en weer als een slinger.

De voor- en nadelen van de supergeleidende qubit zijn voor een groot deel gelijk aan die van de elektronspin-qubit. De supergeleidende qubit en de draden die de qubit aansturen kunnen ook hier met reeds bestaande technieken gefabriceerd worden. Het nadeel is weer dat de supergeleidende qubit, en daarmee de chip waar hij op zit, heel koud moet zijn.

Ionen

Atomen bestaan uit een kern met daaromheen een aantal elektronen. De kern is positief geladen en de elektronen zijn negatief geladen. Dat ladingsverschil is precies wat de deeltjes bij elkaar houdt. Normaal gesproken is het aantal elektronen precies zo, dat het atoom als geheel neutraal (oftewel ongeladen) is. Wat echter ook voor kan komen, is dat een atoom

een elektron 'te weinig' heeft. In dat geval mist er één negatieve lading, en heeft het geheel dus een lading $+e$. Als het bijvoorbeeld om een calciumatoom gaat dat een elektron mist, dan noemen we dat een calcium-ion. Als je niet wil specificeren over welk atoom het precies gaat, zeg je gewoon 'ion'.

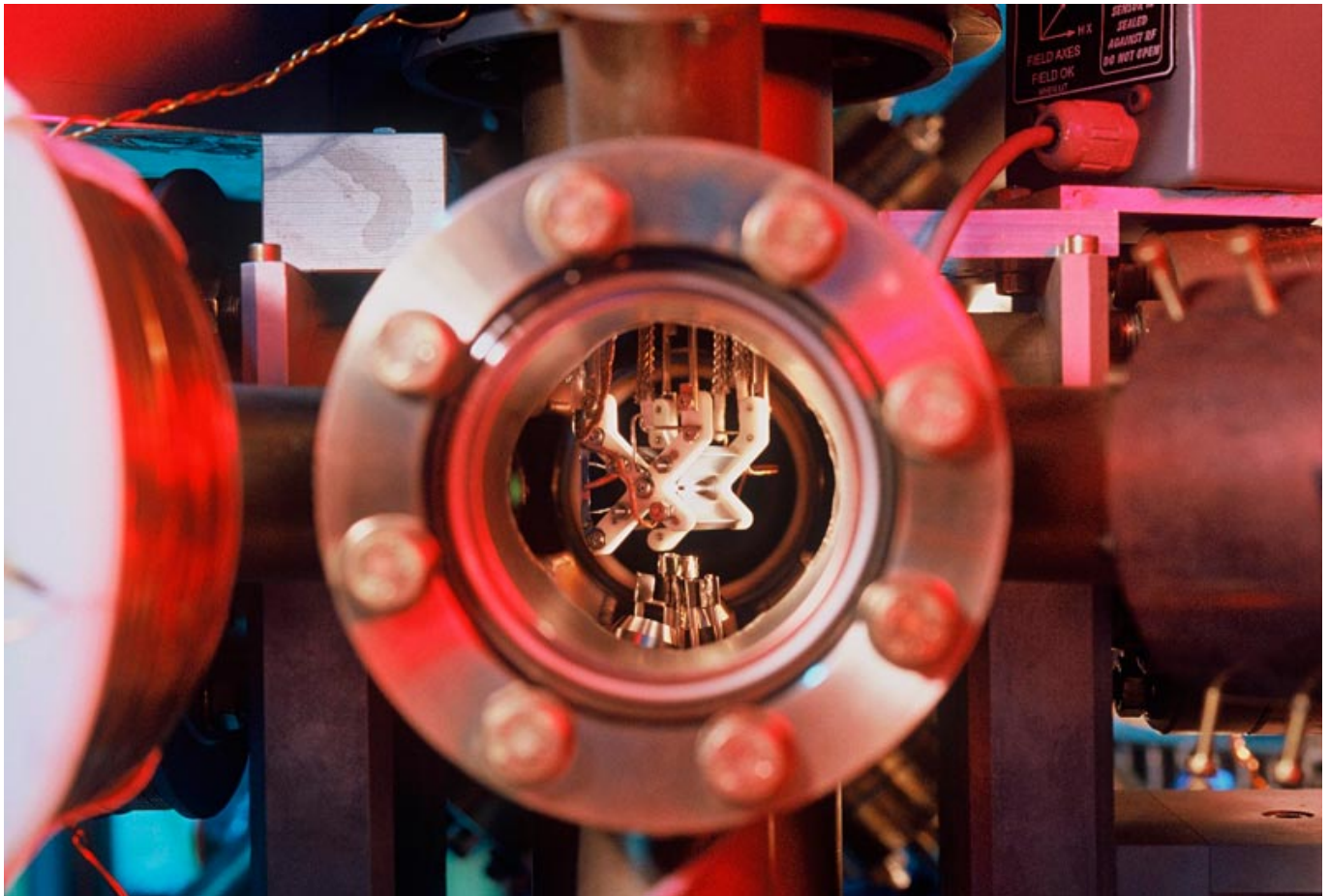


Afbeelding 6. Ionen.Een foto van 14 afzonderlijke calcium-ionen, zwevend in een vacuüm. De breedte van het geheel is in werkelijkheid minder dan een halve millimeter. Afbeelding: Universiteit van Innsbruck.

Zoals we al eerder bespraken kun je een geladen deeltje, zoals een elektron of een ion, manipuleren met behulp van andere ladingen en elektromagnetische golven. Met een combinatie van die twee technieken is het zelfs mogelijk om ionen te laten zweven!

Daarvoor moeten de ionen zich wel in een verder lege ruimte bevinden. Anders hebben ze namelijk te veel last van andere deeltjes (lucht) die tegen ze aanbotsen. Zo'n lege ruimte maakt men door een holle bol te nemen en vervolgens alle lucht eruit te pompen. Er ontstaat dan een vacuüm, en zo'n bol wordt dan een vacuümkamer genoemd. De vacuümkamer heeft vaak ook wat doorzichtige kijkgaten zodat je kan zien wat er binnen gebeurt. Men kan ook met lasers door de kijkgaten heen schijnen, wat nodig is om de toestand van de ionen te kunnen manipuleren.

