

Koude atomen bieden weerstand

Deeltjestransport blijkt zich voor ultrakoude atomaire Bose-gassen radicaal anders te gedragen dan voor normale elektrische geleiders. We bestuderen de wrijvingsweerstand tussen deeltjes met verschillende spin die, net als normale elektrische weerstand, voor gewone geleiders kleiner wordt bij lagere temperatuur. Deze wrijvingsweerstand is voor bosonische atomen spectaculair veel groter vanwege kwantummechanische veel-deeltjeseffecten, en neemt zelfs toe als het systeem kouder wordt. Hierdoor ontstaan nieuwe inzichten in de fundamentele aspecten van ladings- en spintransport. Dat laatste speelt met name een rol in de zogenaamde 'spintronica', een vakgebied dat onder meer de iPod mogelijk heeft gemaakt. In dit artikel bespreken we het nieuwe vakgebied van 'bosonisch transport', dat analogieën van elektrische geleiding bestudeert met koude bosonische atomen om zo onontgonnen fysische regimes van transport te onderzoeken. De resultaten van ons fundamentele onderzoek zijn onder andere van belang voor het bouwen van 'atoomtronische' schakelingen, waarin componenten zoals diodes en transistoren gebaseerd worden op koude atomen in plaats van elektronen. Rembert Duine, Hedwig van Driel en Henk Stoof

276

Alle elektronische technologie is gebaseerd op het manipuleren van elektrische geleiding. Het begrijpen van elektronisch transport is mede daarom een zeer belangrijk onderzoeksdoel van de fysica van de gecondenseerde materie. Men karakteriseert materialen vaak aan de hand van hun geleidingseigenschappen: is het een geleider, een halfgeleider, of een supergeleider? Bovendien geven transportmetingen belangrijke fysische informatie over het materiaal. Zo geeft de temperatuursafhankelijkheid van transportcoëfficiënten, zoals de geleiding en de weerstand, informatie over de onderliggende deeltjes die het transport veroorzaken en de verschil-

lende manieren waarop zij onderling en met onzuiverheden botsen.

De analyse van elektronische transportmetingen wordt aanzienlijk bemoeilijkt door het grote aantal processen dat bijdraagt aan elektrische weerstand, zoals de botsingen tussen de elektronen onderling en tussen de elektronen en ionen in het onderliggende rooster van het materiaal. Dit probleem kan grotendeels opgelost worden door gebruik te maken van de opstelling in figuur 1, waarmee ingezoomd kan worden op de effecten van de interacties tussen de elektronen. De opstelling bestaat uit twee metalische lagen die ruimtelijk gescheiden zijn. Door de onderste laag wordt een

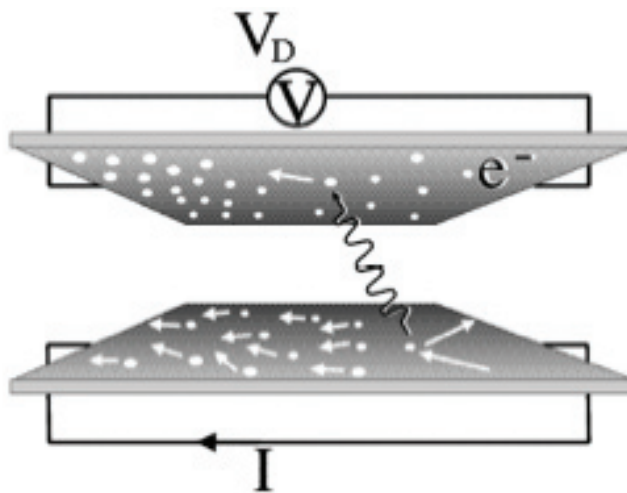
stroom I gestuurd, die de elektronen in de bovenste laag meetrekt en aldus een potentiaalverschil V_D over de bovenste laag induceert. De verhouding tussen het geïnduceerde potentiaalverschil en de aangelegde stroom definieert nu een weerstand die alleen veroorzaakt wordt door de wrijving ten gevolge van interacties tussen de elektronen in de verschillende lagen.

Spins op sleeptouw

Elektronen hebben een ingebouwd kompasnaaldje, dat zich volledig kwantummechanisch gedraagt, hun zogenaamde 'spin'. Elektronen in een geleider kunnen in twee verschillende spintoestanden voorkomen en boven-

dien kan er naast transport van lading ook transport van spin optreden. In analogie met bovenstaand experiment is het mogelijk om in plaats van de wrijvingsweerstand tussen twee lagen, de wrijvingsweerstand tussen de twee spincomponenten van het elektron te beschouwen, de zogenaamde *spin drag resistance*. Deze weerstand wordt net als normale elektrische weerstand kleiner voor lager wordende temperatuur.

