

BOSE-EINSTEIN CONDENSATIE

STUDIE VAN HET GEDRAG VAN ATOMEN BIJ HET ABSOLUTE NULPUNT

door E.D. van Ooijen, K.M.R. van der Stam,
D. van Oosten, F. Ditewig, J. van der Weg, J.M. Vogels
en P. van der Straten

*De auteurs zijn werkzaam bij de Universiteit Utrecht,
Princetonplein 1, 3584 CC Utrecht*

In 1925 voorspelde Einstein dat bij extreem lage temperaturen een plotselinge verandering zal voordoen in het gedrag van de atomen. De normale situatie waarin atomen zich vrij door de ruimte bewegen en door onderlinge botsingen energie uitwisselen, zou in de buurt van het absolute nulpunt plaats maken voor een toestand waarin de atomen een collectief gedrag vertonen. Deze verandering van een ideaal gas naar een ultra-koud, gecondenseerd gas wordt Bose-Einstein condensatie (BEC) genoemd en is één van de meest opzienbarende fenomenen in de wereld van de quantum-mechanica.

Het duurde echter tot 1995 voordat dit fenomeen voor het eerst ook experimenteel werd aangetoond, vrijwel simultaan door twee Amerikaanse onderzoeksgroepen. Voor deze prestatie werd in 2001 dan ook de Nobelprijs uitgereikt. Deze doorbraak werd bereikt, doordat deze groepen twee technieken om een gas af te koelen samenvoegden, namelijk laserkoeling en verdampingskoelen.

Bij de eerste techniek wordt laserlicht gebruikt om de atomen af remmen. Een atoom in een resonante laserbundel kan lichtdeeltjes, oftewel fotonen, absorberen, waarbij het foton zijn impuls overdraagt aan het atoom. Het atoom zal dit foton echter weer uitzenden, maar zal dit doen in willekeurige richting, zodat de bijdrage van de impulsverandering door de emissie zal uitmiddelen na vele absorptie/emissie-cycli en de kracht door absorptie zal resteren.

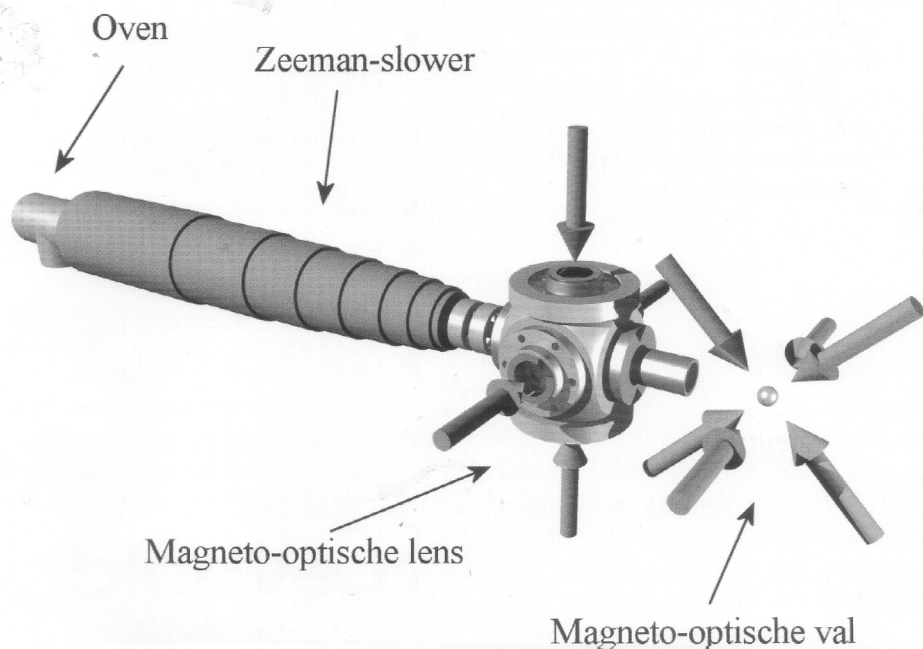
Op deze wijze kan de snelheid en ook de temperatuur van de atomen worden gemanipuleerd met behulp van het laserlicht. De tweede techniek, verdampingskoelen, is gebaseerd op het principe waarbij de warmste atomen uit een atomaire gas worden verwijderd, waarna de resterende atomen met elkaar botsen om een nieuwe, lagere evenwichtstemperatuur te krijgen.

