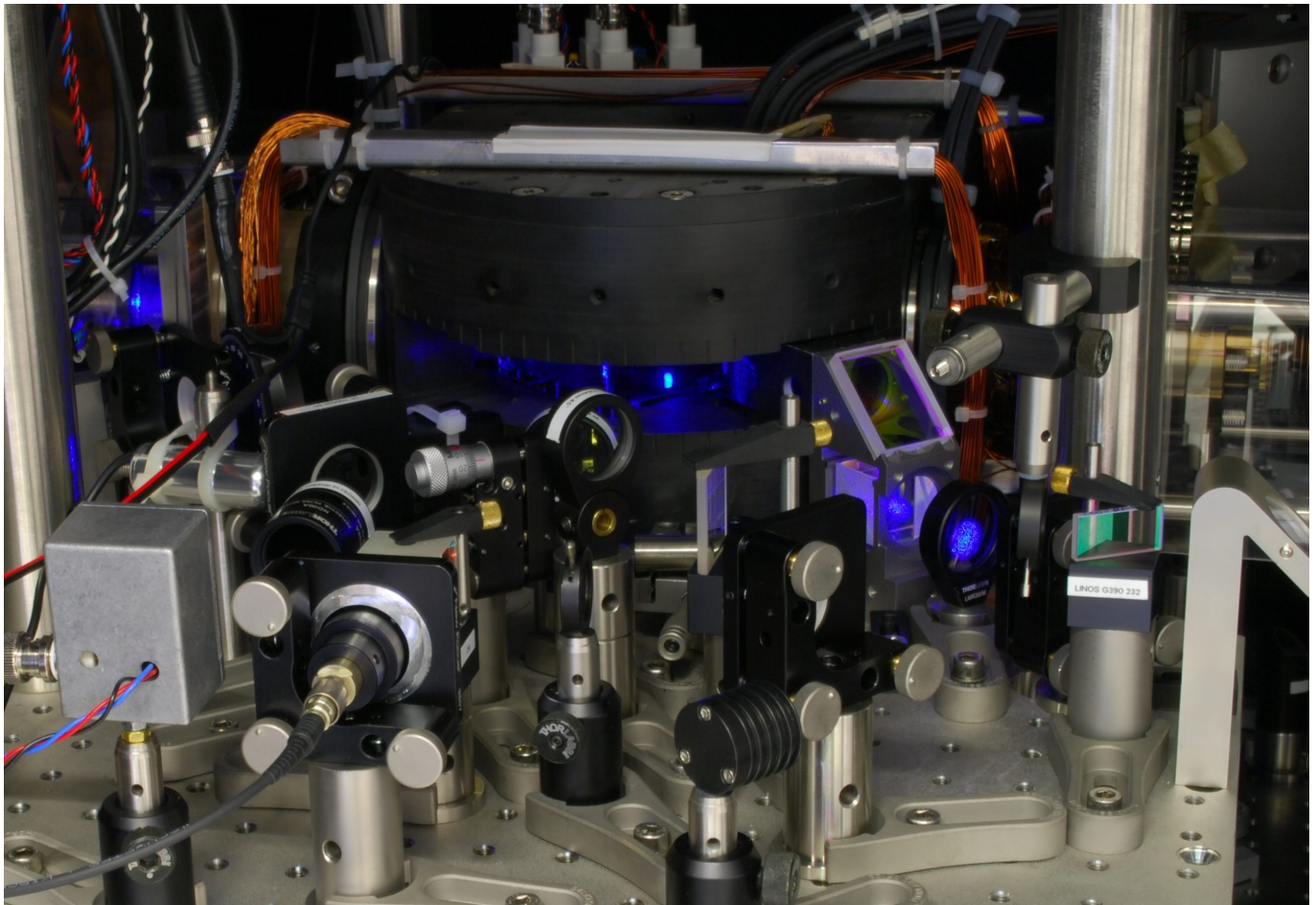


Ultrakoude gassen (1)

In deze wintermaanden vonden we het een leuk idee om een artikel rond het thema temperatuur te delen: over ultrakoude gassen, om precies te zijn. Als er wordt gesproken over een wetenschappelijk experiment in het nieuws, komen daar vaak een ultrakoud gas, een vacuüm en een hoop lasers bij kijken - zie bijvoorbeeld het artikel [dat we eerder deze week plaatsten](#). In een reeks van twee à drie artikelen zal ik een korte introductie geven in de werking van dergelijke ‘wetenschappelijke koelkasten’.