Atomen hebben geen elektrische lading, maar wel spin, en het is dus mogelijk om de spinwrijvingsweerstand te bestuderen met systemen van koude bosonische atomen [1]. Dit zijn systemen waarbij de atomen, veelal Rb-87 of Na-27, in een zogenaamde harmonische valkuil gevangen worden zoals weergegeven in figuur 2. De valkuil wordt experimenteel gemaakt door gebruik te maken van de interactie tussen de atomen en laserlicht, of door gebruik te maken van de Zeeman-interactie tussen de atomen en een magnetisch veld. In zo'n valkuil kunnen nu twee spintoestanden van een bosonisch atoom gevangen worden, waarna de atomen worden afgekoeld tot temperaturen van enkele honderden nanoKelvin. Om de wrijvingsweerstand te meten dient nu het volgende experiment te worden uitgevoerd. Door middel van een magnetisch veld wordt een van de twee wolkjes in beweging gezet ten opzichte van het andere wolkje. Het wolkje dat in beweging gezet wordt zal nu gaan oscilleren in de harmonische valkuil. Door de interacties tussen de atomen zal het wolkje dat in eerste instantie stil stond gaan meebewegen, een voorbeeld van *spin drag*. Het uiteindelijke resultaat is een gekoppelde oscillatie van twee wolkjes van atomen in verschillende spintoestanden. Door de interatomaire interacties, die tot wrijving tussen de twee spintoestanden leidt, zal de grootte van de onderlinge afstand tussen de twee wolkjes afnemen in de tijd. Dit definieert een relaxatietijd τ , die sterk van de temperatuur afhangt. Deze relaxatietijd bepaalt nu de weerstand ρ (strikt genomen een resistiviteit) volgens de formule van Drude: $\rho = m/n e^2 \tau$. Hierbij is m de massa van de atomen en n hun dichtheid. De lading e van het elektron staat in deze formule alleen om de weerstand in dezelfde eenheden te geven als de normale elektronische weerstand, zodat



Figuur 1 Experimentele opstelling om de effecten van elektronische interacties op de geleiding te meten. Twee geleiders zijn ruimtelijk gescheiden. De elektronen in de onderste laag trekken de elektronen in de bovenste laag mee hetgeen tot een weerstand, gedefinieerd door V_D/I , leidt (naar www.sp.phy.cam.ac.uk/SPWeb/).

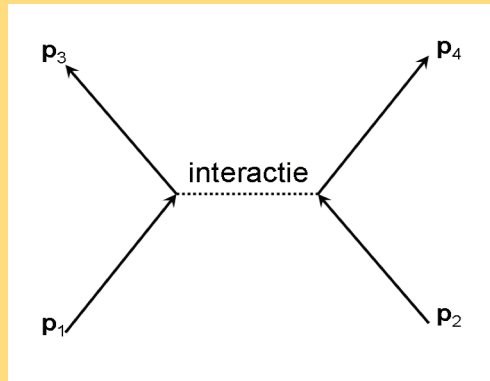
een directe vergelijking hiermee mogelijk wordt. De atomen zijn immers neutraal. Ondanks het feit dat er geen wanorde en geen onderliggend rooster is in dit systeem, blijkt dat een groot gedeelte van de fenomenologie van elektronisch transport ook hier van toepassing is. Het gas warmt bijvoorbeeld ook op gedurende de oscillatie, analoog aan de Joule-opwarming van elektronische systemen, wanneer deze stroom geleiden. De wrijvingsweerstand zelf is echter veel groter dan in een conventionele geleider, en neemt niet af

maar toe met het afkoelen van het systeem. Dit fundamentele verschil komt doordat de beschouwde atomen tot de klasse van deeltjes behoren die bosonen genoemd worden, terwijl elektronen fermionen zijn. Kort samengevat blijkt uit de kwantummechanica dat fermionen 'asociaal' deeltjes zijn die elkaar mijden en daardoor weinig met elkaar botsen, terwijl bosonen juist 'sociaal' zijn, veel botsen, en daardoor veel onderlinge wrijving ondervinden. Dit is in het kader nader uitgewerkt. Voor elektronen leidt dit gegeven tot de beroemde kwadra-



Figuur 2 Illustratie van een harmonische valkuil met twee wolkjes van koude bosonische atomen in een verschillende spintoestand, die voor het onderscheid in de figuur rood en groen gekleurd zijn. Met behulp van een extern magnetisch veld wordt een van de twee wolkjes (in deze figuur het rood gekleurde wolkje) in beweging gezet. Door de interacties tussen de atomen ontstaat er een gekoppelde oscillatie, die dempt door wrijving tussen de twee wolkjes. Dit definieert de wrijvingsweerstand tussen twee spintoestanden, de zogenaamde *spin drag resistance*. Deze figuur is gemaakt door Dries van Oosten.