Op 11 augustus 2004 is het de groep 'Atom Optics' van de Universiteit van Utrecht gelukt om deze prestatie te herhalen met een gas van natriumatomen. Daarvoor is een vrij complexe vacuümpstelling gebouwd die bovengenoemde technieken combineert om een gas met een temperatuur van ruwweg 650 Kelvin met 10 orden van grootte af te koelen tot een temperatuur van 150 nanoKelvin.

Laserkoeling

Figuur 1 toont een schematische weergave van de vacuümpstelling, ontworpen en grotendeels gebouwd door de werkplaats van de Universiteit, de Instrumentele Groep Fysica. Van links naar rechts is weergegeven de natriumbron, de Zeeman-slower, de collimatatie-sectie en de magneto-optische val.

De natrium-bron een oven met een blokje natrium in vaste vorm dat wordt verwarmd tot 380 °C, waarbij het verdampte natrium in gasvorm de oven verlaat via een tweetal diafragma's. Hierdoor ontstaat een bundel van natrium atomen met een gemiddelde snelheid van de 700 m/s en een flux van 10^{12} atomen per seconde. Belangrijk voor de vorming van een goede atomaire bundel is dat de vrije weglengte van de atomen in de orde is van enkele centimeters en groter is dan de diafragma's. Daartoe wordt de gehele ovenkamer afgepompt met een voorgepompte diffusie-pomp (Varian VHS-4, 1200 l/s) tot een druk van $2 \cdot 10^{-8}$ mbar, oplopend tot $5 \cdot 10^{-8}$ mbar in gebruik.



*Figuur 1.
Schematisch overzicht van de opstelling met van links naar rechts de natriumoven, de Zeeman-slower, de collimatatie-sectie en de magneto-optische val die het mogelijk maakt een wolk met $6 \cdot 10^{10}$ natrium-atomen af te koelen tot een temperatuur van 350 μ K.*

Vervolgens komen de atomen in de Zeeman-slower, die bestaat uit een stalen buis met een lengte van 1.30 meter en diameter van 5 cm, waar omheen een spoel gewonden is met een aflopend aantal windingen. De atoombundel wordt overlapt met een laserbundel komend uit tegenovergestelde richting.

Het laserlicht wordt geproduceerd door twee zogenaamde kleurstof-lasersystemen, waarmee de gewenste kleur van het laserlicht met grote precisie kan worden ingesteld. De systemen staan opgesteld in een aparte kamer om storende factoren te voorkomen voor maximale stabiliteit van de lasersystemen, waarbij het laserlicht wordt getransporteerd van de laserkamer naar de experimenteerkamer met behulp van optische fibers.

De kleur van de laserlicht wordt ingesteld op 589 nm en de atomen worden afgeremd door de absorptie van het laserlicht. Het probleem dat hierbij optreedt, is dat door de veranderende snelheid van het atoom, de kleur van het laserlicht die het atoom 'ziet' verandert door het zogenaamde Doppler-effect en daarom zal het niet langer de fotonen absorberen. De functie van de spoel is dat deze een magneetveld produceert die de kleur van het laserlicht dat de atomen absorberen kan beïnvloeden, wat het Zeeman-effect genoemd wordt. Door nu de vorm van het magneetveld, oftewel de vorm van de spoel, goed te kiezen kan het Doppler-effect precies worden gecompenseerd door het Zeeman-effect, waardoor de atomen resonant blijven met het laserlicht en daardoor blijven participeren in het afrem-proces. Op deze wijze wordt de atoombundel afgeremd tot een eindsnelheid van 40 m/s. Botsingen van atomen met achtergrond gas kunnen dit proces verstoren. Daarvoor is een druk van $< 10^{-8}$ mbar noodzakelijk, zodat de vrije weglengte van de atomen vrijwel gelijk is aan de lengte van de buis. Dit wordt verzorgd door twee voorgepompte turbo-pompen (Balzers, 240 l/s).

