

# Magnetische roosters van koude atomen als quantumsimulators

**We creëren tweedimensionale roosters van ultrakoude atomen, vastgehouden boven een chip, door patronen te etsen in een dunne laag gemagnetiseerd materiaal. Om quantumsimulatie te realiseren willen we interacties induceren door hooggeëxciteerde Rydbergniveaus aan te slaan. Anderzijds willen we ook roosters met een zodanig kleine roosterafstand realiseren dat interactie tot stand komt via sterke quantumtunneling.**

Arthur L. La Rooij en Robert J.C. Spreeuw

162

## Feynmans visie

De quantummechanica lijkt in beginsel bruikbare recepten te bieden om van een microscopisch systeem de mogelijke energietoestanden te berekenen of de evolutie in de tijd te volgen. In 1982 signaleerde Richard Feynman dat deze recepten in de praktijk toch niet zo bruikbaar zijn, met name als we te maken hebben met veel-deeltjessystemen [1]. Hij liet onder meer zien hoeveel ruimte in het geheugen van een klassieke computer nodig is om een veeldeeltjes-quantumtoestand zelfs maar te representeren. Het probleem is dat deze benodigde ruimte *exponentieel* toeneemt met het aantal quantumdeeltjes. Als het toevoegen van een enkel

deeltje bijvoorbeeld tot verdubbeling van de benodigde *resources* ('hulpbronnen') leidt, is zelfs de grootste supercomputer al snel niet meer toereikend. Feynman stelde daarom voor om een quantumsysteem te simuleren door een ander quantumsysteem of quantumcomputer. Op het eerste gezicht lijkt het weinig zinvol om het ene quantumsysteem in te ruilen voor het andere. Toch kan dit grote winst betekenen als de simulator toegankelijk is voor metingen en parameters naar believen kunnen worden aangepast.

## Roosters van neutrale atomen

Roosters van koude, neutrale atomen lenen zich uitstekend voor de implementatie van quantumsimulators, van bijvoorbeeld modellen uit de vaste stof. Een doorbraak was de demonstratie van een quantumfaseovergang tussen een Mottisolator en een supergeleider [2]. Dit experiment kan worden gezien als een quantumsimulatie van het Bose-Hubbardmodel (zie kader *Quantumdeeltjes op een rooster*). Een andere grote klasse van modellen bestaat uit roosters van

effectieve spins, met twee toestanden ('op' en 'neer'), die op een toestandsafhankelijke manier wisselwerken met hun naaste burens. De bekendste varianten zijn de Ising- en Heisenbergmodellen. Quantumsimulators zouden meer licht kunnen werpen op problemen als quantummagnetisme of hoge-Tc-supergeleiding.

In de meest gangbare methode worden atomen vastgehouden in een optisch rooster, het regelmatige patroon van knopen of buiken in een interferentiepatroon van laserbundels. In Amsterdam hebben we echter een

Arthur La Rooij studeerde in 2012 af als Master in de theoretische natuurkunde aan de Universiteit van Amsterdam. Sindsdien doet hij zijn promotieonderzoek aan het Van der Waals-Zeeman Instituut voor experimentele natuurkunde, eveneens aan de Universiteit van Amsterdam.



Robert Spreeuw studeerde en promoveerde (1991) aan de Leidse Universiteit op een onderwerp in de *quantumoptica*. Na postdocperiodes aan NIST (Gaithersburg, VS) en in Konstanz kwam hij naar Amsterdam. Aanvankelijk met een KNAW fellowship startte hij hier onderzoek met koude atomen nabij oppervlakken en in het bijzonder op magnetische-film atoomchips, gemotiveerd vanuit een interesse in quantuminformatie en simulatie.



R.J.C.Spreeuw@uva.nl

## Quantumdeeltjes op een rooster

Atomen in optische of magnetische roosters en elektronen in een eenvoudig kristal worden vaak beschreven met behulp van het Hubbardmodel. Voor bosonen:

$$H = -J \sum_{\langle ij \rangle} a_i^\dagger a_j + \frac{U}{2} \sum_i a_i^\dagger a_i^\dagger a_i a_i$$

