

# Laserkoeling en Atoomfysika: De Utrechtse aanpak

Peter van der Straten en Arend Niehaus  
Vakgroep A.G.F., Rijksuniversiteit Utrecht

Tien jaar geleden vonden de eerste experimenten op het gebied van laserkoeling plaats. Sindsdien is er grote belangstelling voor laserkoeling, omdat laserkoeling een grote belofte inhoudt voor nieuwe baanbrekende experimenten in de atoomfysika. De ontwikkelingen op dit terrein volgden zich in hoog tempo op. In 1982 werden de eerste atomen vertraagd, in 1985 werden de eerste atomen gevangen in een optische val en rond 1988 werd de zogeheten Doppler limiet doorbroken. Dit laatste veroorzaakte een golf van belangstelling voor laserkoeling, omdat bleek dat nog lagere temperaturen van atomen in een optische val konden worden bereikt dan voor lange tijd mogelijk gehouden werd. Het is nu enkele buitenlandse groepen gelukt met gekoelde atomen in vallen of bundels nieuwe experimenten uit te voeren. Toepassing van laserkoeling voor atoomfysische experimenten vergt een grote inspanning en in dit verslag zullen we de Utrechtse plannen bespreken. Die moeten onze groep ertoe brengen dergelijke experimenten in de nabije toekomst uit te kunnen voeren.

## 1 Sub-Doppler laser koelen

Het basis-principe van laserkoeling is eenvoudig. We sluiten atomen in één dimensie op in een lichtveld van twee tegengestelde laserbundels, die beide enigszins onder resonantie verstemd zijn. Dan zal een atoom door de verschuiving van de resonantie-frekwentie vanwege het Doppler-effekt bij voorkeur fotonen verstrooien van de laserbundel, die tegengesteld aan zijn beweging gericht is. Op deze wijze kunnen atomen gekoeld worden en de wijze van koeling wordt Doppler koelen genoemd. De uiteindelijk te bereiken temperatuur van het atomaire ensemble zal afhangen van de intensiteit en verstemming van de laser. In 1980 werd bewezen, dat de laagste temperatuur  $T_D$  bij juiste keuze van intensiteit en verstemming gegeven is door de relatie  $k_B T_D = \hbar \Gamma / 2$ , waarin  $k_B$  de Boltzmann-constante en  $\Gamma$  de lijnbreedte van de optische overgang. De limiet wordt de Doppler-limiet genoemd en werd lange tijd gezien als een fundamentele limiet voor laserkoeling. Voor een standaard atoom in laserkoeling (natrium) volgt  $T_D = 240 \mu\text{K}$  en andere atomen hebben een vergelijkbare limiet.

Figuur 1: Eén dimensionale snelheidsverdelingen van rubidium atomen gekoeld in een staande golf van lineair gepolariseerd licht met een magneetveld loodrecht op de richting van de laserbundels. De verzadigingsparameter van de laser  $s_0=0.25$ , de verstemming van de laser  $\delta = \pm 0.67\Gamma$  en de sterkte van het magneetveld is (a) 0.057 G, (b) 0.114 G, (c) 0.23 G, (d) 0.40 G, (e) 0.57 G en (f) 1.14 G. De bovenste serie metingen geven de resultaten voor een negatieve verstemming van de laser van resonantie; de onderste serie zijn voor een positieve verstemming.

Sinds 1988 werden in optische vallen temperaturen onder de Doppler limiet gemeten. In de eerste modellen, die dergelijke metingen beschrijven, werden de lagere temperaturen toegeschreven aan een speciale keus voor de polarisatievector van de beide laserbundels. Wanneer deze vectoren onderling loodrecht staan, dan kan veel sterkere demping optreden van de snelheid dan voorspeld wordt door de Doppler theorie.

Rond deze tijd werden in Stony Brook (U.S.A.) experimenten uitgevoerd, die dergelijke modellen wilden toetsen [1, 2, 3]. Essentieel in deze experimenten is, dat een atomaire bundel slechts in één dimensie gekoeld wordt. Daarmee kunnen de experimenten optimaal vergeleken worden met de theorieën, die vanwege het complexe karakter slechts in één dimensie uitgevoerd kunnen worden. Uit de experimenten volgde, dat niet alleen onderlinge loodrechte polarisaties van de laserbundels leidt tot lagere temperaturen. Met het aanbrengen van een klein magneetveld transversaal aan de richting van de laserbundels werden ook temperaturen onder de Doppler limiet bereikt. Het aanbrengen van een magneetveld had verder tot gevolg, dat bij hogere magneetvelden koeling kon worden waargenomen

Figuur 2: Kracht op de rubidium atomen als functie van de snelheid voor de experimentele situatie (a)-(f) van figuur 1. De kracht is gegeven in eenheden  $\hbar k \Gamma$ .

naar eindige snelheden, die evenredig zijn met de sterkte van het magneetveld. Dit koelen naar eindige snelheden bleek sterk afhankelijk te zijn van de gebruikte polarisatie van de laserbundels en van de richting van het magneetveld. In figuur 1 hebben we één van de metingen weergegeven. In figuur 1a zien we koeling naar  $v = 0$  met een breedte van 2.6 cm/s, wat leidt tot een 1-dimensionale temperatuur van  $7 \mu\text{K}$ . Voor hogere magneetvelden zien we een verbreding van de piek met uiteindelijk voor zeer hoge velden een opsplitsing van de piek in twee pieken. De afstand tussen de twee pieken neemt toe met een toename van het veld.