De emissie van fotonen gedurende het laserkoelingsproces draagt niet bij aan een resulterende kracht, maar wel aan overgebleven bewegingen van de atomen in willekeurige richting, een zogenaamde Brownse beweging. Deze zorgt ervoor dat de afgeremde atoombundel aan het eind van de Zeeman-slower divergent wordt. Om deze divergentie te compenseren wordt een zogenaamde magneto-optische lens gebruikt. Dit apparaat zorgt ervoor dat de divergente atomen met behulp van de laserkracht die wordt gestuurd door een magneetveld, loodrecht op de bundel terug worden gebogen naar de propagatie-as van de atomen.

Het focus van deze lens ligt uiteindelijk in de zogenaamde magneto-optische val (MOT). De afgeremde en gefocuseerde atomen worden hier ingevangen in het overlapgebied van 6 laserbundels, opgesteld in een orthogonaal assenstelsel door middel van opnieuw laserkoeling in samenwerking met een magneetveld. Dit apparaat maakt het mogelijk om een wolk van $6 \cdot 10^{10}$ atomen met een diameter van ongeveer één centimeter in te vangen en af te koelen tot een temperatuur van 350 μ K. Deze temperatuur wordt gemeten door de MOT voor enkele milliseconden uit te zetten en de koude wolk af te beelden op een CCD-camera, waarbij de mate van expansie de gemiddelde snelheid en daarmee de temperatuur van de wolk atomen bepaalt. Deze gemeten temperatuur is een typische

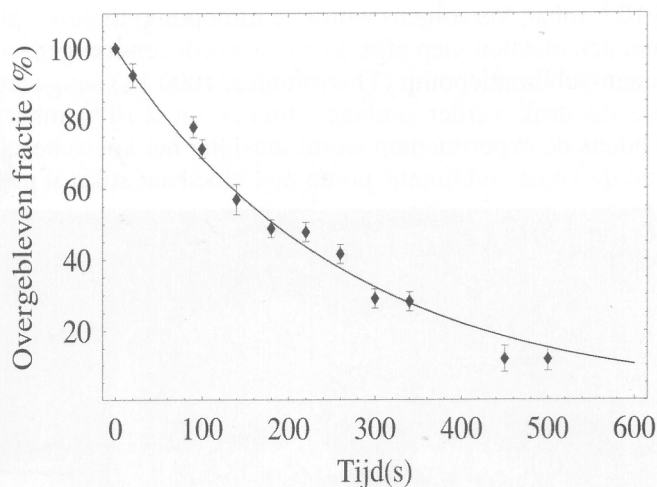
limiet voor deze laserkoelingstechniek, hetgeen wordt veroorzaakt door de reeds genoemde Brownse beweging.

Verdampingskoeling

Ondanks deze toch al vrij lage temperatuur, is er nog lang geen sprake van Bose-Einstein condensatie. Daarvoor is het noodzakelijk om een andere techniek te gebruiken, namelijk verdampingskoeling. Voordat deze techniek kan worden toegepast dienen de atomen eerst te worden overgeladen naar een ander type val die niet meer gebruik maakt van het laserlicht, waardoor een lagere temperatuur bereikt kan worden. Daarvoor is een complexe spoelenset ontwikkeld en gebouwd om de MOT, die een magneetveld produceert die het mogelijk maakt om de atomen magnetisch vast te houden. Daarvoor is een relatief hoog magneetveld-gradient nodig en dus worden de spoelen bedreven met relatief hoge (300 A) stromen, met het gevolg dat de spoelen verhit worden. Om dit te voorkomen zijn de spoelen gewonden van hol koperdraad, waardoor vervolgens met een druk van 8 bar water loopt voor koeling.

