

Over Quantumvloeistoffen en de koudste Atomen ter Wereld

H.T.C. Stoof
Instituut voor Theoretische Fysica
Universiteit Utrecht

11 Oktober 2000

Mijnheer de Rector Magnificus,

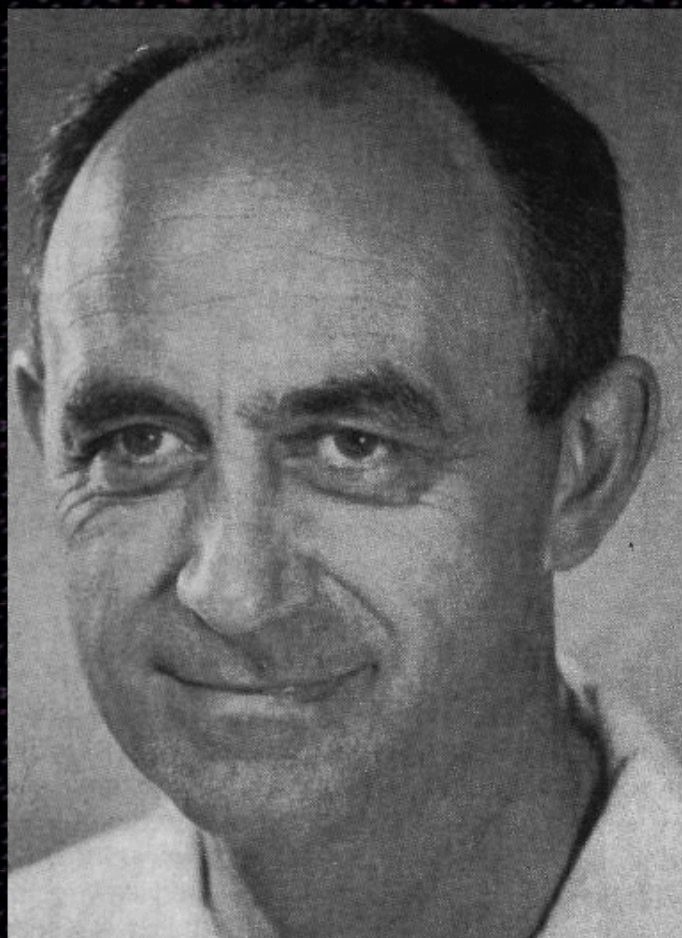
Zeer gewaardeerde toehoorders,

Albert Einstein (1879-1955)



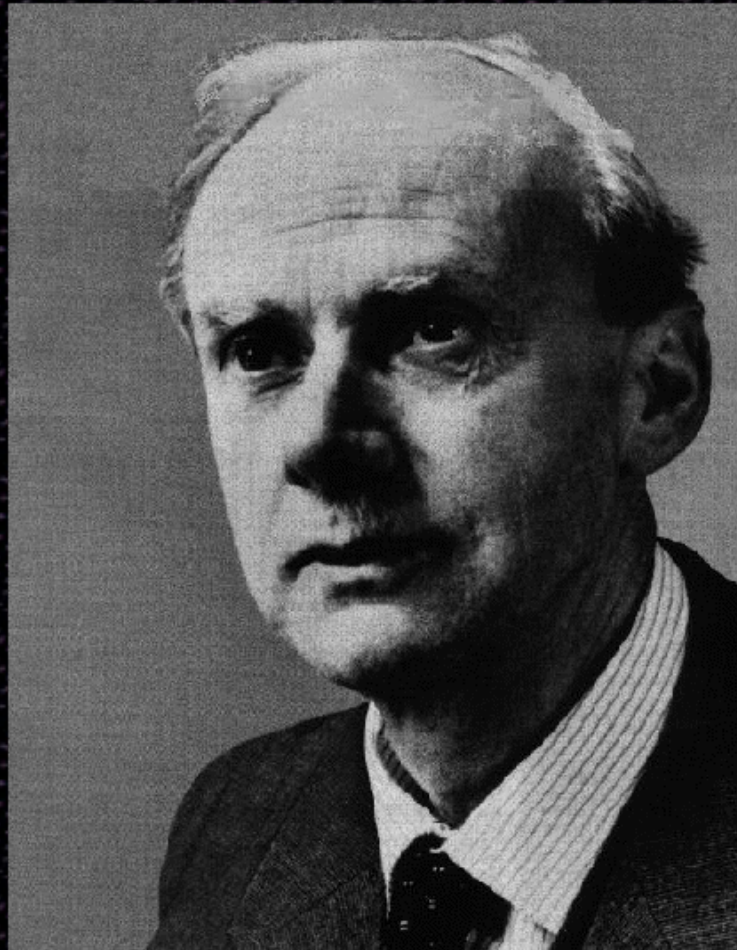
De geschiedenis van de quantumvloeistoffen begint in 1924 met een artikel van Albert Einstein. Het wonderbaarlijke van dit artikel is dat Einstein hierin, nog voor de ontdekking van de quantummechanica en nog voordat er een serieus begin is gemaakt met de bestudering van faseovergangen, alleen op grond van statistische argumenten een juiste beschrijving geeft van een ideale quantumvloeistof en van de daarin bij extreem lage temperaturen optredende faseovergang, die nu bekend staat als Einsteincondensatie. Deze naam is bijzonder toepasselijk vanwege de grote analogie met het, zeker in Nederland, alom bekende verschijnsel van waterdamp die condenseert op een koud oppervlak.

