

Atoom-molecuul oscillaties

Een ultrakoud atomair gas is een uniek systeem voor het bestuderen van quantummechanische verschijnselen op een macroscopische schaal. De belangrijkste reden hiervoor is dat bijna alle fysische parameters van dit systeem experimenteel in te stellen zijn. Een nieuwe ontwikkeling in dit verband is dat zelfs de interacties tussen de atomen in het gas gevarieerd kunnen worden. Dit heeft zeer recentelijk geleid tot de observatie van quantumoscillaties tussen atomen en moleculen. *Henk Stoof en Rembert Duine*



Henk Stoof (1962) studeerde Technische Natuurkunde in Eindhoven. Na zijn promotie in Eindhoven had hij postdoc posities in de groepen van Tony Leggett in Urbana-Champaign en Steve Girvin in Bloomington. Daarna ging hij naar Utrecht, waar hij sinds 1999 hoogleraar is in de theorie van de gecondenseerde materie. Recentelijk kreeg hij een VICI-subsidie toegekend voor theoretisch onderzoek aan exotische quantum gassen.



Rembert Duine (1975) studeerde Theoretische Natuurkunde in Utrecht. Zijn afstudeeronderzoek betrof het transport van polymeren in een gel en werd verricht onder leiding van Gerard Barkema. Sinds november 1999 is hij aio aan de Universiteit Utrecht in de groep Quantum Fluids and Solids, waar hij werkt aan de dynamica van Bose-Einstein gecondenseerde atomaire gassen. Hij hoopt eind oktober 2003 op dit onderwerp te promoveren.

Het onderzoek aan ultrakoude atomaire gassen heeft na de eerste experimentele realisatie van een Bose-Einstein condensaat in 1995 [1] een stormachtige groei doorgemaakt. De drie personen die deze enorme groei in belangrijke mate hebben mogelijk gemaakt, Eric Cornell, Wolfgang Ketterle en Carl Wieman, ontvingen hiervoor dan ook in 2001 de Nobelprijs voor de fysica. Ook op dit moment volgen nieuwe ontwikkelingen zich in een hoog tempo op. Naast verschillende exotische Bose-Einstein gecondenseerde gassen, staan momenteel in het bijzonder ook gedegeneerde Fermi gassen en ultrakoude atomen in een optisch rooster sterk in de belangstelling. Een belangrijke motivatie voor het onderzoek aan atomaire Fermi gassen is de theoretische voorspelling dat in een dergelijk gas, net als in een supergeleidend metaal, een Bose-Einstein condensatie van Cooper paren tot stand kan worden gebracht [2]. Atomen in een optisch rooster worden daarentegen onder andere bestudeerd vanwege het mogelijke belang voor het bouwen van een quantum computer [3,4].

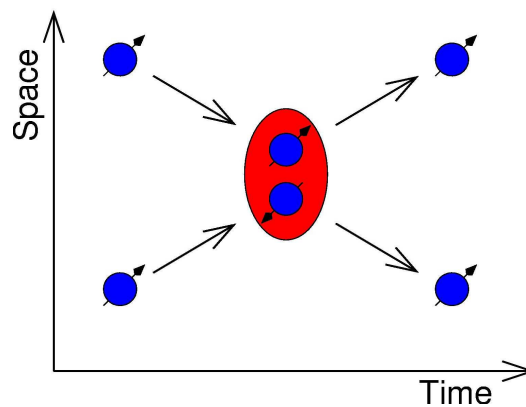
In alle hierboven genoemde voorbeelden spelen de interacties tussen de atomen in het gas een cruciale rol. Voor het vormen van Cooper paren bij experimenteel haalbare temperaturen is het noodzakelijk dat de atomen elkaar in voldoende mate aantrekken. Bij het gebruik van optische roosters voor een quantum computer is het echter nodig dat de atomen elkaar sterk afstoten. Het is voor dit soort toepassingen daarom zeer wenselijk dat de interacties tussen atomen naar wens ingesteld kunnen worden. Dit is mogelijk met behulp van een zogenaamde Feshbach resonantie [5,6]. In het vervolg van dit artikel bespreken we allereerst wat een

Feshbach resonantie is. Daarna leggen we uit hoe een dergelijke resonantie gebruikt kan worden om quantumoscillaties tussen atomen en moleculen experimenteel te bestuderen [7,8]. Bovendien laten we zien dat we er recentelijk in geslaagd zijn tot een gedetailleerd theoretisch begrip van deze experimenten te komen [9]. We eindigen tenslotte met een korte discussie van een aantal interessante verschijnselen die met dit nieuwe inzicht bestudeerd kunnen worden.

