

Atoomchips

We beschrijven een tweetal experimenten op atoomchips. Atoomchips zijn microscopische magnetische structuren voor het vangen en manipuleren van koude atomen. Deze chips bieden nieuwe mogelijkheden om quantumgassen te bestuderen in bijzondere omstandigheden, en om koude atomen te gebruiken als qubits voor het verwerken van quantuminformatie.

Gerritsma, Van Amerongen, Van Es, Whitlock, Van Druten, Spreeuw

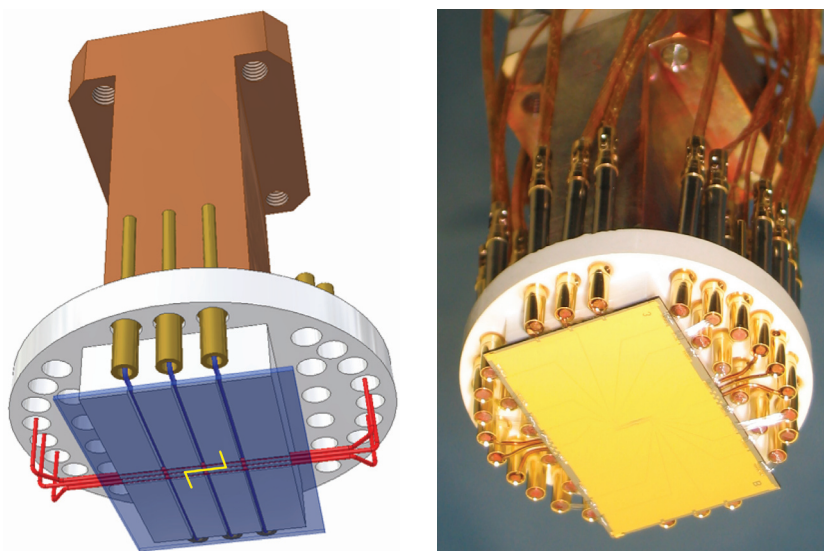
In het afgelopen decennium heeft het onderzoek naar gassen van ultrakoude atomen een grote vlucht genomen. De combinatie van laserkoeling en verdampingskoeling maakt het mogelijk temperaturen in het nanokelvin gebied te bereiken, waarbij de quantummechanische eigenschappen van de atomen dominant worden (een quantumgas). Het meest spectaculaire verschijnsel dat dan kan optreden, voor atomen met

heeltallige spin (bosonen), is Bose-Einsteincondensatie (BEC, zie NtVN 71, 160, mei 2005). Dit verschijnsel werd in 1995 voor het eerst waargenomen, wat in 2001 werd bekroond met een Nobelprijs voor Eric Cornell, Carl Wieman en Wolfgang Ketterle (zie NtVN 67, 336, nov. 2001).

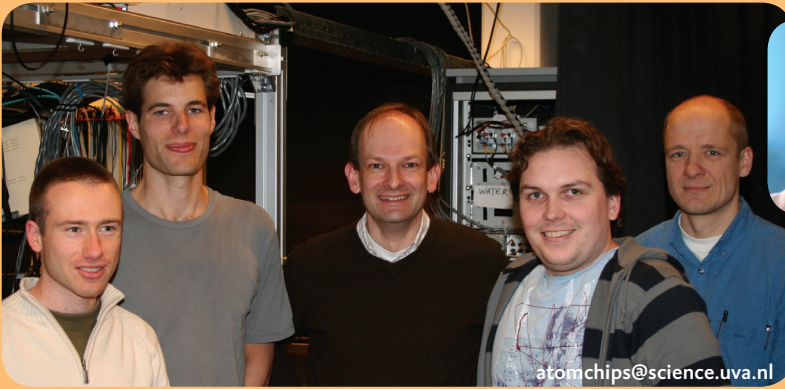
Een interessante recente ontwikkeling is het gebruik van zogeheten 'atoomchips' [1] om quantumgassen te bestuderen. Dit zijn structuren die op

kleine schaal (1-100 μm) de benodigde plaatsafhankelijke magneetvelden genereren om atomen te vangen en te manipuleren (zie kader 'magnetisch vangen'). Met behulp van een atoomchip kunnen atomen in een klein volume worden opgesloten. De strakke opsluiting levert verschillende voordelen op ten opzichte van traditionele magneetvallen gebaseerd op spoelen, zoals efficiëntere verdampingskoeling.

