

# Koud, kouder, koudst

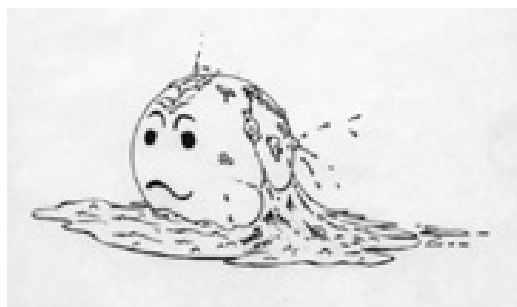


In november 1997 maakte de Nobel commissie bekend, dat de Nobelprijs voor de natuurkunde voor 1997 uitgereikt zal worden aan Bill Phillips, Steven Chu en Claude Cohen-Tannoudji. Zij krijgen de prijs voor het werk, dat ze verricht hebben op het gebied van de laserkoeling van atomen. Hoewel de Nobelprijs zoals elk jaar aan personen wordt uitgereikt, wordt de prijs van dit jaar vooral beschouwd als een prijs voor het gehele gebied.

Laserkoeling is een betrekkelijk nieuw gebied in de atoomfysica. Bij kamertemperatuur bewegen de atomen zich met hoge snelheden ( $\approx 1000$  m/s) en het bestuderen van de atomen wordt sterk beïnvloed door hun snelheid. Hoewel verschillende methoden zijn ontwikkeld om de effecten zo klein mogelijk te maken, bleef een daadwerkelijke oplossing, namelijk het stilzetten van atomen, achterwege. Deze mogelijkheid werd pas geboden toen onderzoek rond 1980 uitwees, dat m.b.v. laserlicht een kracht kan worden uitgeoefend op atomen. De ontwikkelingen volgden elkaar toen snel op en vandaag de dag wordt de techniek door tientallen groepen over de gehele wereld gebruikt.

In deze bijdrage wordt een overzicht gegeven van de ontwikkeling op dit gebied, met nadruk op de activiteiten in Utrecht. Verschillende experimenten zullen aan de orde komen, waarin de verschillende aspecten van laserkoeling aan de orde komen.

## Atomen een duwtje geven



In het dagelijkse leven zullen we ons niet snel realiseren, dat licht een kracht kan uitoefenen. Wanneer we 's ochtends de gordijnen openen en het zonlicht de kamer binnendringt, dan voelen we ons als het ware even teruggedreven door het felle licht, echter dat terugwerpen is veel meer psychisch dan fysiek. De kracht, die zonlicht kan uitoefenen op je lichaam, is verwaarloosbaar klein. Dat verandert niet als we i.p.v. de zon een laser gebruiken.

De situatie wordt veel gunstiger als we de kracht beschouwen, die laserlicht kan uitoefenen op atomen. Om een ruwe afschatting te maken, kunnen we kijken naar de impuls overdracht van het laserlicht op de atomen. Einstein beschouwde rond 1917 de elementaire processen die plaatsvinden tussen een lichtveld en een atoom. Daarbij wordt altijd een foton, oftewel een lichtquantum, uitgewisseld. Bekijken we het impuls van het foton, dan zien we dat die impuls wel 10.000 keer kleiner is dan de impuls van een atoom met een thermische snelheid. Er zijn dus tienduizenden fotonen nodig om een atoom tot rust te brengen.

Hoewel de impuls van een foton klein is, kan het verstrooien van fotonen kan met hoge snelheid gebeuren. Bij de absorptie van fotonen is het atoom slechts een tiental nanoseconde in de aangeslagen toestand, waarna emissie van het foton volgt. Het verstrooien van 10.000 fotonen kan gebeuren in het tijdsbestek van enkele milliseconden, zodat de totale remweg van het atoom slechts een meter bedraagt. Een kleine complicatie bij de emissie van de fotonen is, dat ook deze overgang een terugstoot tot gevolg heeft op het atoom. Echter omdat de terugstoot bij de emissie in een willekeurige richting is, zal het effect van vele spontane emissies uitmiddelen en geen gevolg hebben.