De doorzichtige kijkgaten lijken heel veel op de patrijspooten van een schip of onderzeeër. Dat is eigenlijk wel logisch, omdat zo'n vacuümkamer net een onderzeeër is, maar dan is er buiten lucht in plaats van water, en is er binnen op de ionen na een vacuüm in plaats van lucht.



Afbeelding 7. Een vacuümkamer. Een kijkje door een van de patrijspooten van een vacuümkamer. Het witte voorwerp in het midden vormt de behuizing voor de grijze geleiders, die op hun beurt de ionen in het centrum van het geheel laten zweven. Door de letters rechtsboven kun je een idee krijgen van de grootte van de vacuümkamer. Afbeelding: C. Lackner / Universiteit van Innsbruck.

Dat we individuele ionen kunnen laten zweven is op zich al een ongelooflijke prestatie, helemaal als je beseft dat natuurkundigen rond 1900 nog debatteerden over het bestaan van atomen! Maar hoe kunnen we ionen nu ook nog gebruiken als qubits?

Het blijkt dat ionen, als geheel, ook een spin hebben. Die totale spin ontstaat uit een samenspel van alle onderdelen van het ion^[4]. Deze spin kan weer worden gemanipuleerd met elektromagnetische straling, zoals laserlicht.

Het voordeel van deze methode is dat de qubits erg stabiel zijn en dat hun toestand heel precies te besturen en te meten is. Het nadeel is, dat de benodigde apparatuur niet zomaar ergens te bestellen is. De onderzoekers moeten vaak zelf het juiste laserlicht maken, en dat

kost erg veel tijd.

Fotonen en topologische qubits

Twee methoden die we hier slechts kort zullen bespreken maken respectievelijk gebruik van fotonen en de zogenaamde *topologische qubits*. Fotonen zitten niet graag op één plek. Daardoor zijn ze waarschijnlijk niet zo geschikt voor het opslaan van quantuminformatie. Ze zijn echter wel geschikt voor het versturen van qubits naar een andere quantumcomputer. In zo'n geval spreekt men eerder van *quantumcommunicatie*.