Voor ons is echter de belangrijkste drijfveer dat de strakke opsluiting van de atomen allerlei mogelijkheden biedt om nieuwe fysische verschijnselen te bestuderen. Zo maken atoomchips het makkelijk om de vorm en dimensie van de val te kiezen en te manipuleren. Met name het eendimensionale Bosegas, waarbij de atomen slechts in een richting kunnen bewegen, is relatief eenvoudig te realiseren. Verder is het mogelijk om een groot aantal atoomvallen te integreren op een atoomchip, een veelbelovend uitgangspunt voor 'quantuminformatieverwerking' (quantum information processing, QIP). Dit vereist het nauwkeurig kunnen manipuleren van koude atomen op micrometerschaal, iets wat mogelijk is met een atoomchip. In de groep Quantum Gases and Quantum Information aan het Van der Waals-Zeeman Instituut (Universiteit van Amsterdam) hebben we twee experimentele opstellingen gebouwd om onderzoek te doen aan deze twee onderwerpen. De verschillende



Figuur 1 Schematische weergave (links) en foto (rechts) van de atoomchip gebruikt om het eendimensionale Bosegas te realiseren. De chip, een siliciumsubstraat met daarop een goudlaag, gemaakt in het Amsterdam nanoCenter, hangt naar beneden in het vacuümsysteem en is 25 · 16 mm² groot en 0,3 mm dik. De goudlaag is duidelijk zichtbaar op de foto. Links is de gebruikte gouddraad in geel weergegeven, en is te zien hoe achter het silicium nog een aantal extra stroomdraden lopen (aangegeven in blauw en rood), die gebruikt worden om de atomen te manipuleren. Het geheel is gemonteerd op een koperen blok, dat op zijn beurt aan een watergekoelde buis vastzit.



Op de foto staan (v.l.n.r.) J.-J. van Es, A. van Amerongen, N.J. van Druten, S. Whitlock, R. Spreeuw. Inzet: R. Gerritsma.

René Gerritsma en Aaldert van Amerongen zijn de auteurs van de eerste twee proefschriften aan de UvA

over onderzoek met atoomchips. Dit onderzoek is eind 2002 met twee complementaire chipopstellingen gestart door Klaasjan van Druten en Robert Spreeuw, aan het Van der Waals-Zee-man Instituut van de UvA.

Gerritsma werkt aan quantuminformatieverwerking met gevangen ionen, als post-doc aan het Institut für Quantenoptik und Quanteninformation in Innsbruck. Van Amerongen verdedigt in mei 2008 zijn proefschrift getiteld *Eendimensionaal Bosegas op een atoomchip*. Hij werkt inmiddels bij de divisie Earth-oriented science van SRON.

Van Druten werkt sinds eind 2002, dankzij een NWO VIDI-beurs, aan atoomchips bij het Van-der-Waals-Zeeman Instituut van de UvA.

Spreeuw's grootste interesse is de quantuminformatie, onder meer met behulp van neutrale atomen op permanent magnetische atoomchips; hij is UHD aan de UvA.

Jan-Joris van Es doet sinds 2003 promotieonderzoek naar de eigenschappen van Bose-Einsteincondensaten op een atoomchip.

Shannon Whitlock voegde zich begin 2007 als postdoc bij het team van Van Druten en Spreeuw waar hij zich richt op Bose-Einsteincondensaten en magnetische roosters.

atoomchips die we voor dit onderzoek gebruiken, hebben we gemaakt in het Amsterdam nanoCenter [2]. Beide opstellingen produceerden hun eerste Bose-Einsteincondensaten van ^{87}Rb -atomen in 2006. In dit artikel bespreken we recente resultaten uit het 'eendimensionaal Bosegas'-experiment en uit het 'magnetische-chip'-experiment.