Feshbach resonanties

In zijn algemeenheid treedt een resonantie op wanneer twee atomen tijdens een botsing voor enige tijd een molecuul kunnen vormen. Het cruciale punt van een Feshbach resonantie is echter dat dit molecuul een magnetisch moment heeft dat niet gelijk is aan twee keer het magnetisch moment van het atoom. Ten gevolge van het Zeeman effect kan dus met behulp van een extern magneetveld het energieverschil tussen het molecuul en de twee atomen beïnvloed worden, en daarmee ook rechtstreeks de interacties tussen de atomen. Dit is geïllustreerd in figuur 1.

In theorie kan met een Feshbach resonantie de interactie tussen twee atomen op elke willekeurige waarde ingesteld worden. Dus van zeer sterk aantrekkend tot zeer sterk afstotend. In de praktijk zijn er echter enige beperkingen. Deze worden veroorzaakt doordat heel dicht bij de resonantie het molecuul dat tijdens de botsing gevormd wordt heel erg groot is. Er is dan een relatief grote kans dat dit molecuul een derde atoom in het gas tegen komt, die de noodzakelijke energie kan opnemen om het, in eerste instantie slechts virtueel aanwezige, molecuul ook daadwerkelijk te vormen. Het netto effect is dus dat, door een botsing van drie atomen, een molecuul en een relatief heet atoom met extra kinetische energie gevormd wordt. Dit zogenaamde drie-deeltjes recombinatie proces leidt dus tot een verlies van atomen en daardoor tot een ongewenst korte levensduur van het atomaire gas. Bovendien kan het gas hierdoor opgewarmd worden, wat ook niet wenselijk is. Ondanks dit probleem is er voor de experimentatoren voldoende speelruimte om de interacties tussen de atomen in hoge mate te manipuleren zoals we nu zullen zien.



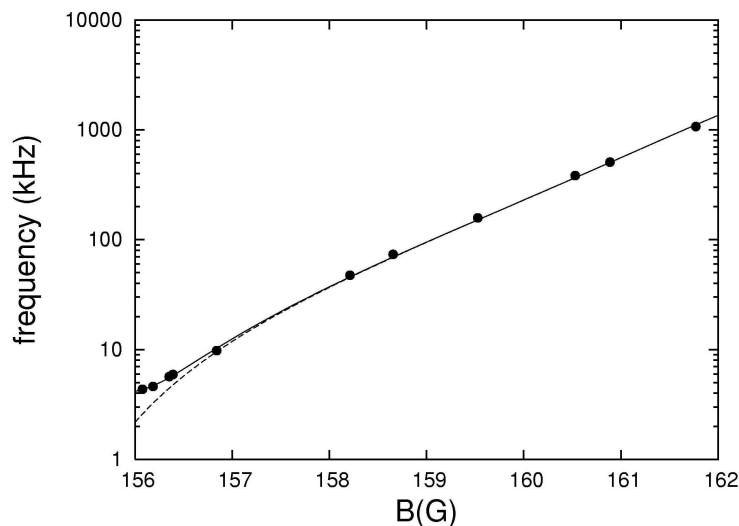
Figuur 1: Illustratie van een Feshbach resonantie. Tijdens de botsing van twee atomen wordt gedurende enige tijd een molecuul gevormd. Doordat het molecuul een andere spinconfiguratie heeft, en daarmee een ander magnetisch moment, dan de twee losse atomen, wordt de botsing beïnvloed door een homogeen extern magneetveld.

Ramsey experiment

De meest unieke eigenschap van de quantum mechanica is dat een quantum systeem zich in een superpositie van twee volkomen verschillende toestanden kan bevinden. Als ook de energieën van die twee toestanden van elkaar verschillen, dan is de fysische betekenis van een dergelijke superpositie dat de toestand van het systeem sinusoidaal in de tijd zal oscilleren van de ene toestand naar de andere toestand. De frequentie van deze oscillatie is gelijk aan $|E_1 - E_2|/h$, waarbij E_1 en E_2 de energieën van de twee toestanden zijn en h de constante van Planck is. In de

atoomfysica worden dit soort oscillaties meestal Rabi oscillaties genoemd. Een zeer actueel voorbeeld van dit fenomeen zijn de zogenaamde neutrino oscillaties, die een gevolg zijn van het feit dat de massa's, en daarmee de energie, van het electron- en het tau-neutrino niet aan elkaar gelijk zijn.

In de buurt van een Feshbach resonantie verwachten we dus dat het mogelijk moet zijn om Rabi oscillaties tussen atomen en moleculen waar te nemen. De gewenste lineaire superpositie wordt in dit geval gemaakt door een snelle "puls" met het magneetveld te maken. Dat wil zeggen dat het magneetveld van een bepaalde beginwaarde snel dicht bij de resonantiewaarde wordt gebracht, daar enige tijd wordt vastgehouden, en dan snel weer terug naar een variabele eindwaarde wordt gebracht. Aangezien het energieverval tussen de atomen en het molecuul van deze eindwaarde van het magnetisch veld zullen afhangen, kunnen we zo de oscillatiefrequentie als functie van het magneetveld meten. Alhoewel er dus slechts een puls in het magneetveld nodig is om de atoom-molecuul oscillaties te bestuderen, is het om technische redenen nauwkeuriger om het experiment met twee pulsen uit te voeren, waarbij de Rabi oscillaties dan plaatsvinden als functie van de tijd tussen de twee pulsen. Dit staat bekend als een Ramsey meting.