Enrico Fermi (1901-1954)



Ongeveer een jaar later, laat Enrico Fermi met vergelijkbare statistische argumenten als Einstein zien dat er in feite nog een tweede soort van quantumvloeistof mogelijk is, die bij lage temperaturen volkomen andere eigenschappen heeft dan degene die door Einstein was ontdekt. Dit gaf in eerste instantie aanleiding tot enige verwarring. Het leidde namelijk tot de moeilijkheid om voor een specifieke vloeistof bij voorbaat te zeggen met welke van de twee quantumvloeistoffen we te maken hebben. Dit probleem werd opgelost door Paul Dirac. Deze gaf, met de mede door hem zojuist ontwikkelde quantummechanica, een precieze onderbouwing van de statistische argumenten van Einstein en Fermi. In het bijzonder toonde hij aan dat de fundamenteel verschillende eigenschappen van de twee quantumvloeistoffen een gevolg zijn van, respectievelijk, de symmetrie of antisymmetrie van de zogenaamde golffunctie van de vloeistof.

Paul Dirac (1902-1984)



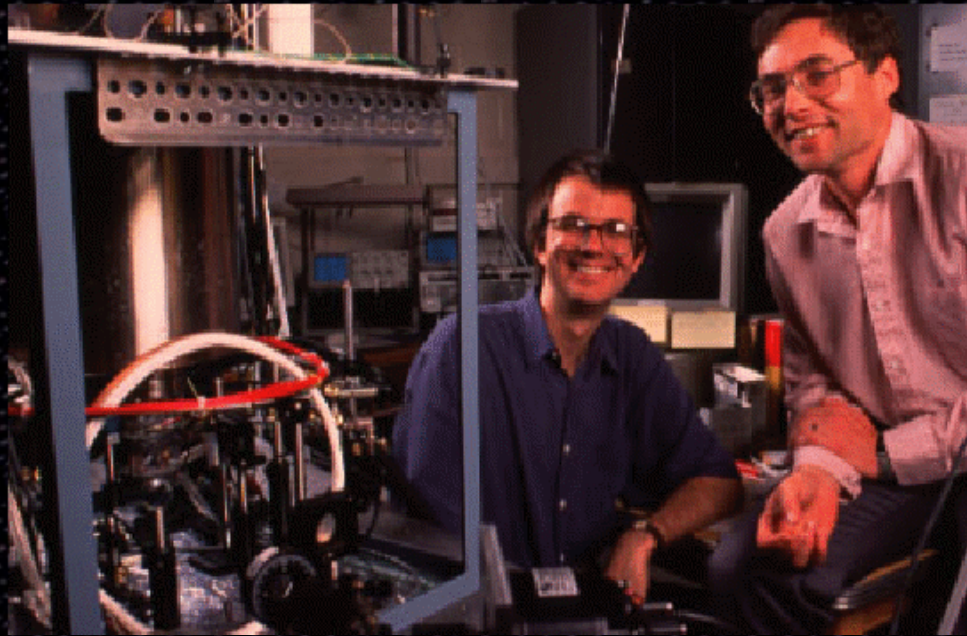
Ik kan dit verschil in moderne taal nog op een andere manier uitleggen. Hiervoor moeten we ons realiseren dat quantummechanisch gezien de toestand van een atoom in de vloeistof bepaald wordt door zijn snelheid. De toestand van de gehele vloeistof wordt dus gekarakteriseerd door de snelheden van alle afzonderlijke atomen in de vloeistof. Omdat er vele snelheden mogelijk zijn voor elk atoom, kunnen we de vloeistof dus opvatten als een verzameling van een groot aantal hokjes, door fysici toestanden genoemd, waarin alle atomen op de een of andere manier opgeborgen moeten worden. Het verschil tussen de twee quantumvloeistoffen wordt nu veroorzaakt door het feit of, als we één atoom aan de vloeistof toevoegen, het aantal beschikbare hokjes voor het toevoegen van een tweede atoom al dan niet gelijk is aan het aantal hokjes dat beschikbaar was voor het eerste atoom. Voor de door Einstein beschouwde vloeistof blijft het aantal beschikbare hokjes gelijk, terwijl het aantal beschikbare hokjes voor een Fermivloeistof precies met één afneemt.