Van groter belang is de complicatie die optreedt door de nauwbandigheid van het laserlicht. Atomen absorberen licht in zeer nauw frequentie interval. Voor een bewegend atoom wordt de absorptie frequentie verschoven t.g.v. het Doppler effect. Denk daarbij aan het plotseling verlagen van de frequentie

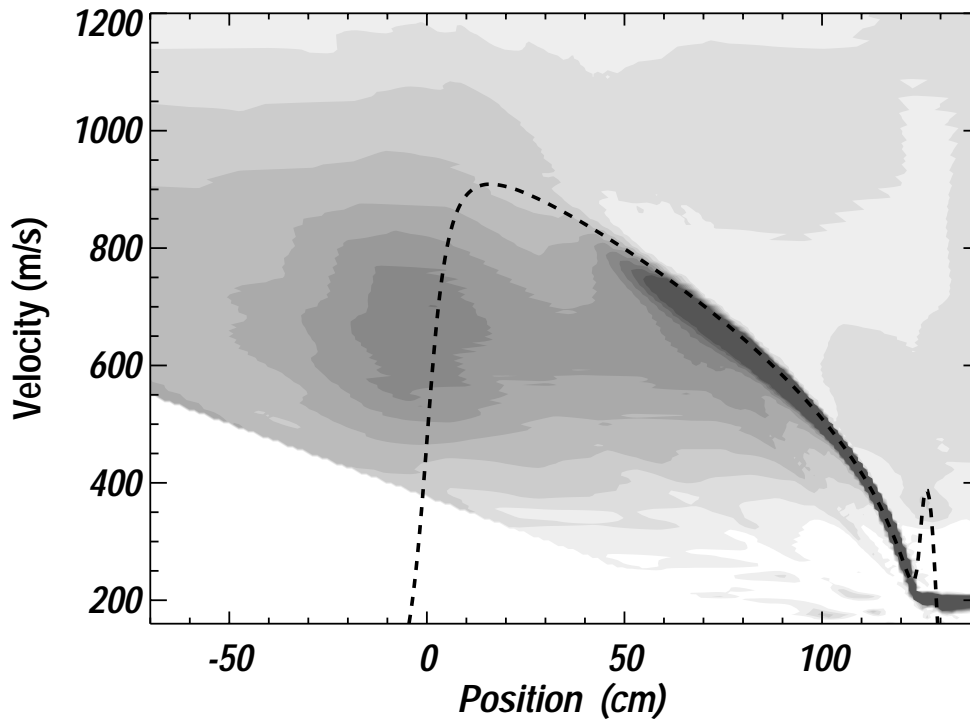


Figure 1: Snelheidsverdeling van atomen in de Zeeman magneet, waarbij de dichtheid hoger wordt naarmate de grijstint donkerder wordt. De bron voor de atomen bevindt zich op -50 cm en de magneet strekt zich uit van 0 tot 125 cm. Met een stippellijn is aangegeven, voor welke snelheid de atomen resonant zijn met het laserlicht.

van het geluid, dat waargenomen wordt door een voetganger, wanneer een bromfiets passeert<sup>1</sup>. Als we atomen willen afremmen van thermische snelheid naar rust, dan zal de absorptie frequentie door het Doppler effect sterk verschuiven, waardoor het licht slechts even resonant is.

Ter compensatie hiervoor zijn verschillende technieken ontwikkeld. We zullen hier de Zeeman techniek bespreken, die in Utrecht toegepast wordt. Daarbij wordt de resonantie frequentie van het atoom verschoven m.b.v. een magneetveld. Een atoom in een magneetveld ondergaat een Zeeman verschuiving van de resonantie frequentie. Door op elk moment tijdens het afremmen van het atoom de Doppler verschuiving te compenseren door de Zeeman verschuiving, kan het atoom over het gehele traject in resonantie gehouden worden met het laserlicht.

