

# VU Research Portal

## Interaction of UV light with cold metastable helium atoms

Koelemeij, J.C.J.

2004

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

### **citation for published version (APA)**

Koelemeij, J. C. J. (2004). *Interaction of UV light with cold metastable helium atoms*. [PhD-Thesis - Research and graduation internal, Vrije Universiteit Amsterdam].

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

### **E-mail address:**

[vuresearchportal.ub@vu.nl](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

# Samenvatting

Nadat in 1975 de eerste voorstellen voor het manipuleren van atomen met behulp van bijna-resonant laserlicht verschenen, heeft het opsluiten en afkoelen van atomen met laserlicht geleid tot nieuwe ontwikkelingen binnen de experimentele fysica. Het meest aansprekende voorbeeld is misschien wel het onderzoek aan Bose-Einstein condensatie (BEC), dat voor een belangrijk deel berust op laserkoeling en -opsluiting van atomen. Een gasvormige wolk van identieke atomen (bosonen) ondergaat BEC wanneer de golflengte van het atomaire golfpakket groter wordt dan de interatomaire afstand. Het atomaire ensemble wordt dan niet langer met klassieke Boltzmann statistiek beschreven, maar veeleer met Bose-Einstein statistiek. Aan de voorwaarde voor BEC, een faseruimtedichtheid van  $\sim 1$ , wordt in een gasvormig wolkje atomen voldaan bij een temperatuur van lager dan één microkelvin en een dichtheid van  $\sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . In de loop der jaren zijn laserkoeling en -opsluitingstechnieken, zoals de *magneto-optische val* (MOT), verbeterd in een poging deze omstandigheden te creëren. Echter, voor de laatste stap naar BEC bleek het uiteindelijk noodzakelijk om de atomen in een pure magneetval of een optische val op te sluiten en vervolgens gebruik te maken van het zogeheten verdampingskoelen. Desalniettemin was er in de loop der tijd een verhoging in de dichtheid in de MOT mogelijk gebleken. Deze vooruitgang was deels gebaseerd op kennis verkregen met experimenten waarin botsingen tussen koude atomen centraal staan. Het onderzoek naar zulke *koude botsingen* is een andere tak van de experimentele fysica die ontsproot aan de eerste experimenten op het gebied van laserkoeling en -opsluiting.

Dit proefschrift beschrijft experimenten waarin laserkoeling en -opsluiting worden toegepast op heliumatomen in de metastabiele triplet-toestand ( $\text{He}^*$ ). Dit gebeurt normaalgesproken met laserlicht met een golflengte van 1083 nm. De metastabiele toestand van het heliumatoom heeft een levensduur van  $\sim 8 \times 10^3 \text{ s}$ ; in de praktijk is

dit oneindig lang in vergelijking met de typische experimentele tijdschaal. Het He\*-atoom heeft verder een grote interne energie van 19.8 eV, hetgeen het mogelijk maakt om losse atomen direct te detecteren met zogeheten *electron multipliers*. Het onderzoek naar het opsluiten en koelen van metastabiel helium heeft voor een belangrijk deel plaatsgevonden in het kader van BEC. Een He\*-BEC onderscheidt zich van de "gebruikelijke" BEC's (bestaande uit alkali-atomen) doordat de interne energie van de He\*-atomen vele grootte-orders hoger ligt dan de kenmerkende energieschaal in een Bose-Einstein condensaat. Door de spins van de He\*-atomen parallel te houden (spinpolarisatie) kan voorkomen worden dat Penning-ionisatie optreedt, een proces waarin een He\*-atoom gedurende een botsing een ander He\*-atoom ioniseert en zelf naar de grondtoestand terugvalt. Dit proces leidt tot verlies en verhitting van opgesloten atomen. Inderdaad bleek het mede dankzij spinpolarisatie mogelijk te zijn BEC te bereiken, zoals aangetoond door twee Franse groepen in 2001. In een MOT is spinpolarisatie echter niet mogelijk waardoor Penning-ionisatie de verliezen in een MOT domineert. Dit verschijnsel is mede zo sterk doordat het MOT licht leidt tot *fotoassociatieve* botsingen, waarbij twee He\*-atomen op relatief grote afstand optisch worden geëxciteerd naar een gebonden moleculaire toestand. De aantrekking die de atomen dan ondervinden versnelt hen naar elkaar toe, waarna op korte onderlinge afstand het Penning-ionisatieproces plaatsvindt. Dit type botsingen bepaalt een bovengrens voor de dichtheid in de MOT, wat een ongunstige beginconditie oplevert voor de daaropvolgende experimentele stappen richting BEC.

Dit proefschrift beschrijft onder meer een poging de dichtheid in een He\*-MOT te verhogen met behulp van laserkoeling en -opsluiting met 389 nm fotonen. Met 389 nm licht kan een bijna driemaal zo grote kracht worden uitgeoefend op de atomen als met het gebruikelijke 1083 nm licht, hetgeen tot een aanzienlijke compressie van een opgesloten wolk He\*-atomen zou moeten leiden. De grote vraag bij aanvang van het experiment was echter of de verliezen door fotoassociatieve botsingen groter of kleiner zouden zijn dan in het 1083 nm geval. In het gunstige geval van kleinere verliezen zou de compressie van de wolk kunnen leiden tot een hogere dichtheid.