Figuur 2: De frequentie van de atoom-molecuul oscillaties als functie van het aangelegde magneetveld. De Feshbach resonantie treedt hier op bij een magneetveld van 155 Gauss. De punten geven de experimentele resultaten verkregen door de groep van Carl Wieman weer [8]. De gestippelde lijn is het resultaat van een berekening voor twee atomen. De getrokken lijn brengt ook de veeldeeltjeseffecten in rekening die een gevolg zijn van het feit dat het experiment uitgevoerd wordt met een Bose-Einstein condensaat van atomen.

Josephson oscillaties

Het resultaat van deze metingen is weergegeven in figuur 2. Voor een magneetveld ver van de resonantie komt het experimentele resultaat inderdaad precies overeen met de formule $|E_1 - E_2|/h$, die uitgezet is met behulp van de gestippelde lijn. Voor magneetvelden dicht bij de resonantie zien we echter dat er een substantiële afwijking van dit verwachte resultaat optreedt. De reden hiervoor is dat deze experimenten uitgevoerd zijn met een Bose-Einstein condensaat van atomen. De Rabi oscillaties treden daardoor niet op tussen twee atomen en één molecuul, maar tussen een Bose-Einstein condensaat van atomen en een Bose-Einstein condensaat van moleculen. Het is derhalve beter de oscillaties Josephson oscillaties te noemen, die bekend zijn

van experimenten met twee supergeleidende metalen gekoppeld door een Josephson junctie. De getrokken lijn geeft het resultaat voor deze Josephson oscillaties, zoals die verkregen is met behulp van onze recentelijk geformuleerde quantumveldentheorie voor de beschrijving van een atomair Bose gas in de buurt van een Feshbach resonantie. Dit resultaat is verkregen zonder gebruik te maken van vrije parameters en is in perfecte overeenstemming met de experimenten.

Toekomst

Gezien het bovenstaande succes lijkt het gerechtvaardigd om onze theorie ook toe te passen op andere interessante problemen. Een van deze problemen hebben we hierboven al genoemd en betreft de Bose-Einstein condensatie van Cooper paren. Van groot belang in dit verband is een nauwkeurige voorspelling van de kritieke temperatuur waaronder dit verschijnsel zich zal afspelen. De reden voor dit belang is dat het afkoelen van een atomair Fermi gas veel moeilijker is dan dat van een atomair Bose. Wil de Bose-Einstein condensatie van Cooper paren dus experimenteel waargenomen gaan worden, dan moet deze kritieke temperatuur voldoende hoog zijn.

Een ander interessant probleem is het maken van ultrakoude moleculen, en uiteindelijk ook een Bose-Einstein condensaat van moleculen. Dit lijkt nu voor het eerst gerealiseerd te kunnen worden, door het externe magneetveld voldoende langzaam door een Feshbach resonantie heen te schuiven. Gezien het sterke nietevenwichtskarakter van dit proces, en het feit dat we op resonantie altijd met een sterkwisselwerkend gas te maken hebben, is ook dit een theoretisch zeer uitdagend onderwerp dat we in de toekomst hopen aan te pakken.

Referenties

- [1] M.H. Andersen, J.R. Ensher, M.R. Matthews, C.E. Wieman, and E.A. Cornell, *Science* **269**, 198 (1995).
- [2] H.T.C. Stoof, M. Houbiers, C.A. Sackett, and R.G. Hulet, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 10 (1996).
- [3] M. Greiner, O. Mandel, T. Esslinger, T.W. Hänsch, and I. Bloch, *Nature* **415**, 39 (2002).
- [4] D. Jaksch, H.-J. Briegel, J.I. Cirac, C.W. Gardiner, and P. Zoller, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1975 (1999).
- [5] W.C. Stwalley, *Phys. Rev. Lett.* **37**, 1628 (1976).
- [6] E. Tiesinga, B.J. Verhaar, and H.T.C. Stoof, *Phys. Rev. A* **47**, 4114 (1993).
- [7] E.A. Donley, N.R. Claussen, S.T. Thompson, and C.E. Wieman, *Nature* **417**, 529 (2001).
- [8] N.R. Claussen, S.J.J.M.F. Kokkelmans, S.T. Thompson, E.A. Donley, and C.E. Wieman (<http://arXiv.org/abs/cond-mat/0302195>).
- [9] R.A. Duine and H.T.C. Stoof, *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.* **5**, S212 (2003); *New J. Phys.* **5**, 69 (2003).