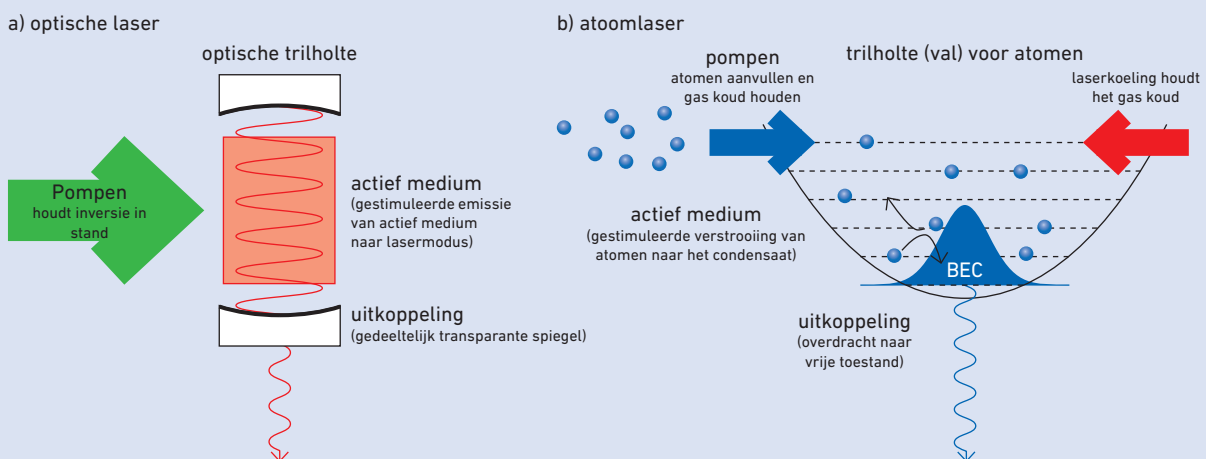


Continue bose-einsteincondensatie

Physicalezing 2024

Atoomlasers zenden materiegolven uit die bestaan uit vele atomen die quantummechanisch met elkaar in de pas lopen. Deze zijn net als optische laserstralen uitstekend geschikt voor interferometrie, nauwkeurige navigatie, bodemonderzoeken en het waarnemen van zwaartekrachtgolven. Zulke sensoren werken enorm veel beter als ze continu aanstaan, maar tot nu toe kon men alleen gepulste atoomlasers maken. Hier beschrijf ik hoe wij continue bose-einsteincondensatie hebben gerealiseerd, het materiegolfequivalent van continue optische laserwerking. Met deze doorbraak hopen wij continue atoomlaserinterferometers en continu werkende optische atoomklokken te kunnen realiseren.



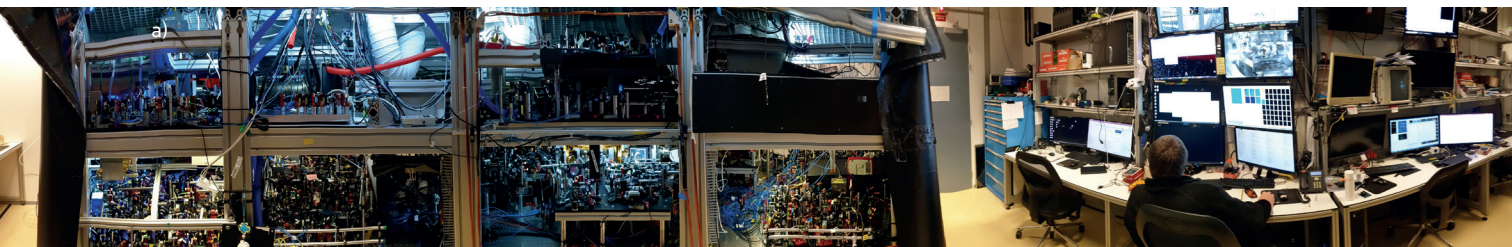
Figuur 1. Optische laser versus atoomlaser. a) Binnen een laser bevinden zich vele fotonen in een trillingstoestand van een optische trilholtte. Deze verlaten de trilholtte via een uitkoppelaar en vormen zo een laserstraal. De fotonen in de trillingstoestand van de holtte worden aangevuld door gestimuleerde emissie vanuit het actieve medium. Dit actieve medium wordt optisch gestimuleerd ('inversie') door een 'pomp'-proces (namelijk een overdracht van energie naar het actieve medium door lichtbestraling of door elektrische stroom). b) In een atoomlaser komen zeer vergelijkbare ingrediënten voor. Veel atomen bevinden zich in de laagste bewegingstoestand van de val en vormen het bose-einsteincondensaat (BEC). De atomen verlaten de val door een uitkoppelingsmechanisme. Het verlies van atomen wordt gecompenseerd door atomen toe te voegen aan het condensaat door gestimuleerde elastische verstrooiing van atomen in een koud thermisch gas, het actieve medium. Het thermische gas wordt aangevuld met nieuwe atomen en door continue laserkoeling koud en dicht genoeg gehouden om als actieve medium te dienen (deze twee processen samen 'pompen' de atoomlaser).