Afbeelding 1. Een experiment waarin ultra-koude atomen worden bekeken. Afbeelding: Florian Schreck.

Wat historische achtergrond

In het begin van de 20^e eeuw werden er door niemand minder dan Albert Einstein vele theorieën bedacht die ten grondslag liggen aan de moderne fysica. Eén van Einsteins voorspellingen werd gedaan aan de hand van een idee van Satyendra Nath Bose, een natuurkundige uit India. Samen kwamen ze tot de conclusie dat als een macroscopische hoeveelheid bosonen bij elkaar was, én die bosonen in een bijzonder lageenergietoestand zouden verkeren, deze deeltjes uiteindelijk in een *gemeenschappelijke* laagste-energietoestand zouden komen: een zogeheten ‘Bose-Einsteincondensaat’.

De bosonen waar het hierboven over gaat zijn een bepaald type deeltje dat in de natuur voorkomt. De karakteristieke eigenschap van bosonen is dat die deeltjes een heeltallige spin hebben: ze kunnen alleen ‘ronddraaien’ met een impulsmoment dat een geheel veelvoud is van een bepaalde waarde. Naast bosonen bestaan er ook *fermionen*. Deze deeltjes kunnen nooit in een Bose-Einsteincondensaat voorkomen. Het zogeheten ‘uitsluitingsprincipe van Pauli’ verhindert dat. (Dat uitsluitingsprincipe blijkt een gevolg te zijn van het feit dat fermionen juist half-tallige spin hebben.)

Het schijnt dat Einstein zelf vond dat de voorspelling van een bosonen-condensaat vooral aan Bose te danken was, maar desondanks is de ontdekking ook naar hem vernoemd. De theorie achter deze zogenoemde condensaten is op zichzelf al een prachtig voorbeeld van quantummechanica in actie, en heeft een belangrijke rol gespeeld in het testen van de quantummechanica als theorie van de natuur. In dit stuk ga ik echter vooral in op de vraag die een toegepaste natuurkundige zichzelf zou stellen: Hoe *máák* ik een gas nou eigenlijk ultrakoud?

Gedurende de afgelopen eeuw hebben veel onderzoekers zich druk gemaakt over deze vraag. Uiteindelijk heeft Nobelprijswinnaar Heike Kamerlingh Onnes op 10 juli 1908 in Leiden voor het eerst vloeibaar helium geproduceerd in het lab, door de temperatuur van helium te verlagen naar 4,2 kelvin (dat is -268.9 graden Celsius!) bij een druk van 1 atmosfeer. Door vervolgens de druk te verlagen kreeg het helium uiteindelijk een temperatuur van 1,5 kelvin – voldoende laag om het heliumgas te doen condenseren tot een vloeistof. Opmerkelijk genoeg waren de methodes die gebruikt werden door Kamerling Onnes goed vergelijkbaar met die van een moderne koelkast.

Het huidige record voor de laagste temperatuur gehaald in een laboratorium staat momenteel op naam van NASA's Cold Atom Laboratory. Zij hebben in het ruimtestation ISS een temperatuur van 100 nanokelvin kunnen realiseren, een tienmiljoenste graad boven het absolute temperatuurnulpunt. De mogelijkheid om materie af te koelen tot zulke lage temperaturen heeft uiteindelijk ook geleid tot de ontdekking van [supervoeistoffen](#) en [supergeleiders](#). Met name supergeleiders zijn tot de dag van vandaag een 'hot topic' dat veel natuurkundigen bezig houdt.