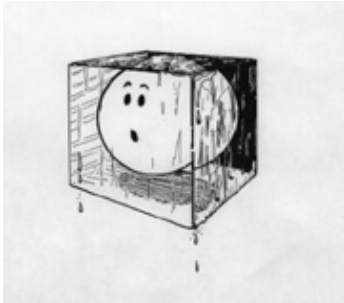
In figuur 1 hebben we het resultaat van het vertraagproces in een Zeeman magneet weergegeven. De meting is weergegeven in een contourplot, waar de verschillende kleuren de dichtheid van de atomen aangeven. We zien dat uit de bron een brede snelheidsverdeling van atomen komt, de Maxwell-Boltzman verdeling. In dit geval ligt de meest waarschijnlijke snelheid bij 800 m/s en de verdeling is 800 m/s breed. In de figuur hebben we ook aangegeven bij welke snelheid de atomen resonant zijn met het laserlicht. We zien, dat zo gauw de atomen in resonantie komen met het licht, de atomen vertraagd worden door het verstrooien van de fotonen. Zo worden alle atomen vertraagd en afgeremd tot 200 m/s, waar we door een truc met het magneetveld de atomen ontkoppelen van het laserlicht. Verder zien we, dat bijna alle atomen werkelijk vertraagd worden. De breedte van de verdeling is teruggebracht van 800 m/s tot ongeveer 10 m/s.

De Zeeman techniek werd als eerste onderzocht door Bill Phillips en zijn medewerkers en dat was één van de redenen om aan hem de Nobelprijs toe te kennen. Een betere indruk van de werking van

<sup>1</sup>Het effect kan ook eenvoudig worden waargenomen 's avonds langs de snelweg: wanneer de auto's op je afkomen dan is het uitgezonden licht wit, terwijl de passerende auto's een rode kleur uitzenden

de Zeeman techniek kan verkregen worden door de figuur  $90^\circ$  te draaien. De bron kan dan vergeleken worden met een kraan waaruit water spuit en de magneet als een trechter, die al het water in een dunne straal bundelt. Atomen, die met verschillende snelheden uit de bron vertrekken, worden alle naar één snelheid vertraagd. De Zeeman techniek wordt veelal als de eerste stap gebruikt voor de productie van koude atomen. Atomen kunnen met de Zeeman techniek naar voldoende lage snelheid gebracht worden om verder gevangen en gekoeld te worden.

## Atomen stilzetten



De volgende stap is de koeling van atomen met laserlicht. Koeling verwijst hier naar het verlagen van de temperatuur van de atomen. Atomen die in evenwicht zijn met de omgeving, hebben een snelheidsverdeling (de Maxwell-Boltzman verdeling), die karakteristiek is voor de omgevingstemperatuur. Een hogere temperatuur betekent een bredere verdeling. Door slim gebruik te maken van het Doppler effect kan de snelheid van de atomen gedempt worden.

Atomen worden daarvoor opgesloten met twee laserbundels in één richting, die beide iets onder resonantie verstemd zijn. Door het Doppler effect wordt de laserbundel, die tegengesteld gericht is aan het de snelheid van het atoom in frequentie omhoog verstemd, d.w.z. dichter bij resonantie. De tegengesteld gerichte laserbundel wordt dus beter verstrooid en de snelheid van het atoom wordt verlaagd. Wanneer het atoom de andere richting op beweegt dan is de rol van beide laserbundels omgedraaid en wordt wederom de snelheid verlaagd. Welke richting het atoom ook op beweegt, altijd wordt de snelheid gedempt. We spreken dan van een optische stroop<sup>2</sup>, waarin de atomen zich bewegen. Zoals de knikers in stroop snel afgeremd worden, zo worden ook de atomen in de optische stroop afgeremd. Dat afremmen gebeurt in een zeer korte tijd van een paar microseconden.