Robert Laughlin (1950)



Lange tijd dacht men dat dit de enige twee soorten van statistiek waren die in de natuur voorkomen, maar sinds kort weten we dat dit niet het geval is. In de zojuist uitgelegde taal betekent dit dat, als we een atoom aan de vloeistof toevoegen, het aantal beschikbare toestanden voor het tweede atoom niet alleen niet of met precies één kan afnemen, maar in feite met een willekeurige fractie daartussenin. De ontdekking van deze zogenaamde fractionele statistiek hebben we hoofdzakelijk te danken aan Bob Laughlin, die daarvoor in 1998 de Nobelprijs voor fysica in ontvangst mocht nemen. In het vervolg zal ik aan dergelijke, op zich bijzonder interessante, quantumvloeistoffen verder geen aandacht schenken. Zij zijn echter een mooie illustratie van een belangrijke tendens in de hedendaagse fysica. Ik doel hier op het feit dat fundamenteel nieuwe ontdekkingen en inzichten in de laatste tien jaar tot stand zijn gekomen door het bestuderen van de eigenschappen van systemen bestaande uit een groot aantal deeltjes, in plaats van het bestuderen van het gedrag van die deeltjes zelf. Anders gezegd: Het geheel is veel meer dan de som der delen. De gecondenseerde materie is het vakgebied dat zich bij uitstek bezig houdt met dit collectieve gedrag van fysische systemen, en ik ben dan ook bijzonder ingenomen met het feit in Utrecht een leerstoel in dit vakgebied te mogen bezetten.

Eric Cornell (1961) & Carl Wieman (1951)