Eendimensionaal Bosegas op een chip

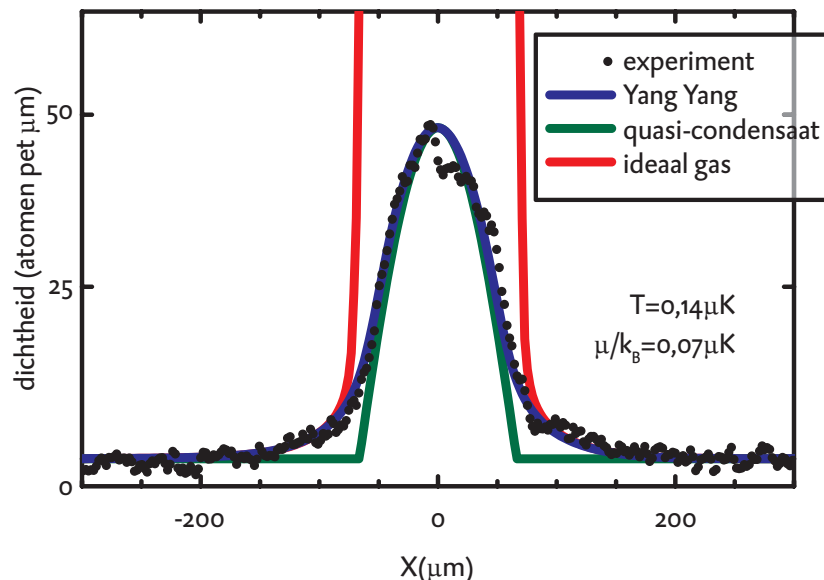
Zoals in het kader 'magnetisch vangen' is aangegeven, kan met behulp van een enkele stroomvoerende draad en een homogeen extern magneetveld een langgerekte val gemaakt worden met zeer strakke opsluiting in de dwarsrichting. Dit is precies wat we doen in het eendimensionaal Bosegas-experiment. De atoomchip die hierbij gebruikt wordt is zichtbaar in figuur 1, en bestaat uit een silicium substraat met daarop een goudlaag van twee micrometer dikte. In de goudlaag is met behulp van lithografische technieken een patroon aangebracht dat de vorm van de stroomvoerende draad definieert. Door de draad loopt een stroom van 2 A. Wanneer we de atomen op ongeveer 90 μm afstand van de draad vangen en afkoelen tot beneden de 160 nK, is hun thermische energie kleiner geworden dan de quantummechanische vibratie-energie die hoort bij de eerste radieel aangeslagen bewegingstoestand. Met andere woorden: de beweging in de dwarsrichting is

dan bevroren en de atomen kunnen alleen in de lengterichting bewegen. Effectief is het gas daarmee eendimensionaal (1D) geworden. We maken zo een gaswolk die vierhonderd keer zo lang is als breed. Bovendien is de extreem langgerekte wolk sterk verdund met een lineaire dichtheid van slechts 50 atomen/ μm .

Fermionisatie

Een quantumgas blijkt zich heel anders te gaan gedragen wanneer we van 3D naar 1D gaan. Zo blijven fluctuaties de coherentie in een gas van bo-

sonen verstoren hoe koud je het ook maakt. Dit is de reden dat een echt Bose-Einsteincondensaat niet bestaat in 1D, zoals gesteld wordt in het beroemde Mermin-Hohenberg-Wagner-theorema. Wanneer we bosonen in een enkele dimensie dwingen, wordt de wisselwerking tussen de atomen vreemd genoeg steeds sterker naarmate de dichtheid afneemt. In het meest extreme geval van zeer lage dichtheid en temperatuur hebben de bosonen te weinig energie om de wisselwerkingsenergie te overbruggen, waardoor twee atomen niet op dezelfde



Figuur 2 Gemeten evenwichtsverdeling (zwarte punten) van atomen in de lengterichting van de val gevormd door de atoomchip van figuur 1. De blauwe lijn geeft de voorspelling van de Yang-Yangtheorie. De twee andere lijnen (rood en groen) geven de voorspelling van twee andere, benaderende, theorieën die allebei duidelijk niet werken voor de hele wolk.

Magnetisch vangen en atoomchips

De energie U van een atoom met een magnetisch moment $\vec{\mu}$ in een statisch magnetisch veld \vec{B} is

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}.$$

Het atoom voert een precessie uit rond de lokale richting van het magnetisch veld, met de Larmorfrequentie. Dankzij deze (snelle) precessiebeweging is de hoek tussen $\vec{\mu}$ en \vec{B} behouden tijdens de (langzame) beweging van het atoom door een inhomogeen magnetisch veld, en is de energie dus evenredig met de sterkte van het magnetisch veld, $|\vec{B}|$. Door nu het magnetisch veld zo te ontwerpen dat er een lokaal minimum in $|\vec{B}|$ is, ontstaat een magnetische val voor atomen die hun magnetische dipool tegen het veld in gericht hebben, $\vec{\mu} \cdot \vec{B} < 0$.