In de Utrechtse groep werd in samenwerking met Gerard Nienhuis (toen Utrecht, thans Leiden) sterke aandacht besteed aan de verklaring van deze verschijnselen en de theoretische beschrijving van het koelproces [4]. Er werd een model ontwikkeld, waarin de koeling kon worden beschreven als een coherentie redistributie van fotonen van één van de laserbundels naar de andere laserbundel, waarbij een impuls  $2\hbar k$  overgedragen wordt van het lichtveld op het atoom. Een dergelijk proces is resonant, wanneer de Doppler-verschuiving van de twee tegengestelde laserbundels zoals waargenomen door het bewegende atoom precies de Zeeman verschuiving van de grondtoestand compenseert. Dit model kon verder worden bevestigd door theoretisch werk, waarin de theorie werd toegesneden op dit speciale geval. Figuur 2 geeft de kracht op het atoom als functie van de snelheid van het atoom. Voor grotere velden zien we duidelijk het resonante karakter van de kracht, die sterke demping oplevert naar eindige snelheden. De gestippelde lijnen in figuur 1 geven een theoretische berekening weer gebaseerd op de kracht, zoals weergegeven in figuur 2. De overeenkomst is zeer goed, zeker als we ons realiseren, dat het hele model geen aanpasbare parameters kent. Het onderzoek naar deze resonanties hebben een beter begrip

tot stand gebracht van de processen, die plaatsvinden bij het koelen onder de Doppler limiet.

## 2 Focusatie van atomaire bundels

Bovenstaande experimenten zijn belangrijk voor een begrip van de principes van laserkoeling. Voor de toepassing van laserkoeling in atoomfysika is het van belang om nieuwe experimenten op te starten, waarin laserkoeling wordt gebruikt om nieuwe informatie te verkrijgen. In Utrecht zijn we begonnen met de opbouw van één experiment, waarin laserkoeling zal worden gebruikt om een atoombundel te focuseren tot zeer kleine afmetingen.

De opstelling bestaat uit een UHV-gedeelte met een kristalhouder en een elektronendetektor. Het kristal wordt beschoten met een bundel van metastabiël helium atomen. Bij het botsen van de atomen met het oppervlak worden elektronen in een Penning-proces uitgeworpen, die met de elektronendetektor op energie geanalyseerd worden. Voor de botsing met het kristal worden de atomen spin-gepolariseerd door optisch pompen op de  $2^3S - 2^3P$ -overgang. Daarmee wordt de waarschijnlijkheid van het Penning-proces afhankelijk van de richting van de magnetisatie van het oppervlak en een variatie van de oriëntatie van de spin-polarisatie t.o.v. de kristal-richting leidt tot een meting van de oppervlakte-magnetisatie. Het gehele proces wordt “Spin-polarised Metastable Atom Deexcitation Spectroscopy” (SMADS) genoemd en is een veel belovende techniek voor de detectie van oppervlakte magnetisatie van kristal-oppervlakken en dunne lagen.

In dit experiment zal laserkoeling toegepast worden. Het is namelijk interessant om de oppervlakte-magnetisatie plaatsafhankelijk te kunnen meten. Daartoe zal de diameter van de atoombundel teruggebracht moeten worden van enkele mm's naar enkele  $\mu\text{m}$ 's zonder aanzienlijke reductie in meetsignaal. Verschillende koelingschema's bieden hiervoor uitkomst. Allereerst zal getracht worden de helderheid van de bron sterk te vergroten door het koelen van de transversale richting van de snelheid van de atomen bij de bron. Intensiteitsverhogingen met een faktor 100 zijn eenvoudig realiseerbaar, waardoor zonder verlaging van het meetsignaal de bundel een faktor 10 gecollimeerd kan worden met een diafragma. Een verdere reductie van de bundeldiameter kan worden bereikt met een magnetisch optische lens, waarbij de atomen in een inhomogeen magneetveld afgebogen worden naar de as van de lens. Het magneetveld is nul op de as van de lens en neemt toe in alle richtingen loodrecht op de as. Atomen, die zich niet op de as bevinden, worden naar de as afgebogen, doordat het magneetveld atomen in resonantie brengt met de laser, die de atomen een impuls geven in de richting van de as. Collimatie tot een tiental  $\mu\text{m}$  is onlangs aangetoond met een dergelijke lens voor natrium [5]. Tot slot wijzen wij erop, dat theoretische berekeningen aantonen, dat atomen gefocusseerd kunnen worden tot een bundeldiameter van enkele  $\text{Å}$  door te focuseren met een speciale Gaussische mode van het laserlicht [6]. Het is echter niet te verwachten, dat een dergelijk resultaat binnen

enkele jaren in een laboratorium bereikt wordt.