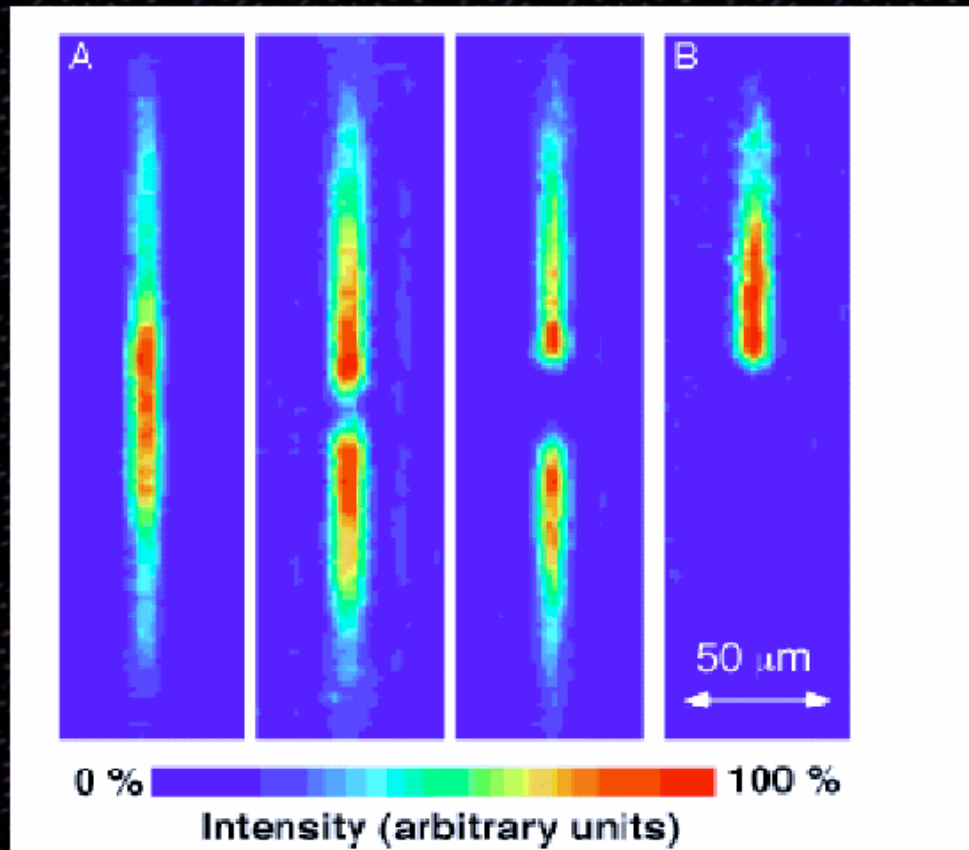


Het is nu hoog tijd geworden om iets dieper in te gaan op de vraag: Wat is nu eigenlijk een quantumvloeistof? Ik zal dit in eerste instantie doen aan de hand van een experiment dat recentelijk uitgevoerd is door de groep van Wolfgang Ketterle aan het Massachusetts Institute for Technology in de Verenigde Staten. Alvorens ik dat kan doen, moet ik echter eerst twee belangrijke opmerkingen maken. De eerste opmerking is dat dit experiment slechts mogelijk was door de geweldige experimentele doorbraak die door Eric Cornell en Carl Wieman bereikt werd op het Joint Institute for Laboratory Astrophysics, eveneens in de Verenigde Staten. Zij waren er namelijk in 1995 in geslaagd om een gas van rubidium atomen af te koelen tot de recordtemperatuur van zo'n een miljardste graad boven het absolute nulpunt en brachten daarmee voor het eerst de 71 jaar eerder theoretisch voorspelde Einsteincondensatie op een ondubbelzinnig wijze experimenteel tot stand. Deze unieke prestatie zal ongetwijfeld tot gevolg hebben dat ook zij in één van de komende jaren in begin december naar Stockholm kunnen afreizen.

De tweede opmerking betreft een mogelijke misvatting die bij de niet-fysici onder de hier aanwezigen zou kunnen leven. Slechts twee weken geleden hoorde ik tijdens een populaire quiz, die ik verder niet bij naam zal noemen, de volgende vraag gesteld worden: Bij welke temperatuur staan alle atomen stil? Alhoewel ik vond dat de kandidaat met de uitspraak, "Ik weet het niet," de waarheid dicht benaderde, was volgens de spelleiding het juiste antwoord het absolute nulpunt van ongeveer -273 graden Celcius. Gezien dit antwoord is het duidelijk dat de spelleiding niet op de hoogte is van de quantummechanica, die ons vertelt dat er geen enkele temperatuur is waarbij alle atomen stil staan. In tegendeel, ik hoop u in het vervolg van mijn verhaal nog verscheidene voorbeelden te kunnen

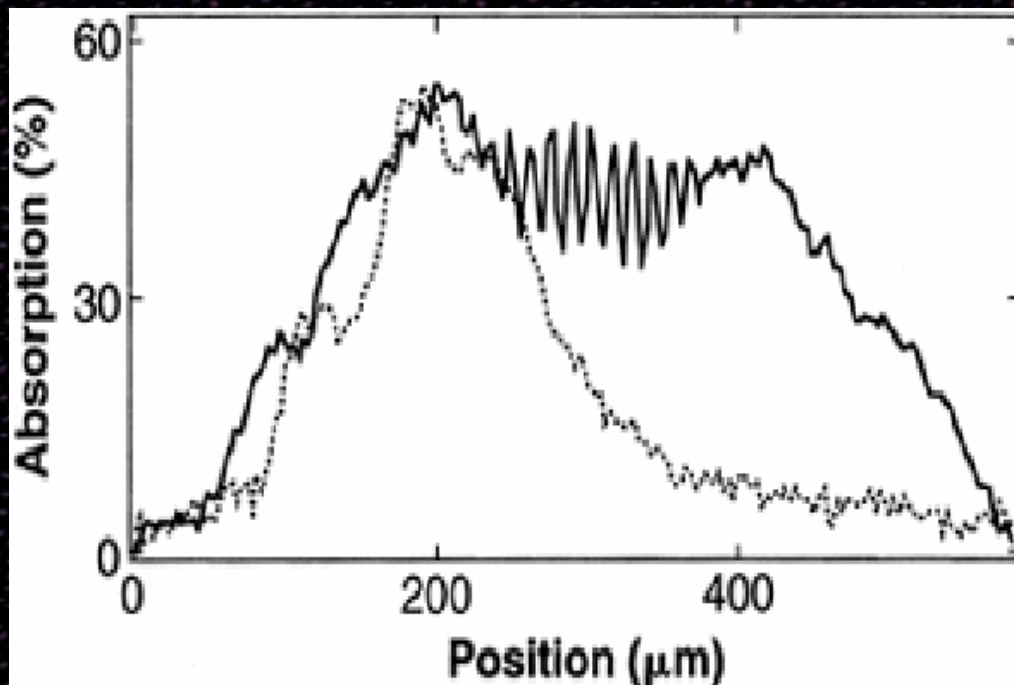
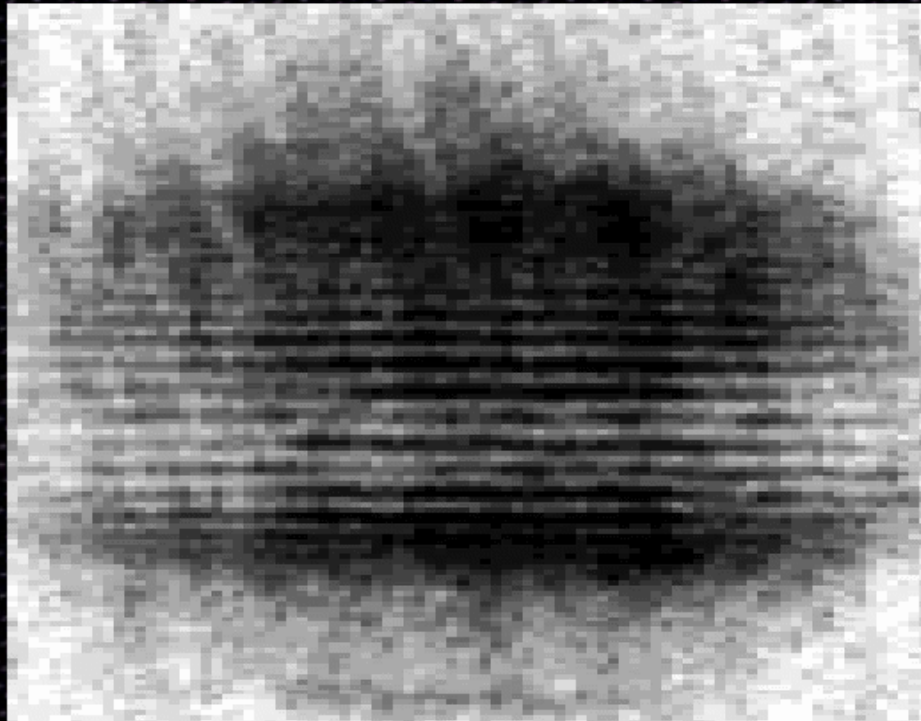
geven, die illustreren dat zelfs bij het absolute nulpunt van temperatuur quantumvloeistoffen nog hoogst interessante bewegingen kunnen uitvoeren .