Atomen zijn deeltjes en golven. Als je een atomaire gas afkoelt tot temperaturen onder een microkelvin, waarbij de atomen minder dan een centimeter per seconde afleggen, kun je niet gelijktijdig hun positie en impuls bepalen vanwege de onzekerheidsrelatie van Heisenberg. Wat we wel kunnen weten over deze eigenschappen wordt beschreven met een quantummechanische golf functie. Deze geeft de waarschijnlijkheid aan dat we een atoom met een bepaalde positie of impuls aantreffen als we zouden meten. De ruimtelijke spreiding van deze golf functie wordt groter als de snelheid van het atoom afneemt. Bij het koelen van een atomaire gas kunnen de golf functies van de individuele atomen gaan overlappen. Zoals Einstein in 1925 al voorspelde op basis van een suggestie van de Indiase natuurkundige Satyendra Nath Bose, kunnen de golf functies met elkaar synchroniseren als alle atomen identieke bosonen zijn (deeltjes met heeltallige spin, zoals het strontiumisotoop ^{84}Sr) [3]. Dan worden de vele atomen binnen het gas beschreven met één grote golf functie. Een dergelijk bose-

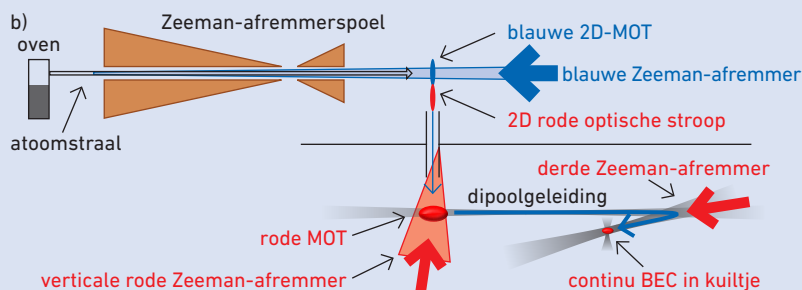
einsteincondensaat (BEC) werd in 1995 voor het eerst geproduceerd door de groepen van Eric Cornell, Carl Wieman en Wolfgang Ketterle, waar ze de Nobelprijs voor de Natuurkunde voor ontvingen [4]. Fotonen, de quantummechanische lichtdeeltjes, zijn ook bosonen en er bestaat een sterke analogie tussen fotonen en de bosonische atomen in een gas. Bij wit licht dat zich in een ruimte verspreidt vliegen fotonen alle kanten op met veel verschillende kleuren (dat wil zeggen energieën), net zoals atomen in een thermisch gas alle kanten op vliegen met veel verschillende snelheden (en dus kinetische energieën). In een laser bevinden zich vele fotonen in dezelfde trillingstoestand van een optische trillholte. Dit komt overeen met de atomen van een ingevangen BEC, zie figuur 1. Om een laser bruikbaar te maken wordt een van de spiegels van de trillholte een klein beetje doorzichtig gemaakt, zodat er een laserstraal naar buiten komt. Op vergelijkbare wijze kan een atoomlaserstraal verkregen worden door een lek in de val met het BEC te maken (of simpelweg door de val te openen en zo een atoomlaserpuls te creëren [2]).