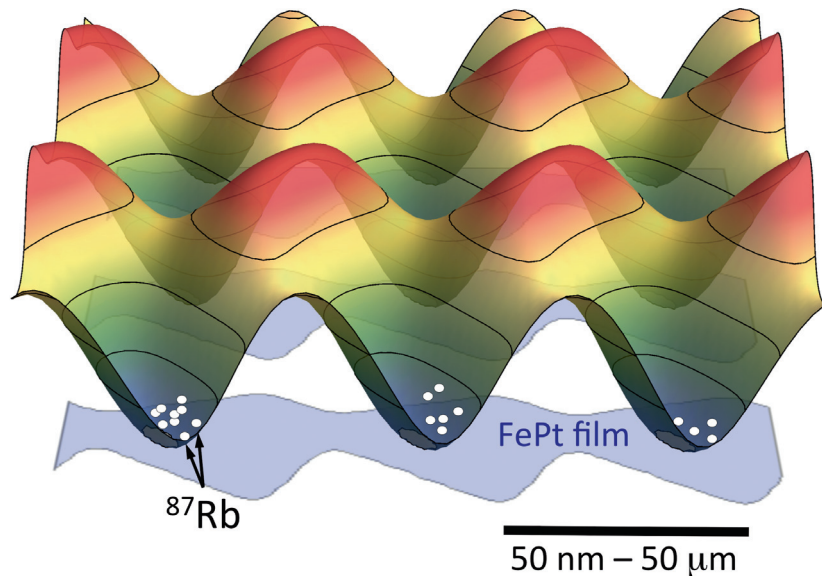
In deze Hamiltoniaan beschrijft  $J$  de tunnelamplitude voor deeltjes van plek  $j$  naar plek  $i$  en is  $U$  (meestal  $U > 0$ ) de interactie-energie van deeltjes op dezelfde plek. Als  $U \gg J$  zullen deeltjes zich zoveel mogelijk verspreiden over verschillende posities en wordt tunnelbeweging onderdrukt.

Deze toestand is analoog met een isolator waarin elektronen vast zitten op een roosterpunt omdat als ze bewegen de totale energie toeneemt. Als daarentegen  $J \gg U$  dan gaan alle deeltjes tunnelen en beschrijft het systeem een (super)fluidum (of geleider).

Een natuurlijke energieschaal om  $J$ ,  $U$ ,  $J^2/U$  in uit te drukken is de *lattice recoil*  $E_r$ , de kinetische energie van een deeltje met een golflengte gelijk aan de roosterconstante. Deze schaal met de roosterafstand  $d$  als  $E_r \propto 1/d^2$ . Door de roosterafstand te verkleinen kunnen we aldus de Hubbardparameters  $J$  en  $U$  groter maken.

alternatieve methode ontwikkeld om roosters van atomen te maken, die interessante nieuwe mogelijkheden biedt. Deze methode is gebaseerd op lithografisch gedefinieerde structuren op een zogenaamde atoomchip. Atomen zweven in spin-gepolariseerde toestand vlak boven het oppervlak van deze chip. Ze worden daar vastgehouden in lokale minima van een magnetisch veld die fungeren als potentiaalputjes,  $V(r) \propto |B(r)|$ . Deze putjes zijn ongeveer 0,5 mK diep. We houden hierin wolkjes atomen vast bij een temperatuur van 1-10  $\mu$ K. De chip zelf is gewoon op kamertemperatuur. Het veld wordt gegenereerd door een gemagnetiseerde film die in een speciaal ontworpen patroon is geëtst.

In figuur 1 zien we een patroon dat geoptimaliseerd is voor roosters met vierkante symmetrie, samen met het magnetische potentiaallandschap. Het ontworpen patroon wordt geëtst uit een 200 nm dikke laag van FePt. Na het etsen wordt de laag gemagnetiseerd in de richting loodrecht op het oppervlak. In figuur 2 zien we een afbeelding van enkele honderden kleine wolkjes van koude atomen die vastgehouden worden in een magnetisch rooster. In dit geval zijn een vierkant en een hexagonaal rooster gecombineerd in een interface, als demonstratie van één van de bijzondere mogelijkheden die magnetische chips bieden [3]. In eerdere experimenten hebben we al gedemonstreerd dat we een rooster van honderden wolkjes tegelijk kunnen afkoelen tot de Bose-Einstein-faseovergang. We hebben ook laten zien dat we de atomen over de chip heen en weer kunnen bewegen als in een schuifregister, door externe magnetische velden te variëren [4].