Pauli blocking versus Bose enhancement



In een theoretische berekening van de wrijvingweerstand is het noodzakelijk de botsingsfrequentie te bepalen. De relaxatietijd τ is namelijk omgekeerd evenredig aan deze botsingsfrequentie. Het Feynman-diagram in de figuur beschrijft een botsing waarbij een atoom met impuls p_1 en een atoom met impuls p_2 elkaar naderen, botsen, en vervolgens weer van elkaar af bewegen met de impulsen p_3 en p_4 . Binnen de zogenaamde Boltzmann-benadering wordt het systeem gekarakteriseerd door een verdelingsfunctie f_p , die het aantal atomen met impuls p geeft. De botsingsfrequentie hangt af van deze verdelingsfunctie. Zo neemt het aantal botsingen toe als er meer atomen zijn met impulsen p_1 en p_2 voor de botsing, en is de botsingsfrequentie dus evenredig met $f_{p_1} f_{p_2}$. Binnen de kwantummechanica wordt de botsingsfrequentie ook beïnvloed door het aantal deeltjes dat al de impuls p_3 of p_4 heeft. Zo is de kans op een verstrooiingsproces van een fermionisch deeltje naar een impuls p evenredig met de factor $1-f_p$, zodat dit proces niet optreedt als er al een deeltje met impuls p is – een resultaat van het beroemde Pauli-uitsluitingsprincipe. Deze onderdrukking van verstrooiing wordt dan ook *Pauli blocking* genoemd. Voor fermionische deeltjes zou het hele Feynman-diagram evenredig zijn met de factor $f_{p_1} f_{p_2} (1-f_{p_3})(1-f_{p_4})$. Voor bosonen is er echter sprake van Bose-stimulatie of *Bose enhancement* wat er toe leidt dat de kans op verstrooiing naar een toestand met impuls p evenredig is met de factor $1+f_p$, en het totale proces dus evenredig is met $f_{p_1} f_{p_2} (1+f_{p_3})(1+f_{p_4})$. Dit fundamentele verschil leidt uiteindelijk tot het compleet verschillende gedrag van transport eigenschappen van elektronen en bosonische atomen.

278

tische temperatuursafhankelijkheid van de weerstand door interacties, $\rho \sim T^2$ voor lage temperatuur. De wrijvingsweerstand neemt dus inderdaad af voor afnemende temperatuur. Voor

koude bosonische atomen geldt, binnen bepaalde benaderingen, dat deze weerstand zich gedraagt als $\rho \sim 1/T^{5/2}$ en dus juist toeneemt voor lagere temperatuur [1]. Niet alleen de temperatuursafhankelijkheid is compleet anders, ook de absolute grootte van de “spin drag resistance” verschilt enorm tussen elektronen en koude atomen. Voor elektronen wordt een typische waarde gegeven door $\rho = 10^{-9} \Omega\text{m}$. Voor het systeem van koude atomen blijkt dit $\rho = 10^{-5} \Omega\text{m}$ te zijn, een verschil van maar liefst vier ordes van grootte. De voorbereidingen voor het uitvoeren van het experiment geschetst in figuur 2, en daarmee de experimentele toetsing van onze theoretische re-

Hedwig van Driel (1985) studeerde, na een bachelor op het University College Utrecht, theoretische natuurkunde aan de Universiteit van Utrecht. Eind 2008 begon zij met haar promotie over koude gassen onder begeleiding van Rembert Duine en Henk Stoof.



sultaten, zijn inmiddels in volle gang in de groep van Peter van der Straten aan de Universiteit Utrecht.

Rotatie en Hall-effecten

Het blijkt ook mogelijk om met het systeem van koude bosonische atomen analogieën van het Hall-effect te bestuderen. Het Hall-effect is het ontstaan van een voltage V_H in een richting die loodrecht staat op de richting van de stroom I . Dit gebeurt bijvoorbeeld wanneer een magneetveld wordt aangelegd dat de elektronen afbuigt via de Lorentz-kracht. Het Hall-effect is vooral van belang omdat de Hallweerstand, $R_H = V_H/I$, omgekeerd evenredig is aan de elektrondichtheid en verder geen afhankelijkheid heeft van materiaalspecifieke parameters. Met behulp van het Hall-effect kan de elektrondichtheid dus rechtstreeks experimenteel bepaald worden.

