

Quantumbits

verliezen spontaan quantum

Qubits, de fundamentele bouwstenen voor de quantumcomputer, kunnen hun informatie maar voor een beperkte tijd vasthouden; tenminste wanneer die qubits bestaan uit een groot aantal deeltjes. Deze conclusie op basis van een theoretische beschouwing die we onlangs hebben gepubliceerd [1], kan een onverwachte horde zijn op de weg naar het bouwen van een quantumcomputer, waaraan veel natuurkundigen werken. Jasper van Wezel, Jeroen van den Brink en Jan Zaanen

vanwezel@lorentz.leidenuniv.nl



Jasper van Wezel heeft natuurkunde gestudeerd in Leiden. Na zijn afstuderen in 2003 is hij in Leiden gebleven en werkt hij aan zijn promotieonderzoek in de groep van Jeroen van den Brink en Jan Zaanen. Zijn onderzoeksgebied is de theoretische gecondenseerde materie.

Jeroen van den Brink studeerde natuurkunde in Groningen. Tijdens zijn promotie deed hij theoretisch onderzoek naar eigenschappen van stoffen met sterke elektron-elektron wisselwerkingen. Na een postdoc bij het Max Planck Instituut in Stuttgart werd hij universitair docent aan de Universiteit Twente. Drie jaar geleden stapte hij over naar het Lorentz Instituut voor Theoretische Natuurkunde van de Universiteit Leiden als FOM-springplanker. Onlangs werd hij benoemd als bijzonder hoogleraar in de theorie van de gecondenseerde materie aan de Radboud Universiteit Nijmegen.

Na zijn promotie in Groningen in 1986 en een langdurig verblijf in het buitenland (Max Planck Instituut Stuttgart, Bell Laboratories) is Jan Zaanen sinds 1993 verbonden aan het Lorentz Instituut van de Universiteit Leiden, eerst als KNAW-fellow en sinds 2000 als hoogleraar. Hij is een theoretische gecondenseerde-materiefysicus met een belangstelling variërend van biofysica tot quantumzwaartekracht, met een nadruk op collectief quantumgedrag.

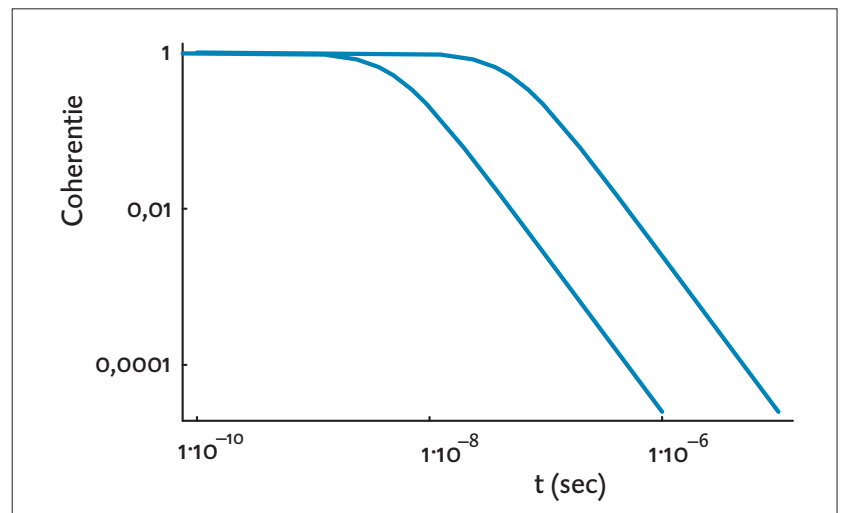
stroom van miljarden elektronen in een supergeleidende ring, die tegelijkertijd linksom ('0') en rechtsom ('1') kan draaien [2]. Een ander, minstens zo spectaculair voorbeeld is een Bose-condensaat van miljoenen atomen dat in een superpositie van twee verschillende plaatsen gebracht kan worden [3].

Dankzij deze quantummechanische eigenschap kan een qubit geprepareerd worden in elke willekeurige superpositie van '0' én '1'. Die extra vrijheid heeft informatici doen opveren. Zij ontwikkelen in de afgelopen jaren buitengewoon efficiënte quantumalgoritmen voor bijvoorbeeld het doorzoeken van een database (algoritme van Grover), of het in priemfactoren ontbinden van getallen (algoritme van Shor).