Interferometrie

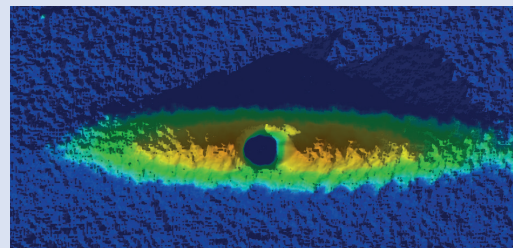
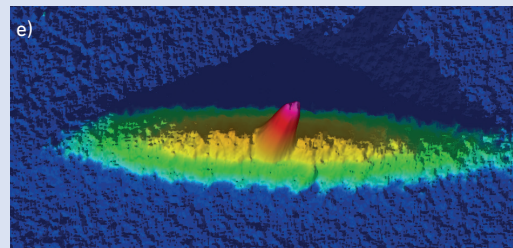
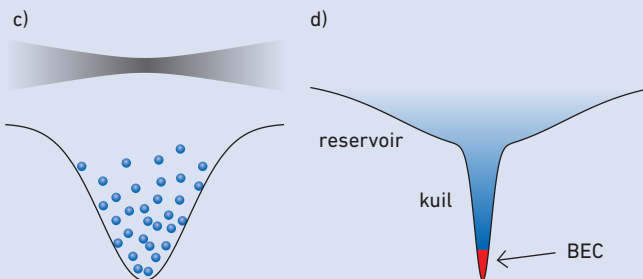
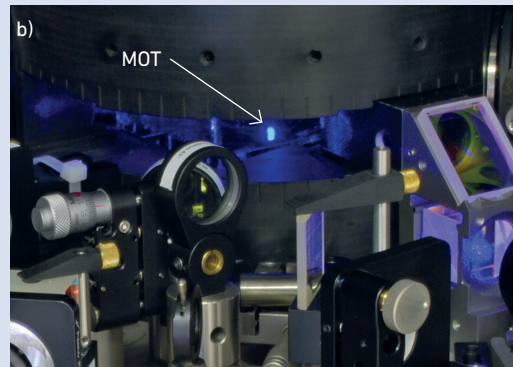
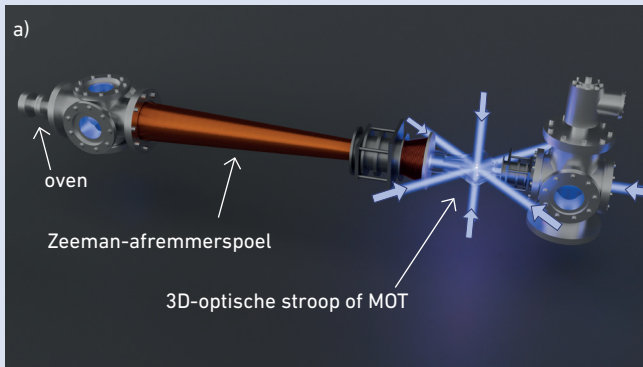
Optische laserstralen zijn uitermate geschikt voor precisie metingen, bijvoorbeeld om zwaartekrachtgolven op te sporen in kilometerslange interferometers. Je kunt ook atoomlaserstralen gebruiken voor interferometrie. Omdat atomen massa hebben, kunnen dergelijke atoominterferometers uitermate gevoelig zijn voor versnelingen. Met atoominterferometers zou je precieze lange termijn traagheidsnavigatie in de scheepvaart mogelijk kunnen maken, bodemonderzoek kunnen doen (bijvoorbeeld het opsporen van grotten of geologische veranderingen) of infrasone zwaartekrachtgolven kunnen meten. Atoominterferometers kunnen ook met thermische atoombronnen gemaakt worden, maar atoomlasers zouden hier veel beter kunnen presteren [2]. Een belangrijk nadeel van het gebruik van atoomlasers voor interferometrie (en voor precisie metingen in het algemeen) is dat ze tot nu toe altijd gepulst waren. Een atomaire gas moet gekoeld worden in een serie afkoelstappen, die doorgaans na elkaar in de tijd worden uitgevoerd. Als er dan een BEC is ontstaan kan er kortstondig een atoomla-