Wat is een quantumvloeistof?



Na hopelijk voorgoed deze misvatting uit de wereld geholpen te hebben, wil ik dan nu het eerder genoemde experiment van Wolfgang Ketterle bespreken. In de hierboven geprojecteerde figuur ziet u in de eerste drie foto's hoe een sigaarvormige druppel quantumvloeistof in tweeën gesplitst wordt met behulp van een laserbundel, die zelf niet op de foto's zichtbaar is, en die zodanig afgestemd is dat de natriumatomen in de druppel door het licht van de bundel afgestoten worden. Zoals onder de panelen aangegeven is, hebben de kleuren op deze foto's de volgende betekenis: Blauw betekent dat er in dat gebied geen atomen aanwezig zijn, terwijl rood betekent dat er zich daar relatief veel atomen bevinden. Bovendien ziet u in de vierde foto de situatie waarin de onderste helft van de druppel met de laserbundel volledig verwijderd is. Dit is het voorbereidende gedeelte van het experiment. Vervolgens zetten we zo snel als we kunnen de laserbundel uit, waardoor de twee helften van de quantumvloeistof gaan expanderen om weer in hun oorspronkelijke positie terug te komen. We wachten dan enige tijd totdat de twee helften met elkaar in contact komen en nemen dan opnieuw een foto. Ditmaal echter een zwartwitfoto, waarbij zwart betekent dat er zich daar wederom veel atomen bevinden. Het resultaat is als volgt.

Interferentiepatroon (MIT)



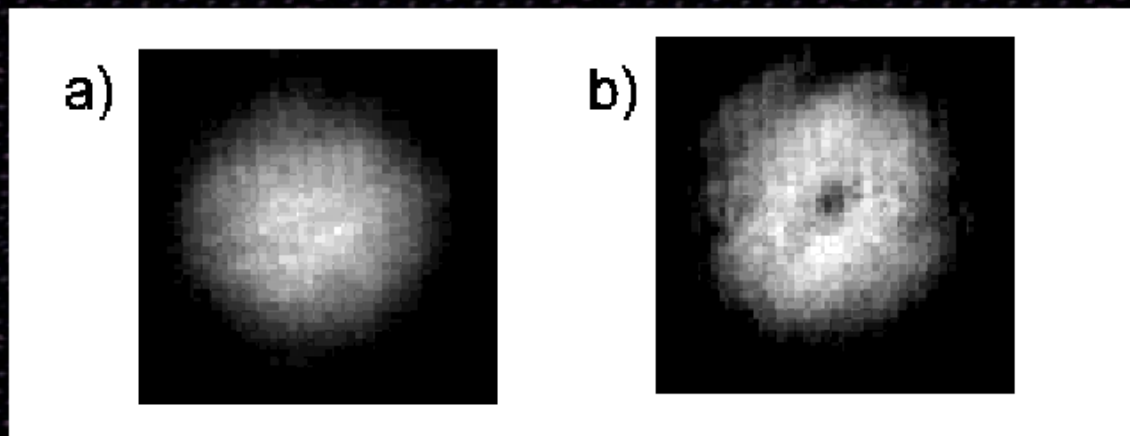
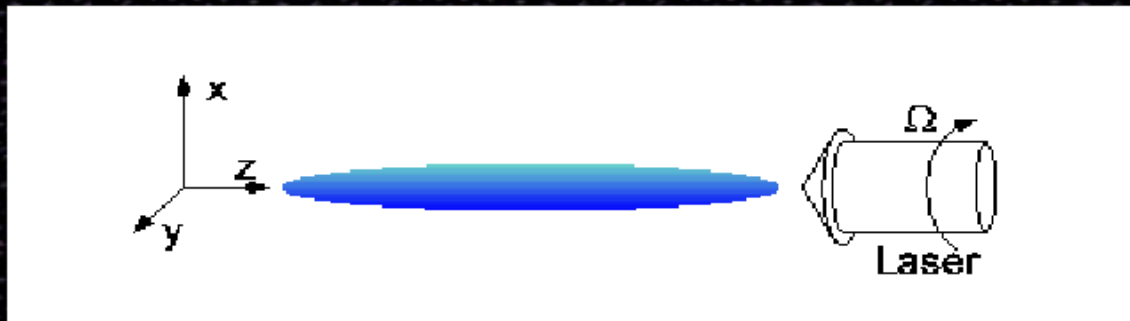
Het bijzondere van dit resultaat zijn de afwisselend lichte en donkere horizontale strepen in het