Nadeel van de optische stroop is, dat hij slechts werkt voor vrij lage snelheden. Voor hogere snelheden vliegen de atomen door de stroop zonder dat hun snelheid aangepast wordt. Vandaar dat de atomen eerst vertraagd worden met de Zeeman magneet naar voldoende lage snelheid. Verder wordt een inhomogeen magneetveld gebruikt, waardoor bij dezelfde verstemming van de laser, atomen gedreven worden naar het centrum van de val. Combinatie van koeling en vangen van atomen leidt dan tot een compacte wolk van atomen met extreem lage temperatuur.

In figuur 2 hebben we een afbeelding gemaakt van de val door het meten van het uitgezonden licht van de atomen. Typische afmeting van de val is in de orde van 1 mm, terwijl er normaal zo'n miljoen atomen verzameld zijn in de val. De temperatuur van de atomen wordt gemeten door korte tijd het laserlicht te onderbreken, waardoor de wolk zich langzaam uitdijt door de eindige snelheid van de atomen. Daarna worden de atomen weer ingevangen worden door het laserlicht weer aan te schakelen. Alle atomen die dan nog niet uit de bundels gevlogen zijn, worden weer ingevangen. Door dit aantal atomen te meten voor verschillende onderbrekingstijden kunnen we een indruk krijgen van de snelheid van de atomen. Typische snelheden die we meten zijn in de orde van 30 cm/s, oftewel een temperatuur van 200  $\mu\text{K}$ . Vergeleken met temperaturen die verkregen worden met "conventionele" koeltechnieken ( $\approx 1\text{K}$ ), is dit een enorme verbetering. Latere ontwikkeling, waaraan Claude Cohen-Tannoudji een grote theoretische bijdrage heeft geleverd, maken het mogelijk om onder speciale omstandigheden naar veel lagere temperaturen te gaan beneden 1  $\mu\text{K}$ .

Steven Chu heeft samen met zijn medewerkers als eerste de techniek van vangen en koelen van atomen ontwikkeld, wat de reden is geweest om aan hem de Nobelprijs toe te kennen. Vandaag de dag wordt deze techniek in vele verschillende laboratoria toegepast, met name vanwege de relatieve eenvoud.

---

<sup>2</sup>In het engels *optical molasses*

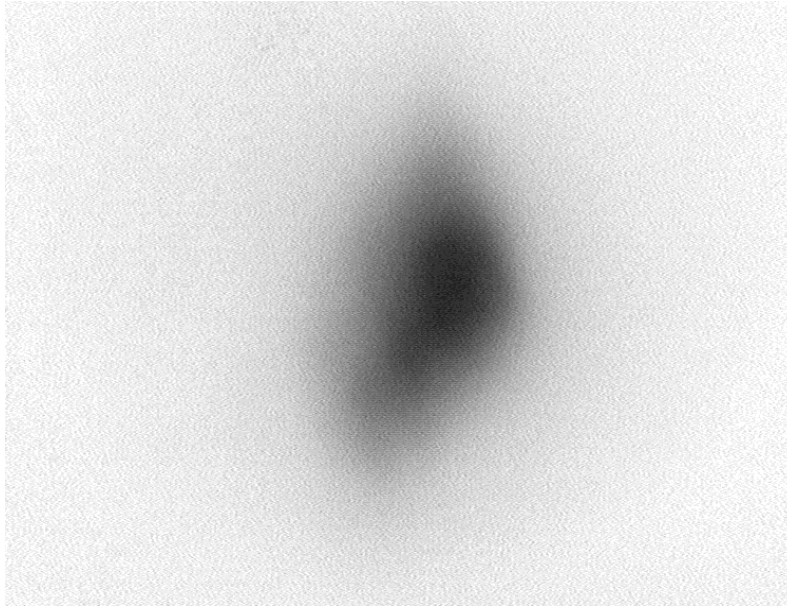


Figure 2: Meting met een CCD-camera van de dichtheidsverdeling van atomen in de val. De afmeting van de projectie is ongeveer 1 mm, dus de afmeting van de val is niet veel groter dan 0.3 mm.