Aangezien koude bosonische atomen neutraal zijn ondervinden zij geen Lorentz-kracht in een magneetveld. Een fictief magneetveld kan echter worden bewerkstelligd door het ronddraaien van het systeem. In het meedraaiende ruststelsel van de atomen zijn er namelijk twee schijnkrachten, de centrifugale kracht en de Coriolis-kracht. De laatste staat loodrecht op de snelheid van de deeltjes en heeft exact dezelfde vorm als de Lorentz-kracht. Als het bovenstaande experiment met oscillerende wolkjes van twee verschillende spincomponenten wordt uitgevoerd in een roterende valkuil, dan zal er ook een zijdelingse beweging ontstaan gedurende de oscillatie. Deze transverse component komt overeen met de Hall-component van de elektrische stroom en wordt alleen bepaald door de dichtheid van de atomen [2].

Van spintronica naar atoomtronica

Het samenspel van ladingstransport en spintransport in elektronische systemen wordt bestudeerd in het vakgebied van de spintronica. Het experimenteel uitvoeren van ons theoretische voorstel om de spinwrijvingsweerstand te meten in een ultrakoud Bose-gas zou dan ook corresponderen met het eerste spintronicaexperiment in het vakgebied van de koude atomen, en leiden tot een beter begrip van de fundamentele van spin- en la-

Rembert Duine (1975) studeerde theoretische natuurkunde aan de Universiteit Utrecht, en vervolgde zijn studie met een promotieonderzoek naar Feshbach resonanties in ultrakoude kwantumgasen. Hierna vertrok hij als postdoc naar de Universiteit van Texas te Austin, waar hij zijn onderzoeksgebied verruimde met spintronica. Hij keerde in 2006 als Universitair Docent terug naar Utrecht met een NWO VIDI subsidie op dit vakgebied, en kreeg voor zijn werk ook de Starting Independent Researcher Grant van de European Research Council toegekend.



R.A.Duine@uu.nl

dingstransport.

Het in dit artikel besproken voorbeeld van een transportverschijnsel van bosonische deeltjes, de wrijvingsweerstand tussen twee spincomponenten, is slechts een voorbeeld van bosonisch transport. Recentelijk is dit onderwerp, door de unieke mogelijkheden met systemen van koude atomen, ook experimenteel in de belangstelling gekomen. Nederland staat binnen dit onderzoeksthema aan het voorfront, getuige bijvoorbeeld het experiment van de groep van Peter van der Straten waarbij voor het eerst warmtetrans-

port in zo'n systeem gemeten is [3] en het ruisexperiment van de groep van Wim Vassen aan de Vrije Universiteit te Amsterdam [4].

Een van de nieuwe ontwikkelingen in het vakgebied van de koude atomen is het begrip 'atoomtronica', het idee om componenten, zoals diodes en transistoren, te maken met koude atomen in plaats van elektronen [5]. Dit is mogelijk, althans in theorie, omdat de valkuil voor de atomen in detail ontworpen en gemanipuleerd kan worden. Een van de beoogde voordelen van atoomtronische schakelingen boven elektronische, is dat in koude-atoomsystemen geen intrinsieke onzuiverheden zitten die het transport belemmeren, waardoor de componenten sneller werken en nauwkeuriger ontworpen kunnen worden. Tot op heden is het begrip atoomtronica nog grotendeels theoretisch, maar het is onze hoop dat onze verkregen inzichten in spintransport van bosonische atomen ook zullen bijdragen aan dit meer toepassingsgerichte vakgebied.

Referenties

- 1 R.A. Duine en H.T.C. Stoof, *Spin Drag in Noncondensed Bose Gases*, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 170401 (2009).

Henk Stoof (1962) studeerde Technische Natuurkunde in Eindhoven. Na zijn promotie in Eindhoven had hij postdocposities 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. Hij kreeg een VICI-subsidie toegekend voor theoretisch onderzoek aan exotische kwantumgassen, was Distinguished Simons Lecturer in New York, en is Fellow van de American Physical Society.



- 2 H.J. van Driel, R.A. Duine en H.T.C. Stoof, *Spin Drag Hall Effect in a Rotating Bose Mixture*, nog niet gepubliceerd.
- 3 R. Meppelink, R. van Rooij, J. M. Vogels, en P. van der Straten, *Enhanced Heat Flow in the Hydrodynamic Collisionless Regime*, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 095301 (2009).
- 4 T. Jelten, J. M. McNamara, W. Hogervorst, W. Vassen, V. Krachmalnicoff, M. Schellekens, A. Perrin, H. Chang, D. Boiron, A. Aspect en C. I. Westbrook, *Comparison of the Hanbury Brown-Twiss effect for bosons and fermions*, *Nature* **445**, 402 (2007).
- 5 R. A. Pepino, J. Cooper, D. Z. Anderson, en M. J. Holland, *Atomtronic Circuits of Diodes and Transistors*, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 140405 (2009).