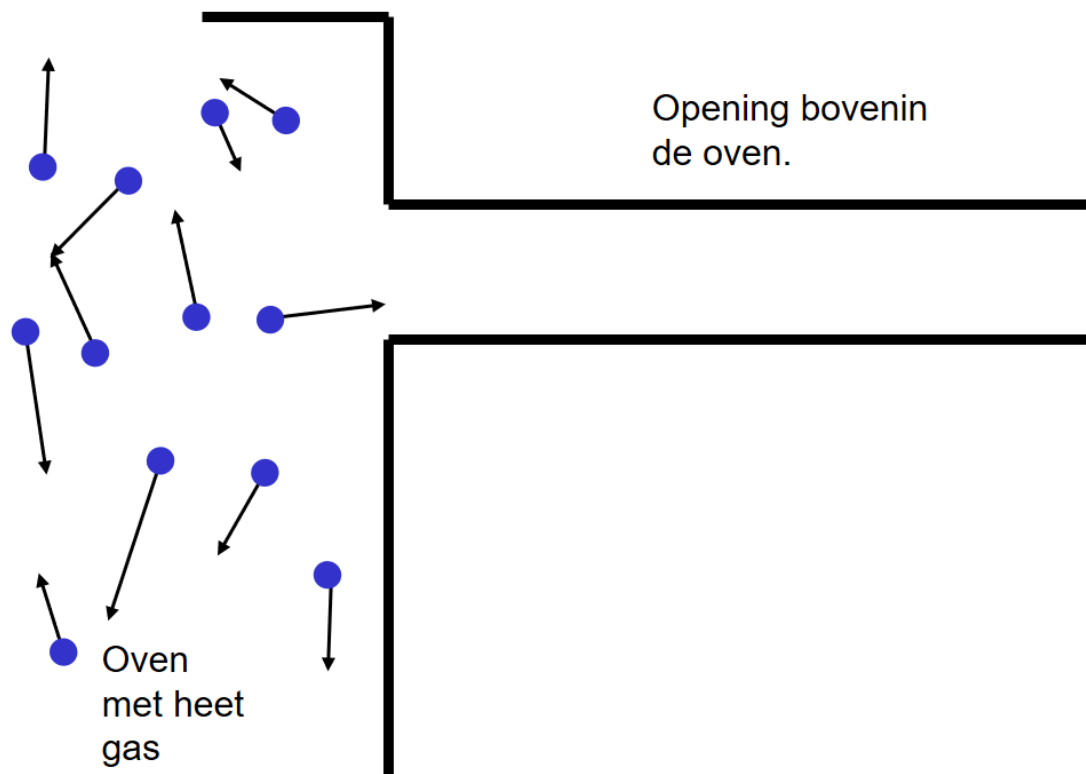
Omdat het zo'n typerend voorbeeld is uit de natuurkunde zal het maken van een Bose-Einstein condensaat het overkoepelende thema zijn in deze serie over ultra koude gassen. Een veelgebruikte methode om gassen af te koelen is die van laserkoeling – het onderwerp van dit artikel. Om een Bose-Einstein condensaat te maken, is laser koeling echter bij lange na niet genoeg en zullen er nog meer koeltechnieken moeten worden toegepast. Deze geavanceerdere technieken zal ik de lezer uiteraard niet onthouden: die worden in een later stuk nog nader beschreven.

Laserkoeling

Als we een bepaalde substantie willen afkoelen, moeten we beginnen bij het begin: het materiaal zelf. In laboratoria voor koude gassen wordt veelvuldig gebruikt gemaakt van twee soorten atomen die gekoeld worden: Rubidium en Strontium. Deze atomen hebben bepaalde eigenschappen die ze uitermate geschikt maken om af te koelen. De atoomstructuur staat bijvoorbeeld toe om de atomen vast te houden tegen zwaartekracht in met behulp van elektrische en magnetische velden, wat nodig is voor de latere fases van afkoelen.