(DE)COHERENTIE

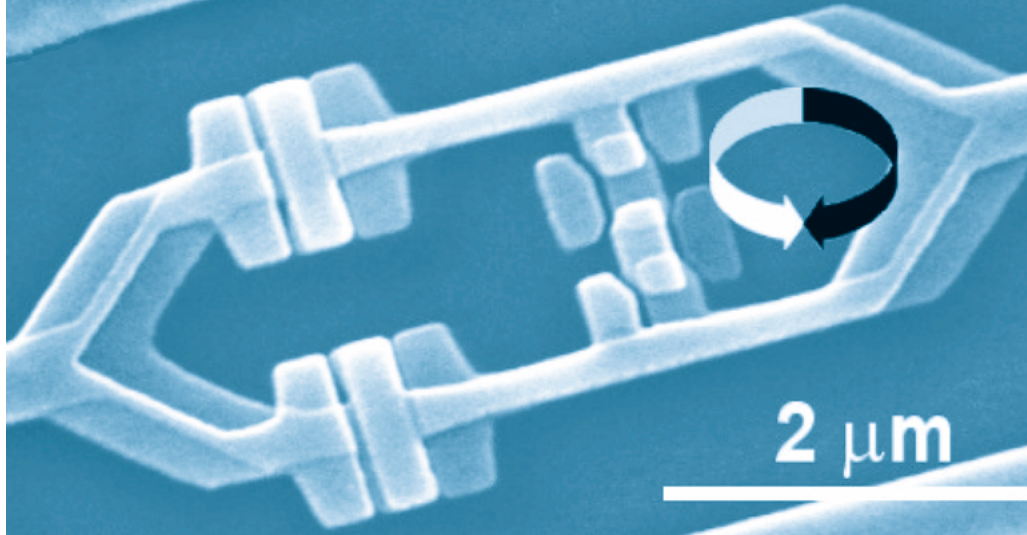
Door gebruik te maken van speciale quantumalgoritmes kan de quantum-

Een quantumcomputer werkt – net als een gewone, 'klassieke' computer – door bewerkingen uit te voeren op afzonderlijke informatie-eenheden. In de klassieke computer zijn dit de bits, die in twee verschillende toestanden kunnen verkeren: '0' of '1'. In de quantumcomputer worden de klassieke bits vervangen door *quantumbits*, oftewel *qubits*. De quantummechanica staat echter toe dat deeltjes (en ook grotere quantummechanische systemen) bestaan in combinaties of 'superposities' van toestanden. Een realisatie hiervan is bijvoorbeeld de



Figuur 1

De coherentie van een veel-deeltjesqubit als functie van de tijd (log-log-plot). Op de verticale as staat een maat voor coherentie: 1 betekent volledige quantumcoherentie, 0 een volledig gedecohererd systeem. De voor deze grafiek gebruikte temperatuur is 10 K, het aantal deeltjes 10^4 voor de onderste lijn en 10^5 voor de bovenste.



De kleine lus rechts is de qubit. In deze ring loopt een stroom van miljarden elektronen tegelijkertijd linksom en rechtsom door het metaal (zie de pijltjes). [bron: TUDelft, Hans Mooij]

informatie

computer dus bepaalde problemen oplossen die onmogelijk te behappen zijn met enige denkbare klassieke computer. Tenminste, in theorie. In de praktijk blijkt het maken en manipuleren van qubits een lastige opgave. Dé grote moeilijkheid waar alle typen in ontwikkeling zijn de qubits mee te maken hebben, is het zo lang mogelijk vasthouden van hun precieze quantumtoestand, oftewel het zo lang mogelijk coherent blijven (zie kader 'Decoherentie').

De coherentie van een qubit kan verloren gaan als er wisselwerking is tussen de qubit en zijn omgeving. Er ontstaat dan namelijk een quantummechanische verstrengeling van de golffunctie van de qubit met die van de omgeving. Dit betekent dat de precieze quantumtoestand van de qubit als het ware wordt uitgesmeerd over alle quantummechanische vrijheidsgraden die er zijn. Op een bepaald moment is zo alle quantuminformatie vanuit de qubit weggelekt naar de omgeving: de qubit is volledig gedecoherereerd. Na dit decoherentieproces bevat de qubit geen informatie meer en is dus onbruikbaar voor de verdere uitvoering van een quantum-algoritme.