Figuur 2. Opstelling voor continue bose-einsteincondensatie. a) Beeld van het lab. b) Werkingsprincipe. Er wordt een continue aanvoer van strontiumatomen met μK -temperatuur gecreëerd door een opeenvolging van laserkoelstappen. Een atomaire straal uit een oven wordt door een Zeeman-afremmer vertraagd en opgevangen in een magneto-optische val (MOT). Door een overgang met grote lijnbreedte (MHz) te kiezen (blauw voor Sr) wordt de benodigde sterke afremming bereikt, maar strooi-licht van de laserkoeling is gevaarlijk voor een bose-einsteincondensaat (BEC). Daarom laten we de atomen in een aparte vacuümkamer vallen, ver van het blauwe licht. Daar koelen we de atomen in het MOT verder af met een laserkoelovergang met nauwe lijnbreedte (rood voor Sr). We leiden de atomen via dipoolgeleidingen uit deze rode MOT naar een donkere ruimte waar ze een reservoir van lasergekoelde atomen herbevoorraden. Een kuiltje in het midden van het reservoir dat met een transparantiestraal beschermd wordt verhoogt de dichtheid en zorgt ervoor dat er een BEC gevormd wordt.



TECHNIEKEN VOOR HET PRODUCEREN VAN EEN BEC



a) Karakteristiek apparaat om ultrakoude atomen te prepareren. Een oven stort een atoombundel met een snelheid van ongeveer 500 m/s uit in een vacuüm. De atomen worden in een Zeeman-afremmer vertraagd door verstrooiing van fotonen die uit tegengestelde richting komen in een laserstraal (blauwe pijl die van rechts komt). Ieder foton vermindert de snelheid met enkele millimeters per seconde. Op minder dan een meter worden de atomen vertraagd tot ongeveer 30 m/s, waarvoor atomaire overgangen nodig zijn die fotonen snel achter elkaar kunnen verstrooien, overgangen dus met MHz-lijnbreedte. De atomen nemen de frequentie van de laserstraal waar als dopplerverschuiven en deze verschuiving verandert naarmate de atomen vertraagd worden. Om de atomen altijd op resonantie te houden wordt de veranderende dopplerverschuiving gecompenseerd door een plaatsafhankelijke Zeemanverschuiving, dat wil zeggen de frequentie van de atomaire overgangen wordt aangepast met magnetische velden (zie de elektromagneten in het bruin). De atomen worden verder afgekoeld door laserstralen van zes kanten (de blauwe pijlen die gericht zijn op de MOT). De laserstralen hebben een frequentie die lager is dan de frequentie van de atomaire overgang. Atomen die tegen een laserstraal in bewegen merken dat deze dopplerverschuiven wordt tot dichterbij hun overgangsfrequentie. Daarom verstrooien atomen voornamelijk fotonen die tegen hen in bewegen en zo worden de atomen vertraagd. De laagste temperaturen (ongeveer 1 μ K) kunnen bereikt worden door een nauwe optische overgang te kiezen (kHz breed). Het toevoegen van een quadrupool magneetveld (elektromagnetische spoelen in oranje) maakt van de optische stroop een magneto-optische val (MOT), waarin de atomen voornamelijk fotonen verstrooien van de laserstraal die ze naar het midden van het quadrupool magneetveld stuwt. Dit effect wordt verkregen door het kiezen van een goede atomaire overgang, laserpolarisatie en richting van het magneetveld.