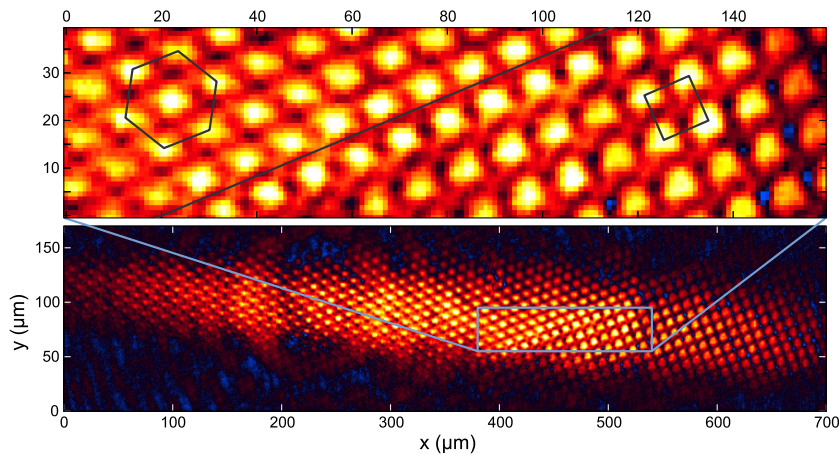
**Figuur 1** In een zig-zagvorm geëtste strips (lichtblauw) van een dunne laag FePt op een atoomchip. De laag is permanent gemagnetiseerd, loodrecht op het oppervlak. Daarboven weergegeven is het resulterende magnetische potentiaallandschap voor spingepolariseerde atomen. De hoogte van bergen en dalen is evenredig aan de grootte van het magnetische veld  $B$ , berekend op een vaste hoogte van één roosterconstante boven het oppervlak. De witte bolletjes stellen gevangen atomen voor.

Magnetische roosters op atoomchips bieden interessante nieuwe mogelijkheden ten opzichte van optische roosters. De roosterstructuur is bijvoorbeeld zo goed als vrij te kiezen. Verschillende roostersymmetrieën kunnen in één ontwerp worden gecombineerd, zoals in figuur 2, of desgewenst kan ook wanorde worden ingebouwd. De roosterconstante kan over een bereik van enkele ordegroottes worden gevarieerd.

In optische roosters is de roosterconstante meestal ongeveer 400 nm, gegeven door de halve golflengte van de gebruikte laser. Daarentegen mikken we met onze magnetische roosters op roosterconstanten die ofwel duidelijk groter, ofwel duidelijk kleiner zijn. Deze twee opties leiden ieder tot een ander type quantumsimulator [5].

### Grote roosterafstand met Rydbergwisselwerking

De eerste optie gaat uit van roosters met een roosterafstand van 5-10  $\mu$ m. Op iedere roosterpositie kan nu een quantum bit (qubit) gedefinieerd worden als coherente superpositie van hyperfijn-subniveaus van de elektronische grondtoestand; voor  $^{87}\text{Rb}$  liggen deze 6,835 GHz uit elkaar. Als we de twee niveaus  $|a\rangle$  en  $|b\rangle$  noemen, wordt de toestand van het qubit dus gegeven door  $\alpha|a\rangle + \beta|b\rangle$ . Dergelijke hyperfijn-qubits in neutrale atomen zijn erg geschikt om quantuminformatie op te slaan omdat in de elektronische grondtoestand de wisselwerking met de omgeving zwak is. De coherente superpositie kan dan potentieel seconden lang in stand blijven. De qubit kan gecodeerd



**Figuur 2** Absorptie-afbeelding van koude rubidiumatomen in een magnetisch rooster. We kijken hier loodrecht op het oppervlak. De atomen zweven ongeveer  $6\ \mu\text{m}$  boven het chipoppervlak. De wolkjes in het centrum van de afbeelding bevatten enkele honderden atomen. In dit geval zijn twee aangrenzende roosterstructuren zichtbaar, vierkant (rechts) en hexagonaal (links).

worden in een enkel atoom of ook in een wolkje van tientallen atomen. In het laatste geval wordt  $|a\rangle$  vervangen door een toestand waarbij alle atomen in het wolkje in  $|a\rangle$  zitten, en  $|b\rangle$  door een toestand waarbij precies één atoom in  $|b\rangle$  zit en de rest in  $|a\rangle$ . Dit laatste heet een collectieve excitatie.

De keuze voor een roosterafstand van  $5\text{-}10\ \mu\text{m}$  is een balans tussen twee vereisten. 1) De afstand is groot genoeg om naburige roosterposities (en dus qubits) in een optische afbeelding opgelost te kunnen zien. Dit is van belang voor de uitlezing van de qubits, maar ook om individuele qubits te adresseren met een gefocuseerde laserbundel. 2) De afstand is klein genoeg om naburige qubits met elkaar te laten wisselwerken door gebruik te maken van excitatie naar Rydbergniveaus: elektronisch hoog aangeslagen toestanden met hoofdquantumgetal  $50\text{-}100$ . Door hun grote dipoolmoment wisselwerken Rydbergatomen tot wel twaalf ordegrottes sterker dan atomen in de grondtoestand.