middengebied, waar de twee helften van de druppel weer met elkaar in contact zijn gekomen. Fysici herkennen dit ogenblikkelijk als een interferentieprofiel en daarmee als de ultieme vingerafdruk van een verschijnsel dat alleen door middel van de quantummechanica begrepen kan worden. Ik kan dit nog iets duidelijker maken door, voor een doorsnede in de verticale richting door de zwartwitfoto, aan te geven hoe donker de foto is en daarmee dus hoeveel atomen er zich op een positie langs deze verticale lijn bevinden. Als referentie is met een stippellijn in deze figuur ook het resultaat weergegeven in de situatie waarin, voor het uitschakelen van de laserbundel, de onderste helft van de quantumvloeistof verwijderd is. Als hetzelfde experiment ook uitgevoerd zou zijn na verwijdering van de bovenste helft van de quantumvloeistof, zou dit ook een stippellijn opgeleverd hebben, die ten opzichte van degene die hier weergegeven is alleen maar over zo'n 200 miljoenste meter naar rechts verschoven is. Op grond van ons gezonde verstand verwachten we dus dat de uitkomst van het experiment met de in tweeën gesplitste druppel, de som van deze twee afzonderlijke stippellijnen is, maar zoals we zien aan de getrokken lijn, die in het midden vele malen snel op en neer gaat, is dit absoluut niet het geval. Zoals ik al zei, dit is het overtuigende bewijs dat de oorspronkelijke sigaarvormige druppel inderdaad een quantumvloeistof was.

Voor de opmerkelijke luisteraar in het gehoor haast ik me om hierbij te vermelden dat het zojuist beschreven experiment bij dusdanig lage dichtheden is uitgevoerd dat er inderdaad geen enkele andere verklaring voor mogelijk is. Ondanks de noodzaak voor een quantummechanische oorsprong van de verklaring, is het effect te vergelijken met het gooien van twee dezelfde stenen in een vijver. Op het wateroppervlak wekken de stenen golven op die elkaar op een bepaald punt kunnen uitdoven of juist versterken, afhankelijk van het verschil in afstand van dat punt tot de posities waar de twee stenen onder het wateroppervlak zijn verdwenen. De analogie gaat helaas echter niet volledig op, want bij het stenen werpen zal er altijd hetzelfde patroon op het wateroppervlak ontstaan als de stenen op precies dezelfde manier in het water gegooid worden. In het geval van het interferentiepatroon van twee identieke quantumvloeistoffen is dit vanwege de beroemde Heisenberg onzekerheidsrelatie niet zo en zal een herhaling van het experiment, zelfs als het op exact dezelfde wijze uitgevoerd wordt, niet exact hetzelfde resultaat hoeven op te leveren. Althans in theorie. Het experiment is tot mijn spijt nog niet uitgevoerd.

Dit brengt mij op het belang van experimenten voor de fysica in het algemeen en de theoretische fysica in het bijzonder. Zoals iedereen bekend is, is fysica een empirische wetenschap, die de pretentie heeft om uiteindelijk tot een volledig begrip te komen van de geboorte en dood van ons heelal, en van alle gebeurtenissen die in de tussentijd daarin zullen optreden. Voor een theoretisch fysicus betekent dit dat er in de praktijk bijzonder veel beperkingen zijn op de theorieën die je met pen en papier in je werkkamer kunt opschrijven. Immers, je ideeën kunnen nog zo briljant of wiskundig gecompliceerd zijn, het wordt eigenlijk pas echt theoretische fysica wanneer het ook experimenteel getoetst kan worden. De keerzijde van deze medaille is natuurlijk het onbeschrijflijke gevoel van voldoening dat je krijgt wanneer het blijkt dat een idee dat aan je brein ontsproten is inderdaad met de realiteit overeen stemt. Op dat moment denk je écht iets begrepen te hebben. Ik heb zelf dit gevoel gelukkig al een paar maal in mijn carrière mogen ervaren en ik kan het daarom iedereen van harte aanbevelen. Het spreekt voor zich dat ik natuurlijk hoop om in de komende jaren nog verschillende malen van een dergelijke gevoel te mogen genieten.