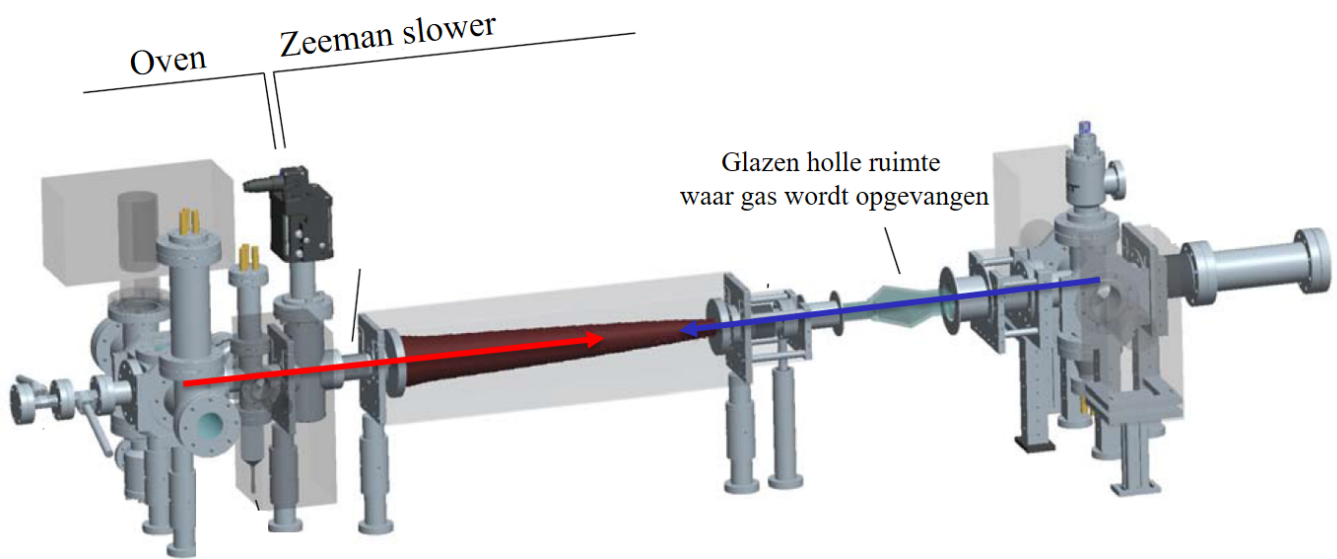
Men begint, gek genoeg, door een klein beetje van het element (bijvoorbeeld Rubidium) in een oven te stoppen. Door de hitte zullen de atomen van het blokje Rubidium langzaam verdampen. Door simpelweg een klein gat te maken aan de zijkant bovenin de oven, kunnen we deze atomen geleiden naar de rest van de koelkast, zoals te zien in afbeelding 2. Wellicht is het niet direct duidelijk uit de foto, maar deze opening is erg lang. De reden hiervoor is dat we eigenlijk alleen atomen willen hebben die in een rechte lijn naar rechts vliegen. In een gas van hete atomen vliegen alle atomen een willekeurige richting op. Doordat de opening van de oven heel lang is, zal (bijna) elk atoom dat door de opening komt tegen de wand van de buis botsen en daar blijven plakken. Alleen die atomen die precies de goede richting hebben

(exact naar rechts) komen uiteindelijk uit de oven. De rode lijnen geven aan wat de maximale uitwijking is van de atomen. In de praktijk zullen we natuurlijk nooit met deze methode erin slagen om een perfecte bundel van atomen te krijgen: de straal die naar buiten komt zal altijd enigszins breder worden. Zolang de bundel maar compact genoeg is, is dat echter geen probleem. Uiteindelijk zullen we de atomen opvangen, om deze expansie verder te beteugelen.