Rydbergatomen zijn echter minder geschikt om quantuminformatie te bewaren, omdat ze relatief kort leven. De beoogde oplossing is om de informatie te bewaren in de grondtoestand, maar te bewerken (met gate-operaties) tijdens een kortstondige excitatie naar de Rydbergtoestand. Voor dergelijke gate-operaties bestaan diverse theoretisch uitgewerkte voorstellen die gebaseerd zijn op het verschijnsel dipoolblokkade. Dit komt erop neer dat na laserexcitatie van een Rydbergatoom de verdere Rydbergexcitatie in de directe omgeving wordt

onderdrukt. Deze onderdrukking werkt binnen een afstand die de blokkadestraal genoemd wordt, en meestal ongeveer  $10\ \mu\text{m}$  bedraagt.

Elementaire gates tussen twee individuele atomen, op basis van dipoolblokkade, zijn experimenteel gedemonstreerd. Wij verwachten met onze magnetische roosters een schaalbare experimentele aanpak te kunnen ontwikkelen. Een voorstel om dit in het kader van een FOM-programma samen met onderzoekers van de TU Eindhoven aan te pakken is onlangs gehonoreerd.

### De kleinst mogelijke roosterafstand

In de tweede aanpak willen we de roosters omlaag schalen naar roosterafstanden die duidelijk kleiner zijn dan in optische roosters. Een van onze grootste uitdagingen op dit moment is het maken van een rooster met een periode van orde  $100\ \text{nm}$ . Deze afstandsschaal, die goed haalbaar is met behulp van elektronenbundellithografie, opent de weg naar quantumsimulatie van Hubbardachtige modellen in nieuwe fysische regimes en simulatie van andere, nieuwe systemen.

Veel experimenten die momenteel worden gedaan met optische roosters kunnen straks gedaan worden in kleinere, andere, of zelfs veranderende magnetische roosters. Overigens zijn Rydbergatomen voor dit type roosters niet meer bruikbaar omdat de atomen te dicht (eveneens ongeveer  $100\ \text{nm}$ ) bij het oppervlak zitten.

Naarmate de roosterafstand kleiner wordt, zullen de atomen sneller en

verder gaan tunnelen (zie kader *Quantumdeeltjes op een rooster*). In optische roosters tunnelen atomen effectief alleen tussen direct naast elkaar liggende vallen. De dubbele afstand, rond  $800\ \text{nm}$ , is te groot. Als we de roosterafstand verkleinen, worden ook hogere orde tunnелеffecten belangrijk, zoals tunnelen over twee posities (direct van  $i$  naar  $i+2$ ), tunnelen van paren (twee atomen van  $i$  naar  $i+1$ ), en *superexchange* (twee buuratomen wisselen van positie).

Door de afstandsschaal sterk te reduceren worden de energieschalen in het Hubbardmodel een à twee ordegrottes hoger. De thermische energie van de atomen mag dan ook navenant hoger zijn en de bijbehorende temperaturen worden dan eenvoudiger te bereiken. Zo hopen wij een quantumsimulator te bouwen die nog complexere quantumsystemen kan simuleren.

Behalve hogere energieschalen in het Hubbardmodel biedt deze aanpak nog vele andere mogelijkheden. Door zelf de magnetische patronen te schrijven kunnen wij niet alleen de roosterafstand maar ook de geometrie bepalen of deze zelfs langzaam of snel laten variëren, in de plaats (in de ontwerpfase) of in de tijd (tijdens het experiment). Dit laatste, het dynamisch in de tijd variëren van het potentiaallandschap, kan met behulp van externe magneetvelden. Op die manier kan niet alleen de mate van tunnelbeweging worden vergroot of verkleind (via de hoogte van de tunnelbarrières), maar ook de mate van anisotropie (tunnelen in verschillende richtingen).

Samengevat, met behulp van een magnetische dunne laag vangen we ultrakoude neutrale atomen in een rooster van vallen. Dit biedt een scala aan nieuwe mogelijkheden die verder gaan dan bestaande optische roosters. We verwachten in de komende jaren quantumsimulaties van interessante Hamiltonianen te doen. Stap voor stap wordt Feynmans droom werkelijkheid.

### Referenties

- 1 R. P. Feynman, *Int. J. Theor. Phys.* **21**, 467 (1982).
- 2 M. Greiner, et al., *Nature* **415**, 39 (2002).
- 3 V.Y.F. Leung, et al., *arXiv:1311.4512* (2013).
- 4 S. Whitlock, R. Gerritsma, T. Fernholz en R. J. C. Spreeuw, *New J. Phys.* **11**, 023021 (2009).
- 5 V.Y.F. Leung, A. Tauschinsky, N.J. van Druten en R.J.C. Spreeuw, *Quantum Inf. Process.* **10**, 955-974 (2011).