### 3 Koeling van atomaire bundels

Tot slot willen wij een experiment bespreken, waarbij we een koude bundel van natrium atomen willen produceren. Daar we de bundel in botsingsfysische experimenten willen gebruiken, verlangen we een zo hoog mogelijke flux van mono-energetische, langzame atomen. Atomen in een thermische bundel met een snelheid van rond 1000 m/s worden afgeremd naar een lage snelheid van rond 50 m/s door fotonen te verstrooien van een laserbundel, die tegengesteld gericht is aan de atomaire bundel. In dit proces moeten dan rond de 30.000 fotonen geabsorbeerd worden per atoom. Door de Doppler-verschuiving echter zullen de atomen slechts weinig fotonen kunnen verstrooien, alvorens uit resonantie met de laser te geraken. Er zijn verschillende schema's ontwikkeld om dit tegen te gaan. Gekozen is in ons geval voor de toepassing van de "Zeeman"-techniek [7]. Daarbij worden de atomen afgeremd in een inhomogeen magneetveld, waarbij de afnemende Doppler-verschuiving van de afremende atomen wordt gecompenseerd met een afnemende Zeeman-verschuiving van het inhomogene magneetveld.

Op het moment wordt het magneetveld ontworpen en geconstrueerd. Bij het gebruik van deze techniek is het van belang speciale aandacht te besteden aan het magneetveld aan het einde van de magneet. Atomen met zeer lage snelheid kunnen verkregen worden door het magneetveld te laten afvallen met een steeds sterkere gradiënt. In het ideale geval moet de gradiënt van de magneet oneindig groot worden aan het einde van de magneet, maar dat is in de praktijk onmogelijk. We hebben computer-simulaties van het vertraagproces uitgevoerd, die aantonen wat de gevolgen hiervan zijn voor de eindsnelheid van de atomen. In figuur 3 is te zien, dat als we geen aandacht besteden aan de gradiënt van het magneetveld aan het einde van de magneet, dat we dan geen atomen met lage snelheden kunnen onttrekken aan de magneet. Door speciale aandacht hiervoor, denken we uiteindelijk atomen te produceren met snelheden van 50 m/s. De bundels van laag-energetische atomen zullen in de toekomst gebruikt worden voor botsingsfysische en quantum-optische experimenten.

## Referenties

- [1] B. Sheehy, S-Q. Shang, P. van der Straten, S. Hatamian, and H. Metcalf, "*Magnetic-Field-Induced Laser Cooling below the Doppler Limit*" Phys. Rev. Lett. **64**, 858 (1990).
- [2] S-Q. Shang, B. Sheehy, P. van der Straten, and H. Metcalf, "*Velocity-Selective Magnetic-Resonance Laser Cooling*" Phys. Rev. Lett., **65**, 317 (1990).

Figuur 3: Baan van de atomen in de magneet voor verschillende waarden van de verstemming  $\delta$  van de laser. De getrokken lijnen geven de resultaten weer van de simulatie van de baan voor een ideaal magneetveld, terwijl de gestreepte lijnen gelden voor een realistisch magneetveld. Merk op, dat bij een realistisch magneetveld er geen atomen de magneet kunnen verlaten met een snelheid kleiner dan 150 m/s. De inzet toont het verschil tussen het ideale magneetveld (getrokken lijn) en een realistisch magneetveld (gestippelde lijn).

- [3] S-Q. Shang, B. Sheehy, H. Metcalf, P. van der Straten, and G. Nienhuis, “*Velocity-Selective Resonances and Sub-Doppler Laser Cooling*” Phys. Rev. Lett. **67**, 1094 (1991).
- [4] G. Nienhuis, P. van der Straten and S-Q. Shang, “*Operator description of laser cooling below the Doppler limit*” Phys. Rev. **A44**, 462 (1991).
- [5] J. Nellesen, J. Werner and W. Ertmer, “*Magneto-optical compression of a monoenergetic sodium atomic beam*”, Opt. Comm. **78**, 300 (1990).
- [6] V.I. Balykin and V.S. Letokhov, “*Deep focusing of an atomic beam in the Angstrom region by laser radiation*”, Sov. Phys. JETP **67** 78 (1988).
- [7] J. Prodan, W. Phillips en H. Metcalf, “*Laser Production of a Very Slow Monoenergetic Atomic Beam*”, Phys.Rev. Lett. **49**, 1149 (1982).