Ten behoeve van dit experiment is een krachtige laser met een golflengte van 389 nm opgebouwd, als beschreven in Hoofdstuk 2. De laseropstelling is gebaseerd op een frequentieverdubbelde titaan:saffier-laser, waarmee 1 W aan vermogen bij 389 nm wordt geproduceerd met een hoge netto conversie-efficiëntie van 75% in het frequentieverdubbingsproces. De frequentie van het laserlicht is gestabiliseerd ten opzichte van de frequentie van de 389 nm overgang in helium. Daarnaast is de opstelling op verschillende punten aangepast om de stabiliteit en de toepasbaarheid van de laser te vergroten. Behalve de 389 nm laseropstelling is er een bundelapparaat opgebouwd voor de productie

van een intense, gecollimeerde bundel van trage metastabiele heliumatomen. Het collimeren en vertragen gebeurt met behulp van 1083 nm laserkoeling, en het ontwerp van de opstelling is afgeleid van een bestaande opstelling voor het bereiken van BEC in He\*. Beide opstellingen worden beschreven in Hoofdstuk 1. In het laatste deel van het nieuwe bundelapparaat werd een prototype 389 nm MOT geïmplementeerd. Het doel van het prototype experiment bestond uit het karakteriseren van de verliezen in de MOT en het nagaan van het compressie-effect van het 389 nm licht op de wolk atomen. Zoals beschreven in Hoofdstuk 3 bleek de 389 nm MOT het volume van de wolk atomen inderdaad sterk te verkleinen. Tegelijkertijd bleken de fotoassociatieve verliezen aanzienlijk kleiner te zijn dan in een vergelijkbare 1083 nm MOT, wat verklaard kon worden met behulp van bestaande theorie over koude botsingen. Daarnaast werden nog kleine verliezen door twee-fotonionisatie vastgesteld en gekarakteriseerd. Een andere belangrijke conclusie van het experiment was dat de 389 nm MOT een intrinsiek lage capaciteit heeft om He\*-atomen in te vangen vanuit een bundel, waardoor het maximaal aantal ingevangen atomen uiteindelijk beperkt wordt. Om dit te omzeilen werd een vervolgonderzoek opgezet, waarbij de 389 nm MOT gecombineerd werd met een grote 1083 nm MOT in de BEC-opstelling. Na het laden van de 1083 nm MOT met  $10^9$  atomen volgde een korte (5 ms) periode waarin de 389 nm MOT de wolk maximaal verdichtte. Met deze techniek van laserkoelen werd een ongeëvenaarde dichtheid van  $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  bereikt. Dit experiment wordt beschreven in Hoofdstuk 4. Verder was de BEC opstelling uitgerust met verschillende diagnostische middelen, die alle werden ingezet om het verloop van de compressie te registreren. Een gebruikte methode, de detectie van botsingsproducten, bood zelfs direct, *real-time* zicht op de compressie.

De tijdsafhankelijkheid van de Penning-ionisatiesnelheid werd daarnaast vergeleken met de snelheid waarmee snelle metastabiele atomen worden geproduceerd (ook deze vinden hun oorsprong in fotoassociatieve botsingen). Hieruit kon een aantal opmerkelijke conclusies worden getrokken. Zo bleek de productiesnelheid van de snelle metastabielen van dezelfde orde grootte te zijn als de snelheid waarmee Penning-ionisatie plaatsvindt. Ter vergelijking, in de 1083 nm MOT bleek de productiesnelheid van snelle metastabielen slechts een paar procent van de Penning-ionisatiesnelheid. Voor het laatste geval kan deze verhouding verklaard worden aan de hand van eerder in de literatuur verschenen *ab initio* berekeningen aan het gedrag van de betrokken moleculaire toestanden op korte internucleaire afstand. Een soortgelijke hypothese verklaart ook de snelheid waarmee de metastabielen uit de 389 nm MOT ontsnappen, alsmede hun relatief grote productiesnelheid. Echter, deze hypothese kan niet geverifieerd worden daar *ab initio* berekeningen aan de relevante moleculaire toestanden tot op heden niet beschikbaar zijn.

In Hoofdstuk 5 wordt een numerieke aanpak van het probleem van de interactie tussen  $\text{He}^*$ -atomen op lange afstand in de aanwezigheid van 1083 nm of 389 nm licht behandeld. Het uiteindelijke doel van deze berekeningen was het vinden van moleculaire toestanden waarbij de interatomaire afstand altijd groot is en geen Penning-ionisatie kan optreden. Deze berekeningen waren reeds eerder door anderen gedaan voor het geval van 1083 nm licht en zijn in dit proefschrift ook uitgevoerd voor het 389 nm geval. De uitkomst van de berekening voor het 1083 nm geval komt goed overeen met bestaande uitkomsten, in acht nemende de nauwkeurigheid van een aantal benaderingen die in de berekening zijn gemaakt. Voor het 389 nm geval, waarvoor geen vergelijkingsmateriaal voorhanden is, blijken de uitkomsten alleen geldig te zijn voor voldoende grote interatomaire afstanden. Dit is het gevolg van complicaties die in het algemeen optreden bij berekeningen aan de electrostatische interactie tussen atomen in hoger aangeslagen toestanden en de daaruit voortvloeiende divergentie van tweede-orde storingsrekening. Daardoor blijft het tot op heden onduidelijk wat de vooruitzichten zijn voor foto-associatie spectroscopie met 389 nm licht aan langlevende gebonden toestanden op grote afstand.