b) Foto van het middengedeelte van het apparaat waarbij de reflectie van de fluorescentie van de MOT te zien is in de glazen vacuümkamer.

c) Optische dipoolgeleiding of val. Om het gas verder af te koelen moet het zonder fotonen te verstrooien tegen de zwaartekracht in. Dit wordt bereikt door de atomen in een smalle infrarood laserstraal (doorsnee ongeveer 20 - 100 μ m, grijs in de afbeelding) te leiden of op te sluiten, waarmee door het AC Starkeffect een potentiaalput voor atomen ontstaat (vergelijkbaar met een stukje ijzer dat door een magneet wordt aangetrokken). Je kunt een gewenst potentiaallandschap construeren door de velden van verschillende laserstralen te combineren.

d) Wij gebruiken de 'kuiltjetruc' om een bose-einsteincondensaat (BEC) te produceren. De dipoolpotentiaal wordt gevormd in een breed reservoirgebied en een klein diep gebied (het kuiltje). Het gas in het reservoir wordt lasergekoeld. De dichtheid van het gas is hoger in het kuiltje vanwege de diepere potentiaal, terwijl de temperatuur van het gas in de twee gebieden hetzelfde is dankzij thermisch contact door elastische botsingen. Als de dichtheid hoog genoeg en de temperatuur laag genoeg is, gaan de atomen condenseren en een BEC vormen.

e) De atomen in het kuiltje worden transparant gemaakt voor het laserkoelingslicht om het destructieve effect van dat licht op een BEC te voorkomen (zoals door verhitting atomen eruit stoten). Dit bereiken we door met AC Starkverschuiving de optisch aangeslagen toestand van de laserkoelingsovergang uit resonantie te brengen, met gebruikmaking van een laserstraal dicht bij een geschikte atomaire overgang. De twee dichtheidsverdelingen tonen het thermische gas in het reservoir en in het kuiltje. Op het onderste plaatje hebben we de atomen in het kuiltje transparant gemaakt.

serstraal worden geëxtraheerd, maar die houdt op zodra alle atomen van het BEC zijn vrijgelaten. Voor de volgende meting moet een nieuw condensaat gecreëerd worden, wat een aanzienlijke tijd duurt. Het onderbreken van de meting brengt fouten met zich mee en men moet veel verschillende metingen middelen om de grootste nauwkeurigheid te verkrijgen. Onder de juiste omstandigheden heeft een continue meting niet te lijden van dergelijke fouten en kan dezelfde precisie veel sneller bereikt worden [5]. Een continue atoomlaser (of een continue thermische bundel van vergelijkbare temperatuur en dichtheid) zou een enorme stap vooruit betekenen op weg naar het realiseren van deze voordelen.

Continue atoomlaser

Om een continue atoomlaser te verkrijgen moeten alle afkoelstappen tegelijkertijd worden uitgevoerd, achter elkaar op opeenvolgende plekken (in plaats van na elkaar in tijd). De atomen moeten zorgvuldig worden verplaatst van het ene stadium naar het volgende, waarbij de veelal tegenstrijdige eisen aan de verschillende stadia met elkaar verenigd moeten worden. In de eerste afkoelstappen wordt de snelheid van de atomen gereduceerd door verstrooiing van laserlicht dat vrijwel resonant is met een optische overgang van de atomen (zie kader *Technieken voor het produceren van een BEC*). Een groot probleem hierbij is dat de atomen in een BEC, atomen die bijna stilstaan dus, al uit het condensaat gestoten worden als ze ook maar één verdwaald foton uit het laserkoelstadium verstrooien. Dit probleem hebben we kunnen verhelpen, om zo een BEC te kunnen creëren dat zo lang als nodig is blijft bestaan [6]. We hebben daarvoor een nieuw apparaat gebouwd dat de afkoelstadia ruimtelijk scheidt (zie figuur 2). Voor de eerste afkoelstappen is licht nodig waar het BEC niet tegen beschermd kan worden. We voeren deze stappen daarom uit in een vacuümkamer in de bovenste helft van het apparaat, vanwaaruit de voorgekoelde atomen in de onderste helft vallen, die dit verstovende licht buitensluit (zie figuur 3). Doordat de atomen een donker ge-