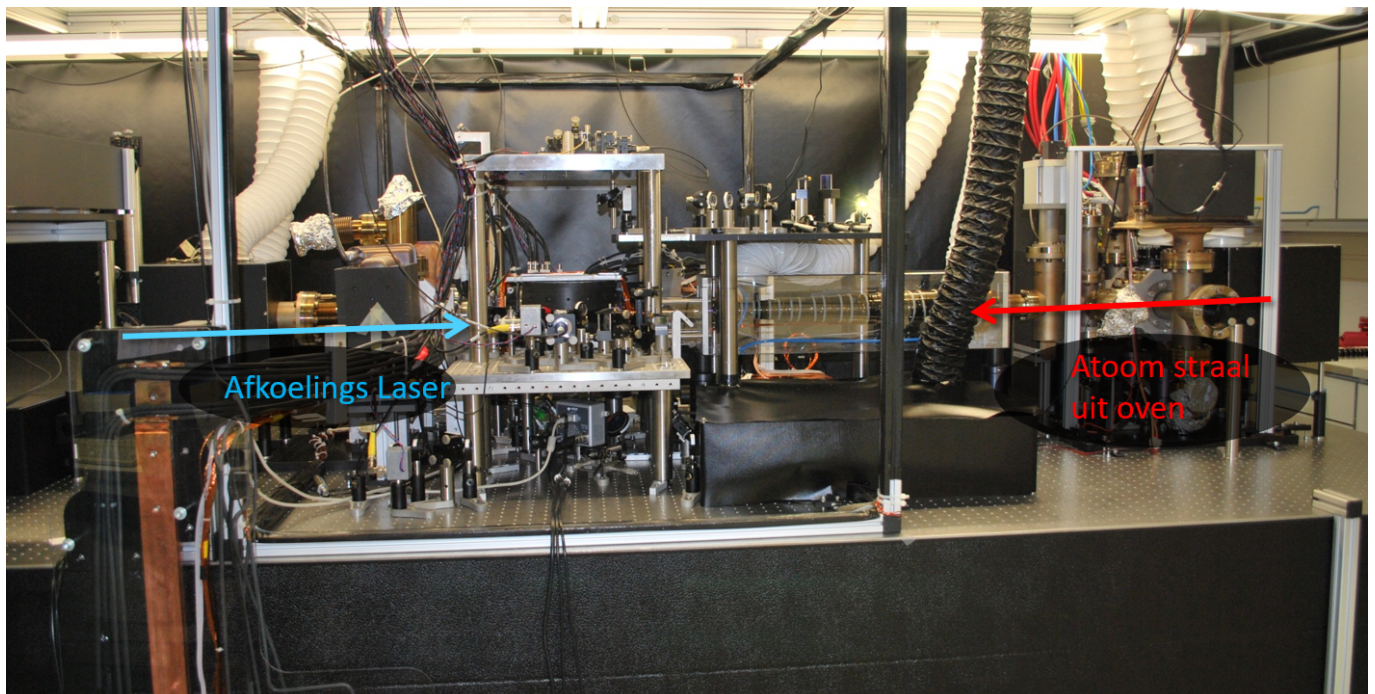


Afbeelding 2. Een oven voor atomen.In de oven vliegen hete atomen alle kanten op. Door de opening zo lang mogelijk te maken, kunnen we filteren op atomen die (grovweg) de juiste kant opgaan, zodat we een mooie straal van atomen naar rechts krijgen. Deze worden vervolgens afgekoeld met een laser. Afbeelding: met dank aan Florian Schreck.

Zodra de atomen uit de oven komen, gaan worden ze afgekoeld. Hiervoor maken we gebruik van *laserkoeling*. Het principe hiervoor is vrij eenvoudig. We beschijnen de atoomstraal die van links komt, met een laser straal die van rechts komt, zoals te zien is in afbeelding 3. Het principe van dit proces is gebaseerd op een fundamentele eigenschap van de natuur: impulsbehoud.