De foto op de voorkant van deze vakidoot toont de eerste generatie van een val, die ontwikkeld is in Utrecht. Het belangrijkste gedeelte van de opstelling bestaat slechts uit een glazen cel, waarop zes vensters gemonteerd zijn om toegang te verlenen aan zes laserbundels, die gebruikt worden op de atomen te vangen en te koelen in drie dimensies. De huidige versie van de val is gebouwd in een hoog-vacuüm opstelling en maakt het mogelijk om de verschillende processen, die zich afspelen in de val, nader te bestuderen.

## Waarom eigenlijk?

Wat als we deze koude atomen hebben geproduceerd. Wat kunnen we daarmee bereiken? We zullen hier slecht enkele voorbeelden geven. Zoals al aangegeven in de inleiding kunnen we nu beter spectroscopische metingen verrichten op deze atomen, waardoor de overgangen in de atomen met grotere nauwkeurigheid bepaald kunnen worden. Dat dit niet alleen van fundamenteel belang is, mag duidelijk zijn uit het feit, dat vandaag de dag de tijdstandaard gebaseerd is op een optische overgang in cesium. Betere spectroscopische nauwkeurigheid is dus gekoppeld aan een betere tijdstandaard. Door nu tijdsignalen van verschillende satellieten te



vergelijken en de tijdverschillen met grote nauwkeurigheid te meten, kan de positie op aarde met grote nauwkeurigheid bepaald worden.

Een andere toepassing is de bestudering van ultra-koude botsingen. Door de lage temperatuur vind de botsing als het ware in slow motion plaats. In het onderzoek in Utrecht kijken we naar de optische botsingen, waarbij *tijdens* de botsing een foton wordt geabsorbeerd. Daarbij kan de botsing niet alleen sterk gemodificeerd worden, maar door de juiste frequentie van het licht te kiezen kan de onderlinge afstand waarbij absorptie plaatsvindt gekozen worden. Dit levert een grote hoeveelheid informatie over de interactie-potentialen van moleculen op grote afstanden, die op andere wijze nooit verkregen kan worden. De studie van optische botsingen hebben een sterke ontwikkeling doorgemaakt de laatste jaren en een belangrijke bijdrage geleverd aan het begrip, dat we vandaag de dag hebben van atomaire wisselwerkingen. Ze vormen als het ware modelsystemen, waarbij door de lage temperatuur het aan-

tal vrijheidsgraden in het systeem sterk gereduceerd zijn en waardoor een zinvolle vergelijking tussen theorie en experiment mogelijk wordt.

Tot slot moet de belangrijke bijdrage, die laserkoeling heeft geleverd aan het bereiken van Bose-Einstein condensatie (BEC)<sup>3</sup>, niet onvermeld blijven. Hierbij wordt bij extreem lage temperaturen en hoge dichtheden een nieuwe toestandsfase bereikt, naast de al bekende fasen van vast, vloeibaar en gas. BEC werd voor het eerst aangetoond in 1996, nadat Einstein en Bose het al 70 jaar eerder op theoretische gronden voorspeld hadden. Het aantonen van BEC heeft vele speculaties tot gevolg gehad en men maakt zich nu op om de atoom-laser te ontwikkelen, die analoog aan de laser een coherente bundel van atomen gaat produceren. Zoals de ontwikkelingen met de laser aantonen, kunnen we nu niet echt voorstellen, hoe dat ons leven van alledag gaat beïnvloeden. Maar het is niet makkelijk om voorspellingen te doen, zeker niet als het de toekomst betreft.

Peter van der Straten

---

<sup>3</sup>Over BEC is al eerder in de vakidoot een stukje verschenen