bied worden binnengeleid en daar op lage temperatuur worden opgeslagen, ontstaat een bose-einsteincondensaat (zie figuren c-e in het kader). Het BEC wordt waargenomen als een kleine elliptische vorm in de dichtheidsverdeling van het gas nadat het is vrijgelaten en een klein stukje is gevallen (zie figuur 4).

BEC's bestaan gewoonlijk niet langer dan een paar seconden, bijvoorbeeld omdat er moleculen gevormd worden van de atomen die uit de afgesloten ruimte ontsnappen. In onze aanpak wordt het BEC continu herbevoorraad met atomen, waardoor het zo lang als gewenst is blijft bestaan. Op deze manier hebben we met volledig reflecterende spiegels in de holte het materiegolfequivalent verkregen van een continue optische laser (zie figuur 1). Ons volgende grote doel is om een atoomlaserstraal uit het condensaat te voeren die vervolgens gebruikt kan worden voor continue atoomlaserinterferometrie.

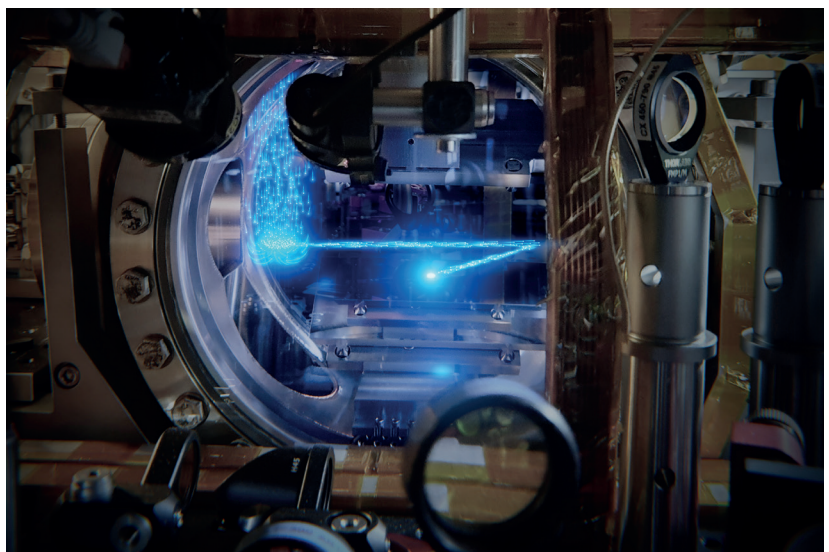
Precisiemetingen

Vele toepassingen voor precisiemetingen zullen al baat hebben van een continue bron van atomen op μK -temperatuur met hoge flux en hoge dichtheid, zoals de bundel ultrakoude atomen die het BEC van nieuwe ato-

men voorziet. Daarom hebben wij de ervaring die we hebben opgedaan ingezet om een sterk vereenvoudigde, kleinere versie van ons apparaat te bouwen, dat nog steeds een dergelijke continue bron van ultrakoude atomen kan leveren. Wij zijn van plan dit te gebruiken voor continu werkende optische atoomklokken (zie figuur 5). Goede optische klokken lopen maar een seconde ongelijk op de levensduur van het heelal. Deze precisie wordt bereikt door de laserfrequentie te stabiliseren op een nauwe optische atomaire overgang [7]. Continu werkende optische klokken zouden deze precisielimit binnen een paar minuten kunnen bereiken in plaats van binnen een paar uur en daarbij minder gevoelig zijn voor ruis. Deze voordelen zijn zeer waardevol voor uiteenlopende toepassingen, van het synchroniseren van netwerken, via landmeetkunde naar het zoeken naar natuurkunde voorbij het standaardmodel.