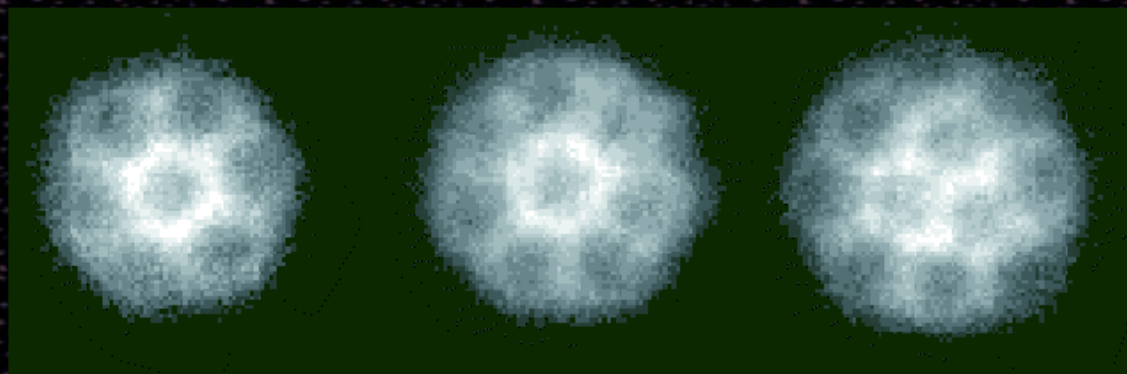
Wervels (JILA & ENS)



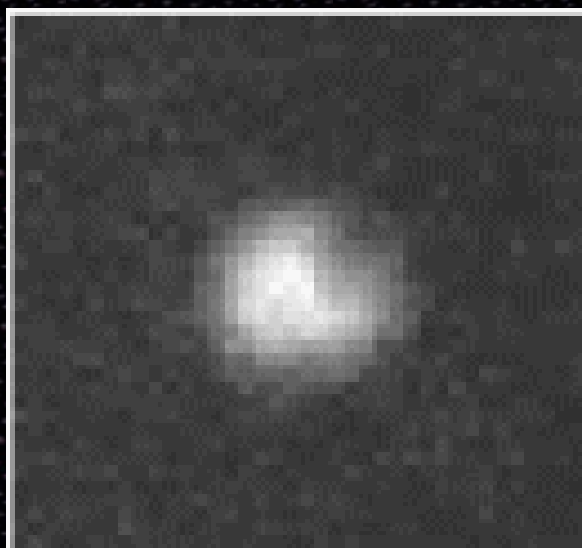
Na dit gezegd te hebben is het tijd om terug te keren op het eigenlijke onderwerp van dit verhaal en een tweede experiment te beschrijven dat alleen met een quantumvloeistof gedaan kan worden. Ik doel hier op de creatie van zogenaamde wervels. De groep van Eric Cornell en Carl Wieman was wederom de eerste die er in slaagde een wervel te maken in een Einsteingecondenseerd gas van rubidiumatomen, maar recentelijk heeft de groep van Jean Dalibard verbonden aan de Ecole Normale Supérieure in Parijs hetzelfde kunststukje geleverd. In zekere zin bent u eigenlijk al vertrouwd met wervels uit uw dagelijkse omgeving, waar zij bekend staan onder de naam waterkolk of wervelwind. Dit geldt zeker als u, zoals ik, enige tijd in het middenwesten van de Verenigde Staten hebt doorgebracht, waar u door de zogenaamde 'tornado watch' op dergelijke wervels opmerkzaam gebracht wordt. In zijn algemeenheid draait bij een wervel dus de gehele vloeistof om een bepaalde as, die bekend staat als de kern van de wervel. Bij een wervel in een quantumvloeistof is de situatie, u zult er langzamerhand niet meer van opkijken, iets gecompliceerder omdat de snelheid waarmee de vloeistof om de kern van de wervel draait niet willekeurig is maar slechts heel specifieke waarden kan aannemen. Deze wervels noemt men daarom ook wel gequantiseerd en het bestaan van een dergelijke wervel kan wederom alleen in het kader van de quantummechanica begrepen worden.