Ook de 'topologische qubits', waarin de informatie wordt opgeslagen aan de hand van [topologie](#), zijn in dit dossier een vreemde eend in de bijt. Er is nog nooit een berekening gedaan met behulp van deze qubits, en sommige onderzoekers vragen zich af of dat ooit gaat lukken. Als de eerste berekening met deze qubits gedaan is, is dat zeker een nieuw stukje op deze website waard!

Toepassingen

Men zou zich terecht af kunnen vragen waar quantumcomputers nu eigenlijk goed voor zijn. Is het ontsleutelen van beveiligde berichten al die moeite waard? Willen we überhaupt wel dat dit mogelijk is? Gelukkig kunnen quantumcomputers juist ook gebruikt worden om berichten nog veel beter te versleutelen, maar dat is slechts een van de vele positieve toepassingen.

De reden dat we verder niet zo stil hebben gestaan bij de toepassingen is dat het er simpelweg veel te veel zijn: in werkelijk elke situatie waar [moeilijke problemen](#) opduiken kunnen quantumcomputers mogelijk van dienst zijn. En moeilijke problemen duiken overal op! Hierbij kun je onder andere denken aan het simuleren van natuurkundige processen, het vinden van nieuwe materialen, het doorrekenen van chemische reacties en het vinden van nieuwe medicijnen.

De toekomst

Allereerst een korte terugblik. In dit dossier hebben we gezien dat *sommige* problemen die voor een normale computer moeilijk zijn, voor een quantumcomputer makkelijk zijn. Dit is mogelijk doordat ze gebruik maken van de bijzondere regels van de quantummechanica, en

dan met name het zogenaamde quantumparallelisme.

Bij de ontwikkeling zijn al heel wat grote bedrijven betrokken, maar voor het grootste deel staat de quantumcomputer nog in de kinderschoenen, oftewel de universiteitslaboratoria. Ondanks de enorme technische vooruitgang die al is geboekt zijn we er nog lang niet. Zo is er nog nooit een quantumberekening gedaan die niet ook in een fractie van een seconde door een simpele laptop gedaan zou kunnen worden.

Hoe zit dat in de toekomst? De belangrijkste mijlpaal zal het moment zijn dat een quantumcomputer wel een probleem oplost dat te moeilijk is voor een normale computer. Dan pas zal de superioriteit van quantumcomputers (de zogenaamde *quantum supremacy*) echt zijn aangetoond. Niet iedereen is ervan overtuigd dat het ooit zover komt, maar voor de meeste wetenschappers lijkt het slechts een kwestie van tijd.

Het is moeilijk te voorspellen wat er na dit punt gebeurt omdat er dan 'feedback' kan optreden. Een quantumcomputer is namelijk ideaal voor het ontwerpen van een nog betere quantumcomputer. Wellicht zullen quantumcomputers daardoor een ontwikkeling gaan doormaken die te vergelijken is met de onwaarschijnlijk grote ontwikkeling die normale computers doorgemaakt hebben.

Gelukkig is het leuke van onderzoek juist dat je van tevoren niet weet wat er gaat gebeuren. De spanning die daarbij hoort is een van de redenen dat onderzoekers zo graag onderzoeken!

^[1] Specifiek is de quantumdot die we hier beschrijven de elektrostatische quantum dot. Een andere vorm is de self-assembled quantum dot. In plaats van een elektrostatische val gebruikt men daar defecten in een halfgeleider.

^[2] New directions in physics: the Los Alamos 40th anniversary volume, Academic Press, 1987.

^[3] Er zijn verschillende soorten supergeleidende qubits, die allemaal in detail van elkaar verschillen. We hebben hier specifiek de *transmon-qubit* in gedachten.

^[4] Specifiek hebben we het nu over de zogenaamde hyperfijn-qubits. De hyperfijn-qubits gebruiken andere toestanden dan de zogenaamde optische qubits. Laatstgenoemde toestanden worden gebruikt in de groep waar de afbeeldingen vandaan komen.