Dankbetuiging

Ik wil de vele uitzonderlijke mensen bedanken die de quantumwetenschap in onze groep elke dag verder weten te brengen. Deze reis begon in Innsbruck toen wij een BEC van strontiumatomen en daarnaast BEC met alleen laserkoeling bereikten met



Figuur 3. Artistieke weergave van atomen die zich verspreiden in de onderste vacuümkamer. Beeldbewerking door Scixel.

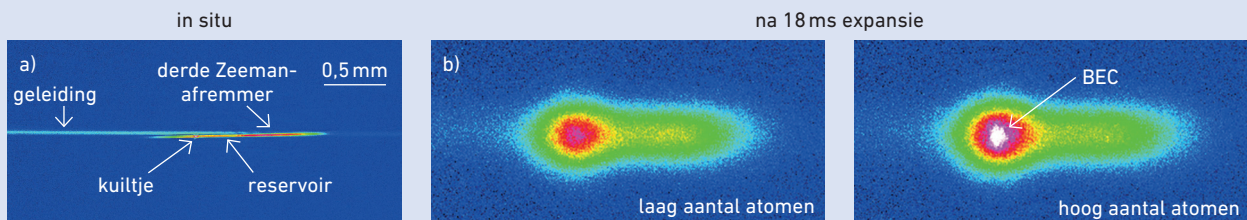
Simon Stellmer, Meng Khoon Tey en Benjamin Pasquiou. In 2014 voegden Chun-Chia Chen en Shayne Bennetts zich bij Benjamin en mij in Amsterdam. Zij hebben de meeste apparaten die te zien zijn in het kader ontworpen en gebouwd. Rodrigo González Escudero kwam er in 2017 bij. Gezamenlijk realiseerde het team continue bose-einsteincondensatie in december 2019 en Jiří Minář heeft ons geholpen onze data te analyseren. Ons onderzoek is mogelijk gemaakt doordat de mensen van de Quantum Gases & Quantum Information groep van de Universiteit van Amsterdam een fantastische werkomgeving hebben gecreëerd. Wij zijn ingebed in QuSoft, in Quantum. Amsterdam en in Quantum Delta NL, en zijn dankbaar voor de ondersteu-

ning via vele subsidies uit Nederland, de EU en de ESA, en ondersteuning uit Taiwan, Australië en Canada. Onze grote dank gaat ook uit naar het bekwame Technologiecentrum en de administratieve ondersteuning van de UvA. En een dikke kus voor mijn lieve vrouw Irene!

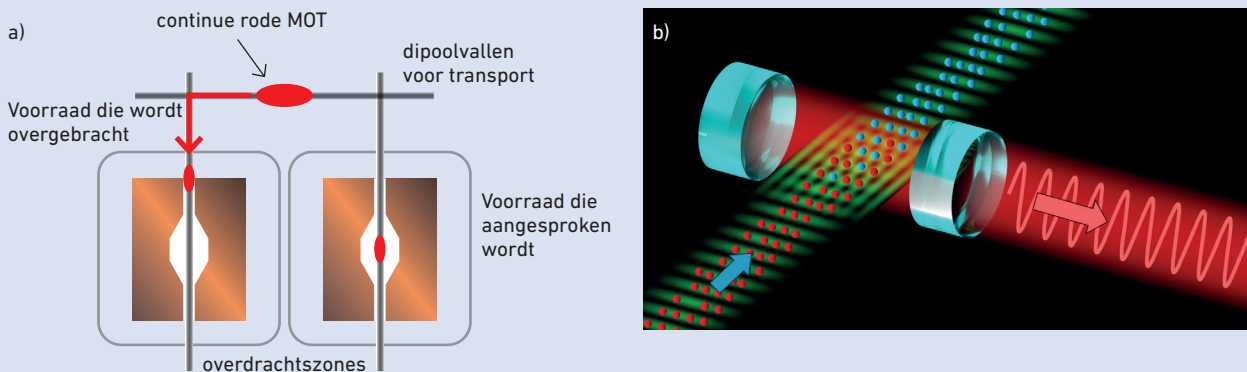
Florian Schreck studeerde natuurkunde aan de universiteiten van Konstanz en van Grenoble en promoveerde in 2002 aan de École Normale Supérieure in Parijs. Hij is sinds 2013 hoogleraar experimentele quantumfysica bij het Institute of Physics aan de Universiteit van Amsterdam. Hij is lid van het onderzoekscentrum voor Quantum Software QuSoft en leidt het Quantum Delta NL Ultracold Quantum Sensing Testbed. F.Schreck@uva.nl