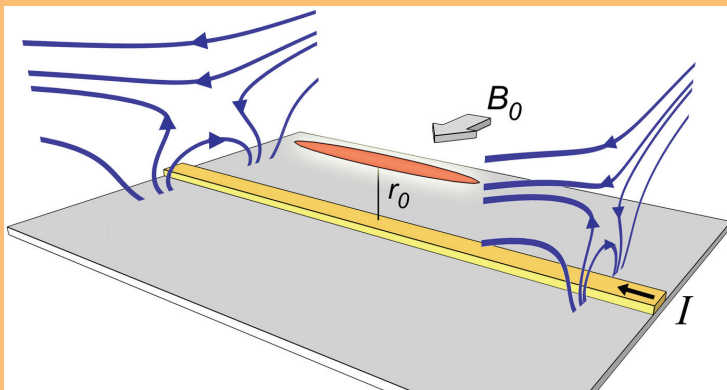
De voordelen van een atoomchip laten zich illustreren aan de hand van een eenvoudig voorbeeld: een magnetische val gemaakt met behulp van een lange, dunne stroomvoerende draad. Volgens de wet van Biot-Savart circuleren de magnetisch veldlijnen rond zo'n draad (stroom I) en is de sterkte van het magnetisch veld op afstand r

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

Wanneer we een extern homogeen magnetisch veld (sterkte B_0) aanleggen loodrecht op de draad, zal langs de hele draad op een afstand r_0 , de magnetisch veldsterkte nul zijn (zie figuur). De gradiënt in magnetisch veldsterkte B' is daar

$$B' = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0^2}.$$

De resulterende magnetische val voor atomen heeft een zeer strakke opsluiting in de dwarsrichting (het vlak loodrecht op de draad). Een extra veld in de richting van de draad zorgt er tenslotte voor dat de atomen niet in de lengterichting ontsnappen. De gevangen atomen vormen een zeer langgerekte wolk zoals is te zien in onderstaand figuur. De uitgeoefende kracht op de atomen in de dwarsrichting is direct evenredig met bovengenoemde gradiënt. Aan de hand hiervan is te zien dat op een afstand van $100 \mu\text{m}$ een stroom van 1 A een honderd keer zo grote kracht uit kan oefenen als een stroom van honderd ampère op een afstand van 1 cm . De karakteristieke lengteschaal van de opsluiting is omgekeerd evenredig met B' , en is daarmee veel kleiner voor atoomchips dan voor conventionele vallen [1].



plaats kunnen zijn. In dit opzicht lijkt het gedrag op fermionen die onderhevig zijn aan het uitsluitingsprincipe van Pauli. Het verrassende resultaat is dus dat de sterk wisselwerkende bosonen zich gaan gedragen als een gas van vrije fermionen. Dit gedrag wordt fermionisatie genoemd.

Exacte oplossingen

Fermionisatie werd in het begin van de jaren zestig van de vorige eeuw ontdekt. Het was een van de sleutels die leidden tot het opstellen van een klasse van exact oplosbare modellen voor quantummechanische systemen van veel deeltjes in 1D. De vondst van deze exacte oplossingen is spectaculair omdat in 3D alle systemen van meer dan twee quantumdeeltjes (tot nu toe) te complex bleken en alleen bij benadering opgelost konden worden. Een aantal van deze exact oplosbare modellen wordt veel gebruikt in de fysica van de gecondenseerde materie. De broers C.N. Yang (Nobelprijs 1957) en C.P. Yang ontwikkelden eind jaren zestig een generieke methode voor het vinden van de thermodynamica van exact oplosbare ('integreerbare') modellen. Ze deden dit ook voor het 1D Bosegas, het meest eenvoudige voorbeeld van hun methode.