De grootste uitdaging bij het construeren van een qubit is dus het afschermen van de omgeving. Uit ons onderzoek blijkt nu dat er zich nog een andere complicatie voordoet: zelfs veel-deeltjesqubits die volledig geïsoleerd zijn van hun omgeving blijken maar een beperkte tijd coherent te kunnen blijven. Deze qubits hebben dus last van een interne bron van decoherentie. Ze dragen als het ware een soort 'interne omgeving' met zich mee. Door de verstrengeling met deze 'interne omgeving' zal een N -deeltjesqubit na een tijd $t_{\text{dec}} = Nh/k_B T$ seconden (met h de constante van Planck

en k_B die van Boltzmann) zijn coherentie verloren hebben (zie figuur 1).

COLLECTIEVE EIGENSCHAPPEN

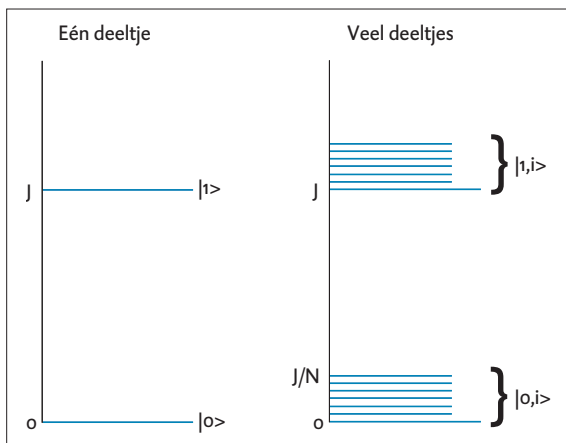
Het wezenlijke verschil tussen één-deeltje- en veel-deeltjessystemen is dat door de wisselwerkingen tussen de deeltjes nieuwe, collectieve eigenschappen in de veel-deeltjessystemen ontstaan. Deze collectieve eigenschappen bestonden nog niet in de geïsoleerde één-deeltjessystemen waaruit het collectief is opgebouwd. Een eenvoudig voorbeeld van

een collectieve eigenschap is de geluidssnelheid. Geluidsgolven kunnen zich alleen voortplanten in een medium waarin er veel deeltjes zijn die regelmatig botsen. Het is zinloos om te vragen naar de voortplantingssnelheid van geluid in een systeem met één atoom: geluidsgolven zijn een collectief effect, gedragen door de interacties tussen deeltjes. De wereld is vol met voorbeelden van zulk soort collectieve eigenschappen. Zo komt de rigiditeit van een vaste stof voort uit de wisselwerkingen tussen vele atomen,

Decoherentie

Neem aan dat de golffunctie van een qubit geprepareerd is als de superpositie van twee orthonormale toestanden, bijvoorbeeld als $|\text{qubit}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$. Deze golffunctie is genormaliseerd, immers $\langle \text{qubit} | \text{qubit} \rangle = 1$ omdat $\langle 0 | 0 \rangle = \langle 1 | 1 \rangle = 1$ en $\langle 0 | 1 \rangle = \langle 1 | 0 \rangle = 0$. Dat de qubit in een (coherente) superpositie van $|0\rangle$ en $|1\rangle$ verkeert kunnen we gemakkelijk bepalen door te kijken naar de verwachtingswaarde van de operator $|0\rangle\langle 1|$. In ons geval krijgen we $\langle \text{qubit} | 0 \rangle \langle 1 | \text{qubit} \rangle = \frac{1}{2}$. Als deze verwachtingswaarde nul wordt, dan is de qubit uit superpositie en dus ook niet langer coherent.

Laten we nu ook de omgeving van de qubit beschouwen. De totale golffunctie van het systeem van een geïsoleerde qubit en omgeving is simpelweg de productgolffunctie van de twee componenten: $|\text{systeem}\rangle = |\text{qubit}\rangle * |\text{omgeving}\rangle$. Als we nu de qubit aan zijn omgeving koppelen en kijken naar de tijdsevolutie, dan zal de tijdsevolutie van de omgeving ervan afhangen of de qubit in toestand $|0\rangle$ of $|1\rangle$ is: de toestand van de qubit zal de omgeving altijd een klein beetje beïnvloeden. Na enige tijd komt het systeem met de qubit uit ons voorbeeld dus in de toestand $|\text{systeem}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle * |\text{omgeving}_0\rangle + |1\rangle * |\text{omgeving}_1\rangle)$. Omdat de toestanden $|0\rangle$ en $|1\rangle$ hun omgeving echter op een net iets andere manier beïnvloeden, zullen de golffuncties $|\text{omgeving}_0\rangle$ en $|\text{omgeving}_1\rangle$ steeds meer van elkaar gaan verschillen. De consequentie hiervan is dat op den duur de qubit zijn coherentie zal verliezen: $\langle \text{systeem} | 0 \rangle \langle 1 | \text{systeem} \rangle = \frac{1}{2} \langle \text{omgeving}_0 | \text{omgeving}_1 \rangle \rightarrow 0$.