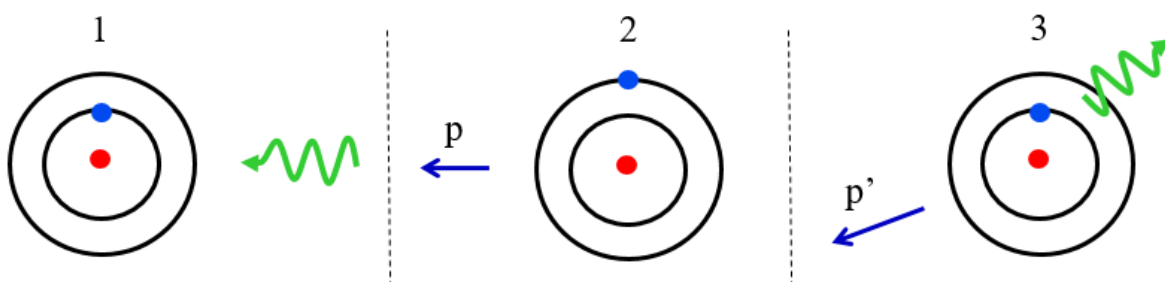
Afbeelding 3. Het afkoelproces.Een schematische voorstelling van het eerste deel van het afkoelproces. De rode pijl illustreert waar het hete gas vandaan komt, de blauwe straal is de laser. Ook aangegeven is het punt waar in deze opstelling het gas uiteindelijk wordt opgevangen. Afbeelding uit het proefschrift van Simon Stellmer.



Afbeelding 4. De praktijk.Een foto van een opstelling zoals te zien in de schematische weergave van figuur 2.

Deze foto is gemaakt in het laboratorium van Florian Schreck.

De laser heeft een energie die precies zo is afgesteld, dat die een atoom uit de oven (bijvoorbeeld een Rubidium-atoom) in een aangeslagen toestand kan brengen. Afbeelding 5 geeft dit proces schematisch weer, waarbij een hogere energietoestand wordt aangegeven door de grotere straal van de baan waarin het elektron zich bevindt rondom de atoomkern. Het aanslaan van het atoom gebeurt doordat het atoom een foton absorbeert uit de laserstraal (stap 1 in afbeelding 5). Bij dit absorptieproces moet impuls behouden zijn (en ook massalozen fotonen hebben een energie en dus een impuls!), en dus zal het atoom in de straal een 'trap' naar links krijgen (stap 2 in de afbeelding). Vervolgens vervalt het atoom weer naar de lagere energietoestand, en zendt het weer een foton uit. Dit gebeurt echter in een willekeurige richting (stap 3). Dit zou potentieel dus de eerste 'trap' teniet kunnen doen (als het foton in ons voorbeeld precies naar links wordt uitgezonden) maar omdat het uitzenden van het foton in een willekeurige richting gebeurt, zal dit kortdurende proces na een aantal herhalingen 'uitbalanceren' door bijvoorbeeld de ene keer naar rechts, dan naar boven, naar links, en vervolgens weer naar rechts een trap te geven. Uiteindelijk is het enige wat we overhouden na honderden keren dit proces doorlopen te hebben een bundel van atomen die typisch nog maar met 10 meter per seconde naar rechts bewegen. Dit lijkt veel, maar vergeleken met een gemiddelde beginsnelheid van zo'n 500 meter per seconde is dit al een geweldige start!



Afbeelding 5. Laserkoeling. De atomen worden in deze afbeelding schematisch weergegeven door een kern (rode stip) en een elektron (blauwe stip). Het foton (groene golf) heeft een impuls van grootte p . Stap 3 is een voorbeeld van hoe een elektron weer kan vervallen naar de grondtoestand, waarbij het een foton uitzendt in

een willekeurige richting. Afbeelding: Florian Schreck.