Ons werk maakt duidelijk dat deze theorie ook in experimenteel opzicht zeer relevant is [3]. De gemeten evenwichtsverdeling in de lengterichting van de op de chip gevangen atomen is weergegeven in figuur 2. De metingen zijn in goede overeenstemming met een model gebaseerd op de Yang-Yangtheorie, terwijl twee andere theoretische modellen (een BEC-achtig 'quasi-condensaat' en het ideale gas in 1D) duidelijk niet werken voor de hele wolk. Hiermee hebben we voor het eerst, bijna veertig jaar na het opstellen van de theorie, de Yang-Yangthermodynamica van bosonen toegepast in een experiment.

Permanent magnetische atoomchips

Voor bepaalde toepassingen heeft het belangrijke voordelen om de benodigde magnetische velden niet op te wekken met stroomvoerende draden, maar met een permanent magnetische film [4]. Dit geldt bijvoorbeeld voor quantuminformatieverwerking (QIP). Deze aanpak op basis van magnetische films wordt tot nog toe door slechts

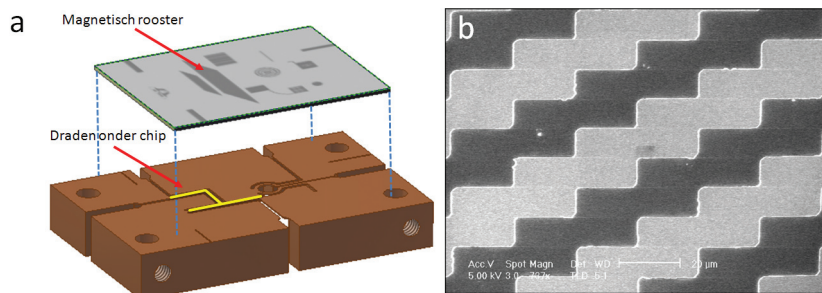
enkele groepen onderzocht. Voor ons magnetische-chipexperiment etsen we patronen in een hardmagnetische, 300 nm dikke film van FePt, zie figuur 3. We ontwikkelen onze magnetische atoomchips in samenwerking met de Materials science groep van Jeroen Goedkoop (UvA) en het Hitachi San-Jose research center.

Met magnetische chips wordt niet alleen de technische ruis als gevolg van stroombronnen geëlimineerd, het is ook mogelijk om atoomvallen te creëren met nieuwe topologieën (denk bijvoorbeeld aan ringvormige vallen zonder aanvoerdraden voor de stroom). Een ander belangrijk voordeel is de afwezigheid van dissipatie ten gevolge van de ohmse weerstand. Het is ons zelfs gelukt een Bose-Einsteincondensaat te maken en gevangen te houden in een val die helemaal door permanente magneten wordt gemaakt, en die dus helemaal geen vermogen vergt [5]. In ons magnetische-chipexperiment richten wij het vizier vooral op QIP.

Een rooster van microvallen

Een belangrijke voorwaarde voor QIP is het realiseren van een quantumregister, dat wil zeggen een rijtje quantumbits (qubits). We zijn er onlangs in geslaagd om een rooster van microvallen te maken op een permanent magnetische atoomchip, en deze te laden met koude atomen. Onze chip met het rooster is te zien in figuur 4. Technologisch is het vrijwel onmogelijk om een dergelijk groot rooster met behulp van stroomvoerende draden te laten werken. De geschatte dissipatie zou met 30 W/mm² veel te hoog zijn. Permanente magneten bieden hier dus uitkomst.

Het rooster wordt geladen vanuit een grotere magneetval die gecreëerd wordt door stroomvoerende draden die onder de chip zitten. De koude atomen worden in het rooster van microvallen geladen door langzaam de stroom uit te zetten. Figuur 4 is gemaakt door middel van absorptie van resonant laserlicht, en laat het rooster van gevangen atomen zien. We hebben in totaal zo'n 10⁶ atomen gevangen in het rooster, verspreid over circa 400 roosterpunten. De temperatuur van de atomen is dan nog ongeveer 50 μK [6]. Door verdampingskoeling in het rooster brengen we de temperatuur verder omlaag tot 2-4 μK, dicht bij de



Figuur 3 a) Magnetische atoomchip (20 · 15 mm²) met permanent magnetisch rooster. De draden onder de chip kunnen gebruikt worden om een grotere magneetval te maken om het rooster te laden. b) Magnetisch rooster. De structuren zijn geëtsd uit een 300 nm dikke FePt film met behulp van optische lithografie. Het FePt heeft een magnetisatie van $M = 670$ kA/m. De structuur vormt atoomvallen met behulp van een extern aangelegd veld, op 5-20 μm van het chipoppervlak. Het rooster bevat in totaal 15.000 vallen, met een dichtheid van 1250/mm².