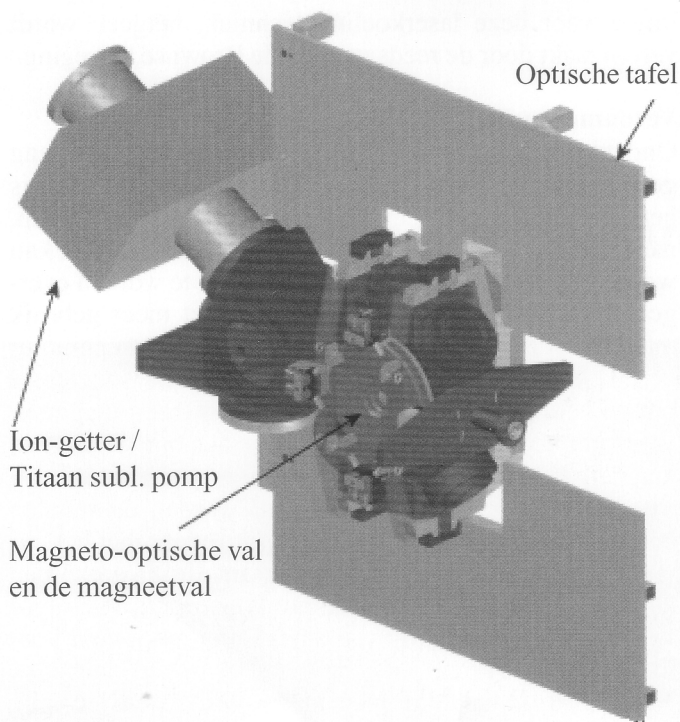
Nadat er voldoende atomen in de MOT geladen zijn, wordt deze uitgezet en tegelijkertijd worden de spoelen van de magnetische val aangezet. Hierbij wordt ruwweg één derde van de atomen overgeladen, verandert de temperatuur van de wolk nauwelijks en verandert de vorm van een bol naar de ellipsoïde.

Nu de atomen gevangen zijn in deze 'donkere' magneetval wordt verdampingskoeling toegepast. Een rf-antenne, geplaatst vlakbij de wolk atomen, produceert een radiofrequentie, die de atomen die zich in een bepaalde magneetveld-sterkte bevinden kan verwijderen overeenkomend met deze frequentie. Atomen met de hoogste snelheid zullen in de val ook in een sterker magneetveld komen. Deze atomen kunnen nu met behulp van de juiste, relatieve hoge, radio-frequentie verwijderd worden uit de val. De overgebleven atomen met nu gemiddeld een lagere bewegingsenergie zullen met elkaar botsen en een nieuwe evenwichtstemperatuur vormen die lager is dan



Figuur 2.

Meting van de levensduur van de wolk atomen in de magneetval, die een 1/e levensduur geeft van 265 s, hetgeen overeenkomt met een druk van $6 \cdot 10^{-12}$ mbar in de vacuümkamer.



Figuur 3.

Constructietekening van de vacuümkamer met de ion-getter/titaan-sublimatiepomp en de magneto-optische val met daar omheen de spoelenset van de magneetval.

de oorspronkelijke temperatuur. Dit proces wordt herhaald, waarbij de radio-frequentie steeds verder wordt verlaagd tot we dicht bij de temperatuur zijn waar Bose-Einstein condensatie optreedt, hetgeen enkele minuten kan duren.