Temperatuur

Wellicht is het goed om nog wat dieper in te gaan op wat we nu eigenlijk bedoelen als we het hebben over temperatuur. De thermodynamische definitie van temperatuur is gelinkt aan 'de verandering van de entropie van een systeem, als gevolg van een verandering in de interne energie'. Entropie is een grootheid die op deze website [al vaak ter sprake is gekomen](#): heel grofweg is entropie zoiets als de 'hoeveelheid wanorde'. Wat betekent het dus als een gas heel koud is? Als een gas heel koud is, heeft het de neiging om energie van de omgeving te pakken (dit merk je als je bijvoorbeeld je hand in een vriezer steekt). Volgens de thermodynamische definitie, is er sprake van een grote 'koudheid' als de entropie van een systeem sterk toeneemt naarmate er energie aan toegevoegd wordt. We zouden nu kunnen zeggen, dat, als een systeem heel weinig entropie heeft om te beginnen, het heel makkelijk is om een enorme *toename* te krijgen in entropie. Dus als we een gas heel koud willen hebben, willen we graag weinig entropie in ons gas hebben. In een gas kan dit gerealiseerd worden, door de atomen simpelweg 'stil' te laten staan! Deze denkwijze past overigens ook goed bij [Boltzmanns definitie van temperatuur](#) als 'de hoeveelheid bewegingsenergie per vrijheidsgraad'. Hoe minder energie (dus: hoe minder beweging), hoe kouder een gas is.

Intermezzo: vacuüm

Dit is een goed moment om te vermelden dat alle ruimtes in dit experiment (dus ook de oven) zich in een vacuümtoestand bevinden. 'Vacuüm' betekent normaal gesproken dat er niets meer in de ruimte te vinden is. In ons geval zijn er natuurlijk de atomen die we gaan afkoelen, dus er is geen sprake van ideaal vacuüm, maar er zijn niet of nauwelijks andere deeltjes dan degene die we willen afkoelen. De belangrijkste reden dat we een dergelijk vacuüm willen hebben, is dat we het ons niet kunnen veroorloven dat een atoom uit de 'lucht' zich mengt met onze rubidium- of strontiumatomen. Als een atoom op kamertemperatuur is, beweegt het namelijk met enkele honderden meters per seconde. Botsingen van atomen op kamertemperatuur met de atomen die we willen afkoelen, zijn dus bijzonder ongewenst. Zulke botsingen warmen onze atomen op, en kunnen de straal van atomen onderbreken. Het maken van dit vacuüm in een gemiddeld koel-experiment is op

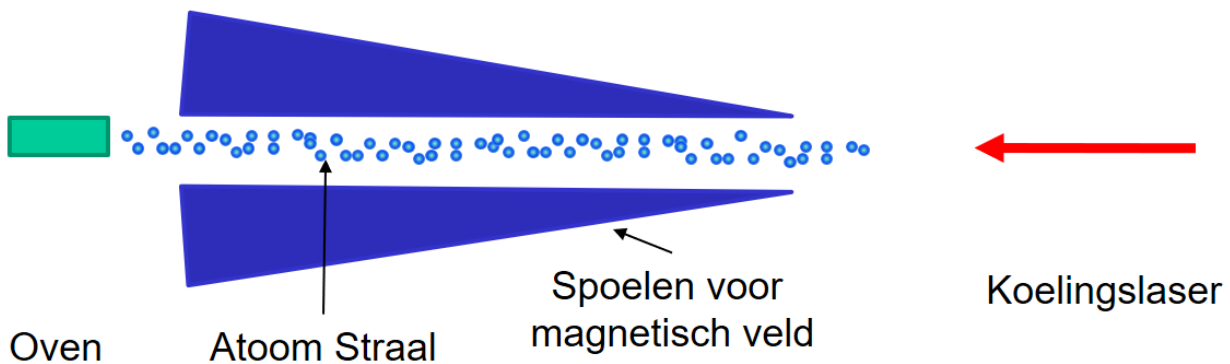
zichzelf al een hele klus, maar gelukkig bestaan er beproefde technieken om dit voor elkaar te krijgen.