Quantuminformatieverwerking op een atoomchip

Atoomchips met neutrale atomen zijn veelbelovende systemen voor het implementeren van quantuminformatieverwerking. Hun neutraliteit maakt de atomen relatief immuun voor externe stoorvelden, zodat quantumcoherenties secondenlang in stand kunnen blijven [7]. Atoomchips maken het mogelijk om het nu al grote aantal microvallen (en uiteindelijk dus qubits) nog verder op te schalen.

De benodigde twee qubit toestanden $|0\rangle$ en $|1\rangle$ kunnen gedefinieerd worden als de twee hyperfijn(grond)toestanden van het ⁸⁷Rb-atoom. Met laserpulsen of micro- en radiogolven kunnen superposities van deze toestanden gemaakt worden.

Voor quantuminformatieverwerking is het nodig zowel individuele qubits als meerdere qubits tegelijk te manipuleren met zogeheten quantum gates, zodat quantumverstremeling kan ontstaan. In principe is het voldoende om gates op paren van geselecteerde qubits te laten werken. Op atoomchips kan bijvoorbeeld een zogeheten phase gate gebruikt worden. Deze gate berust op toestandsselectieve manipulatie (bijvoorbeeld met radio- of microgolven). De gate zorgt ervoor dat een atomenpaar ofwel korte tijd overlapt of bij elkaar uit de buurt blijft, afhankelijk van de interne toestand van de atomen. De overlappende toestanden krijgen een extra (botsings)faseverschuiving. Door de timing van de gate goed te kiezen krijgen we als waarheidstabel:

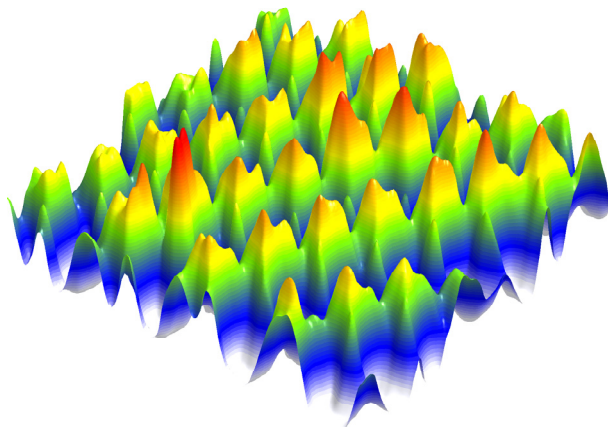
$$|00\rangle \rightarrow |00\rangle$$

$$|01\rangle \rightarrow |01\rangle$$

$$|10\rangle \rightarrow -|10\rangle$$

$$|11\rangle \rightarrow |11\rangle$$

Samen met individuele qubitoperaties vormt deze gate een universele set voor quantuminformatieverwerking.



Figuur 4 Een met koude atomen geladen rooster, afgebeeld met behulp van resonant laserlicht. De atomen zitten gevangen op $10\ \mu\text{m}$ van het chipoppervlak en hebben een temperatuur van ruwweg $50\ \mu\text{K}$. In totaal zitten er ongeveer 10^6 atomen gevangen in het rooster, verspreid over ongeveer 400 roosterpunten. De kortste roosterafstand is $22\ \mu\text{m}$.