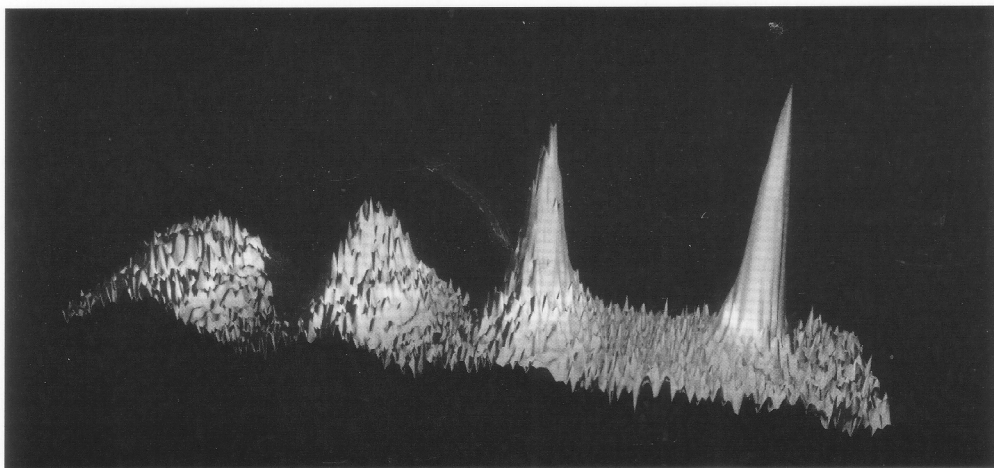
Het is belangrijk dat we tijdens dit proces zo weinig mogelijk atomen verliezen door botsingen met achtergrondgas. Om een levensduur van de atomen in de magneetval te garanderen van enkele minuten is een vacuüm van $<1 \cdot 10^{-11}$ mbar noodzakelijk. De vacuümkamer is daarom voorzien van een voorgepompte turbo-pomp (Balzers, 240 l/s), die de kamer na uitstoken tot 150°C afpompt tot $5 \cdot 10^{-9}$ mbar. Vervolgens wordt de turbopomp uitgezet en met een metalen klep afgesloten en wordt een ion-getter/titaan-sublimatiepomp (Thermionics, 1000 l/s) aangezet die de druk verder omlaag brengt tot $2 \cdot 10^{-11}$ mbar. Tijdens de experimenten wordt tenslotte het koelscherm van de Titaan-sublimatie pomp met vloeibaar stikstof ge-

koeld wat leidt tot een druk onder de door onze drukmeters te meten druk van $1 \cdot 10^{-11}$ mbar.

Om toch een maat voor de druk te krijgen wordt het volgende experiment uitgevoerd. De atomen uit de MOT worden overgeladen naar de magnetische val. Na een bepaalde tijd wordt de magneetval uitgezet en de MOT weer aangezet waarbij de fluorescentie van deze MOT wordt vergeleken met de oorspronkelijke fluorescentie (zie figuur 2). Door dit voor verschillende tijden te doen kan de levensduur van de atomen in de magneetveld worden bepaald, die na het fitten van een exponentiële vervals-functie resulteert in een $1/e$ -levensduur van 265 s, wat overeenkomt met een druk van $6 \cdot 10^{-12}$ mbar in de vacuümkamer. Voor het behalen van deze druk was het noodzakelijk om de vacuümkamer speciaal te ontwikkelen, zodat de ruimtehoek van ion-getter/titaan-sublimatiepomp-combinatie naar het interactie-centrum optimaal is (figuur 3). Bovendien zijn de vensters, die zorgen voor de optische toegang van het laserlicht, met een diameter van 8 cm en dikte 12 mm gemonteerd op de zittingen van een CF-100 flens met aluminium Helicoflex-ringen aan beide zijden van de vensters, die zorgen voor een lek-vrije glas-naar-metaal overgang.

Na een verdampingstijd van 2 1/2 minuten is de natriumwolk voldoende koud en treedt de Bose-Einstein condensatie op. Het belangrijkste bewijs voor dit fenomeen wordt geleverd door de CCD-camera opname van de expansie van de wolk atomen, die verschilt van de expansie van een normaal gas door de veranderde interacties van de coherente atomen in het condensaat. Figuur 4 laat de afbeelding van de wolk zien na een expansietijd van 20 ms bij steeds lagere temperatuur, totdat het condensaat ontstaat.

Voor verdere studie van de eigenschappen van het condensaat, wordt op dit moment het condensaat overgeladen naar een optische rooster. Dit is een periodieke potentiaal voor atomen die ontstaat door het interferentiepatroon van overlappende laserbundels. De atomen zullen zich verdelen over de maxima van dit interferentiepatroon en de onderlinge interacties kunnen worden ingesteld door bijvoorbeeld de intensiteit van deze laserbundels aan te passen. Op deze wijze hopen we samen met de theoretische ondersteuning uit de groep van prof. H.T.C. Stoof nieuwe theorieën op het gebied van de fysica van Bose-Einstein condensatie experimenteel te kunnen bevestigen.



Figuur 4.

3D-representatie van CCD-opnames van een geëxpandeerde wolk met een temperatuur (van links naar rechts) van $2.2 \mu\text{K}$, 816 nK , 330 nK en $< 200 \text{ nK}$, waarbij bij de laatste opname Bose-Einstein condensatie optreedt.