De Doppler- en Zeemaneffecten

Nu we grofweg begrijpen hoe een laserstraal in staat is om een straal van hete atomen af te remmen, en dus te koelen, komen we bij een belangrijk verschijnsel dat roet in het eten kan gooien: het Dopplereffect. Het Dopplereffect is bekend van geluid bij sirenes. Een geluidsbron die met hoge snelheid op je af komt heeft een hogere frequentie, en dus een hogere toon, dan dezelfde bron als die van je af beweegt. Ditzelfde effect bestaat ook voor licht: een atoom dat met een hoge snelheid tegen een lichtstraal in beweegt ziet licht met een hogere frequentie (en dus een hogere energie!) dan een atoom dat langzamer beweegt. Voor het koelen van atomen is dit een groot probleem. Na de eerste paar keer dat een atoom licht absorbeert en uitzendt, zal het langzamer gaan bewegen. Dat was immers het doel! Vervolgens is door het Dopplereffect de energie van het laserlicht echter te laag om nog steeds de atomen aan te slaan. Een oplossing zou kunnen zijn om meerdere lasers te gebruiken, of een laser met een groter bereik aan energieën. Dit heeft echter vele nadelen, zoals kosten, capaciteit en een vermindering van precisie. Er bestaat een elegantere oplossing: Het Zeemaneffect.

Het probleem met ons systeem was, dat de energie van de laser niet meer toereikend is, naarmate de atomen minder snel tegen het licht van de laser in bewegen, en hun snelheid afneemt (en ze dus afkoelen!). De oplossing? Verlaag de energie die nodig is om het atoom aan te slaan! Het Zeemaneffect is een wisselwerking tussen een atoom en een magnetisch veld dat de energieniveaus van atomen aanpast aan de hand van de sterkte van het magnetisch veld. In de weergave van afbeelding 5 kun je dit voorstellen als het verkleinen of vergroten van de buitenste cirkel. Hoe sterker het magnetisch veld, hoe meer de energieniveaus worden verschoven. In afbeelding 3 is een rood kegelvormig object te zien. In afbeelding 6 is hiervan een schematische weergave getekend. Dit kegelvormige object is een spoel die een magneetveld creëert. De vorm is zo gekozen dat het magneetveld in de buurt van de atomen afneemt naarmate de atomen meer naar rechts bewegen. Hoe meer naar

rechts het atoom zich bevindt, hoe langzamer het atoom al beweegt, en hoe minder correctie op de energieniveaus er dus nodig is van de magneten.



Afbeelding 6. Gebruik van het Zeemaneffect. De atomen die worden afgekoeld zijn hier aangegeven met blauwe bolletjes. De blauwe driehoeken zijn een doorsnede van een kegelvormige spoel, die een variërend magneetveld creëert door er stroom doorheen te laten lopen.

Het hier beschreven proces was nog maar het eerste deel van het afkoel proces van een ultrakoud gas. Nadat een atoom dit proces van laserkoeling heeft doorlopen, heeft het een snelheid van typisch een tiental meter per seconde. De volgende stap in ons proces van afkoelen is het opvangen van het gas. Dit moet gebeuren in 'mid air' (eigenlijk natuurlijk: 'mid vacuüm'), aangezien we niet willen dat ons gas weer energie krijgt van de omgeving, en dus weer opwarmt. In afbeelding 3 is schematisch aangegeven waar dit gebeurt in een dergelijke opstelling. Als het gas eenmaal gevangen is, moeten we nog enkele andere methodes toepassen om een gas *echt* ultrakoud te krijgen. Kortom: er is nog heel wat werk aan de winkel! In deel twee van deze serie zal ik de vervolgstappen beschrijven.