REFERENTIES

- 1 C. J. Foot, *Atomic Physics*, Oxford University Press (2005).
- 2 N. P. Robins et al., *Atom lasers: production, properties and prospects for precision inertial measurement*, *Phys. Rep.* **529**, 265 (2013).
- 3 A. Einstein, *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases*, *Königliche Preussische Akademie der Wissenschaften. Sitzungsberichte*, 261–267 (1924) en *Quantentheorie des einatomigen idealen Gases, Zweite Abhandlung*, *ibid.*, 3–14 (1925).
- 4 The Nobel Prize in Physics 2001, www.nobelprize.org/prizes/physics/2001/summary.
- 5 G. W. Biedermann et al., *Zero-Dead-Time Operation of Interleaved Atomic Clocks*, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 170802 (2013).
- 6 C.-C. Chen et al., *Continuous Bose–Einstein condensation*, *Nature* **606**, 683–687 (2022).
- 7 A. D. Ludlow, et al., *Optical atomic clocks*, *Rev. Mod. Phys.* **87**, 637 (2015).
- 8 J. Chen, *Active optical clock*, *Chin. Sci. Bull.* **54**, 348 (2009).
- 9 D. Meiser et al., *Prospects for a Millihertz-Linewidth Laser*, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 163601 (2009).
- 10 M. A. Norcia et al., *Superradiance on the millihertz linewidth strontium clock transition*, *Sci. Adv.* **2**, e1601231 (2016).



Figuur 4. Waarneming van bose-einsteincondensatie (BEC). a) Dichtheidsverdeling van het gas in het reservoirgebied, in vooranzicht. Het BEC is kleiner dan de resolutie van de afbeelding. b) Dichtheidsverdeling nadat alle laserstralen gestopt zijn en het gas is losgelaten en in vrije val uitzet gedurende 18 ms. Thermisch gas zet isotroop uit met een snelheid die evenredig is met de wortel van de temperatuur ervan. Bij een laag aantal atomen is de vorm van de verdeling een convolutie van de oorspronkelijke verdeling en deze thermische expansie. Als het aantal atomen hoog genoeg is, verschijnt er nog een elliptische vorm in het midden van de thermische wolk uit het kuiltje en het reservoir. De elliptische expansie is een typerend kenmerk van BEC's en komt voort uit de afstotende wisselwerking tussen de atomen.



Figuur 5. Continu werkende optische atoomklokken bouwen. a) Multi-ensemble klok [5]: atomen uit een continu werkende rode MOT worden achtereenvolgens overgebracht naar een van de verschillende overdrachtszones. Op deze manier zijn er altijd in ten minste één zone atomen aanwezig die aangesproken kunnen worden, waardoor de klok continu kan blijven lopen. De zones worden omringd door schilden tegen strooilig, magnetische velden en fluctuaties in thermische achtergrondstraling. b) Superstralende klok [8,9,10]: atomen van een continue μK -temperatuurstraal worden in de aangeslagen toestand van een optische klokovergang gepompt. Als ze in een optische trilholte komen, sturen ze superstralend een foton uit op de frequentie van de klokovergang. Dit resulteert in een continue laserstraal met deze frequentie die uit de trilholte komt.