Figuur 2

Een schematische vergelijking van de toestanden in een typische één-deeltjequbit met die in een veel-deeltjesqubit. De extra toestanden die in het tweede geval verschijnen liggen zo dicht bij elkaar in energie (verticale as) dat ze praktisch ononderscheidbaar zijn.

net als de superstroom in een supergeleidende ring die dienst kan doen als qubit.

Het ontstaan van dit soort collectieve eigenschappen in een quantummechanisch systeem ('spontane symmetriebreking') wordt mogelijk gemaakt doordat in een veel-deeltjessysteem een deel van de aan het systeem beschikbare toestanden altijd maar heel weinig van elkaar verschillen. Zó weinig zelfs dat die toestanden in de praktijk volkomen ononderscheidbaar zijn (zie figuur 2).

DE 'INTERNE OMGEVING'

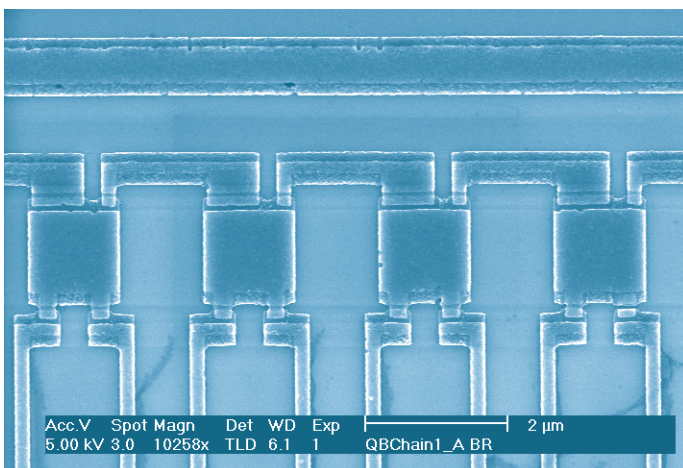
De groep van interne, ononderscheidbare toestanden in een veel-deeltjesqubit gedraagt zich precies hetzelfde als externe omgevingstoestanden: door de wisselwerkingen tussen de vele deeltjes in de qubit raken de '0' en '1' verstrengeld met de interne omgevingstoestanden en wordt de superpositie van '0' en '1' als het ware uitgesmeerd over de om-

geving. Juist omdat de toestanden in die interne omgeving ononderscheidbaar zijn, is de oorspronkelijke quantumtoestand van de qubit (de superpositie van '0' en '1') dan niet meer te achterhalen, en is het systeem dus gedecohererd.

De tijdschaal t_{dec} waarop deze vorm van decoherentie plaatsvindt blijkt voor de huidige qubits veel langer te zijn dan de tijdschaal waarop de 'conventionele', externe omgeving decoherentie veroorzaakt. Maar gezien de snelle vooruitgang in de ontwikkeling van dit soort qubits verwachten wij dat deze nieuwe tijdschaal binnen twee of drie jaar gemeten zal kunnen worden.

REFERENTIES

- 1 J. van Wezel, J. van den Brink en J. Zaanen, 'An intrinsic limit to quantum coherence due to spontaneous symmetry breaking', *PRL* **94** (2005), 230401.
- 2 I. Chiorescu, Y. Nakamura, C.J.P.M. Harmans en J.E. Mooij, *Science* **299** (2003), 1869.
- 3 E.A. Donley, N.R. Claussen, S.T. Thompson en C.E. Wieman, *Nature* **417** (2002), 529.



Een keten van qubits. De qubits (half zichtbaar onderin) zijn gekoppeld via een gezamenlijke junctie met naaste burens. Het doel is om transmissie van quantuminformatie over vele qubits te onderzoeken. [Foto: Kavli NanoScience Instituut/TU Delft]