kritische temperatuur voor BEC. Hoewel de microvallen gebaseerd zijn op permanente magneten is het toch betrekkelijk eenvoudig om de atomen te manipuleren. Zo kunnen we alle microvallen één of meer roosterpunten opschuiven, door externe magneetvelden op een bepaalde manier te roteren. Dit zou dienst kunnen doen als een 'schuifregister' voor quantuminformatie, bijvoorbeeld om qubits naar een detectie-eenheid te schuiven. De gekozen roosterafstand

maakt het ook mogelijk om de atomen in individuele vallen selectief te manipuleren met laserpulsen. Deze resultaten vormen belangrijke stappen op weg naar quantuminformatieverwerking met neutrale atomen. Voor de daadwerkelijke implementatie van QIP zijn uiteraard nog verscheidene andere belangrijke stappen noodzakelijk. Zo moet bijvoorbeeld het aantal atomen per val teruggebracht worden tot precies één. Die solitaire atomen moeten bovendien

in de grondtoestand van de val zitten. Op dit moment proberen we dit via verdampingskoelen te bereiken. De meeste andere stappen, zoals het demonstreren van elementaire gate-operaties (zie kader), bestaan nu nog als ideeën op papier en wachten op realisatie in het lab.

Dit onderzoek werd mede mogelijk gemaakt door FOM (Projectruimte, programma's Cold Atoms en Quantum Gases) en de EU (Marie Curie Netwerk 'Atom Chips').

Referenties

- 1 Reichel, J. *Scientific American*, februari 2005 p. 32.
- 2 www.amolf.nl/extra_paginas/amsterdamnanocenter.html.
- 3 A.H. van Amerongen, J.J.P. van Es, P. Wicke, K.V. Kheruntsyan, N.J. van Druten, *Phys. Rev. Lett.* *arxiv:0709.1899*
- 4 R. Gerritsma, proefschrift Universiteit van Amsterdam, 26 sept. 2007; www.science.uva.nl/research/aplp/phdtheses.html.
- 5 T. Fernholz, R. Gerritsma, S. Whitlock, I. Barb, and R. J. C. Spreeuw, *Phys. Rev. A*, *arxiv:0705.2569*.
- 6 R. Gerritsma, S. Whitlock, T. Fernholz, H. Schlatter, J. A. Luigjes, J.-U. Thiele, J. B. Goedkoop, and R. J. C. Spreeuw, *Phys. Rev. A* **76**, 033408 (2007).
- 7 P. Treutlein, P. Hommelhoff, T. Steinmetz, T. W. Hänsch, and J. Reichel, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 203005 (2004).

Vredenburgbericht

Nieuwe taak NNV-bureau

Heeft de NNV een taak in de professionele ontwikkeling van de natuurkunde docent? De besturen van de Nederlandse Vereniging voor het Onderwijs in de Natuurwetenschappen, afdeling natuurkunde (NVON-n) en NNV brainstormden enige tijd geleden samen over deze vraag. Ook heeft het algemeen bestuur van de NNV zich op haar vergadering in januari over deze vraag gebogen. De huidige situatie is dat nascholing van natuurkundedocenten vooral gericht is op pedagogische en didactische componenten en dat de vakinhoudelijke nascholing veel minder aan bod komt. Nascholing is dus veel meer gericht op 'hoe leren we' dan op 'wat leren we'. Terwijl geble-

ken is dat docenten ook graag vakinhoudelijke nascholing zouden willen volgen. Door de nieuwe onderwerpen die NiNa introduceert, zal de vraag naar vakinhoudelijke bijscholing alleen maar toenemen. Er worden binnen NiNa onderwerpen aangesneden die nieuw zijn en in het verleden niet onderwezen werden. De natuurkunde ontwikkelt zich voortdurend, denk bijvoorbeeld aan nanotechnologie en biofysica. Terreinen waarbinnen zich veel ontwikkelingen afspelen. Docenten zullen zelf moeten aangeven over welke vakinhoudelijke onderwerpen ze meer scholing willen: dus een vraaggestuurde werkwijze. Er zijn veel mogelijkheden tot vak-

inhoudelijke nascholing: cursussen op scholen buiten schooltijd (denk aan de 1040-urennorm), bedrijfsbezoeken, meer cursusmateriaal voor docenten op www.natuurkunde.nl. De vraag 'Heeft de NNV een taak in de professionele ontwikkeling van de natuurkunde docent?' kan bevestigend worden beantwoord. Het NNV-bureau kan zeker een rol vervullen, bijvoorbeeld een 'makelaarsfunctie'. De NNV heeft veel leden die tezamen een schat aan vakinhoudelijke kennis hebben. Het NNV-bestuur gaat gezamenlijk met de NVON plannen voor de organisatie van vakinhoudelijke nascholing nader uitwerken.

Elise Boltjes