In de experimenten met de koudste rubidiumatomen ter wereld worden de wervels gecreëerd door een roterende laserbundel evenwijdig aan de lengteas door een sigaarvormige druppel van de quantumvloeistof te sturen. De laserbundel speelt hier precies dezelfde rol als een theelepeltje dat u ronddraait in een kop thee, en probeert de vloeistof in beweging te krijgen. Omdat de wervels in een quantumvloeistof gequantiseerd zijn, lukt dit echter alleen wanneer de snelheid waarmee de laserbundel ronddraait groot genoeg is. Dit ziet u in detail in de volgende zwartwitfoto's, die vanuit een gezichtspunt boven de punt van de sigaarvormige druppel gemaakt zijn. In tegenstelling tot de eerdere zwartwitfoto van het interferentiepatroon, betekent zwart nu dat zich daar geen enkel atoom bevindt.

Wervelkristallen (ENS)



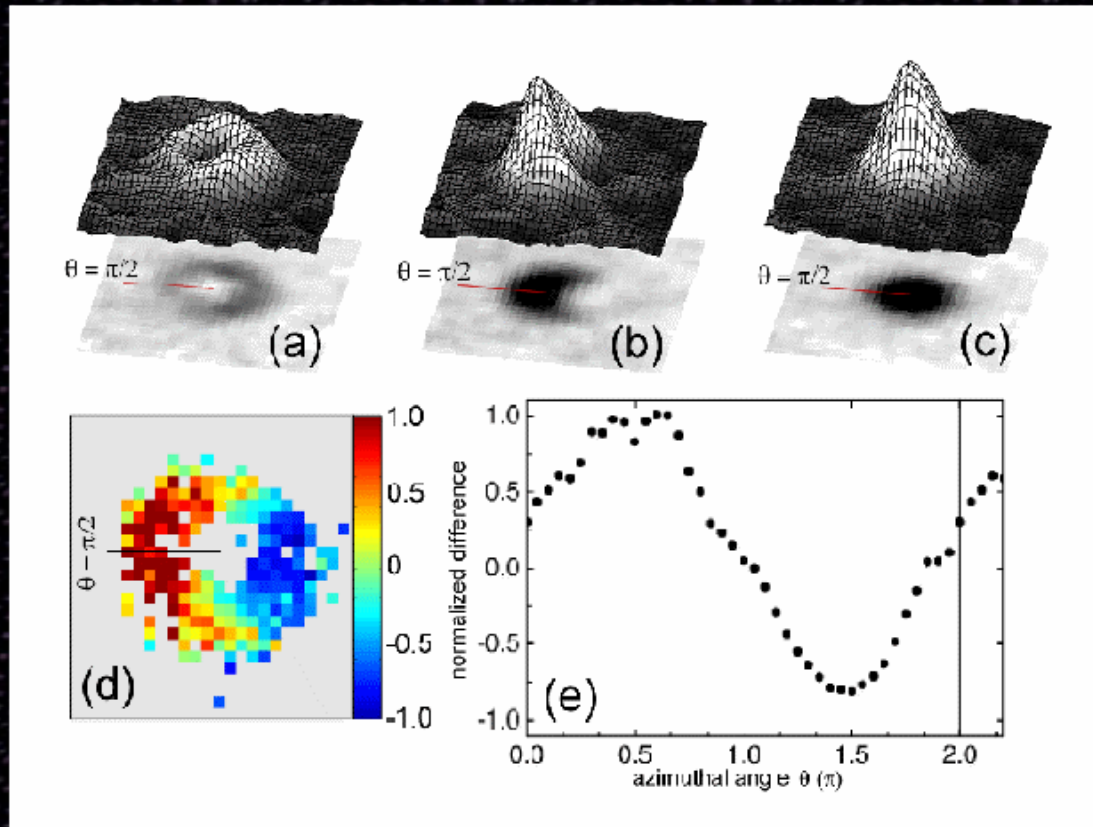
Werveldynamica (JILA)



Op de linker foto ziet u de druppel in het geval dat de laserbundel een te kleine rotatiesnelheid heeft om een wervel te creëren. De quantumvloeistof staat dan gewoon stil en de foto is in feite niet te onderscheiden van het geval dat er überhaupt geen laserbundel aanwezig was. Op de rechter foto ziet u de druppel als de laserbundel voldoende hard roteert om een wervel te laten ontstaan. In het bijzonder ziet u nu in het centrum van de druppel de eerder genoemde kern van de wervel, die er op deze foto donker uitziet omdat de atomen uit de kern van de wervel geslingerd worden vanwege de hoge snelheid waarmee de vloeistof daar moet ronddraaien. Dit kunt u vergelijken met een waterkolk, waarbij de kern ook geen water, maar daarentegen lucht bevat. Laten we de laserbundel nog harder ronddraaien dan is het zelfs mogelijk om meerdere wervels te vormen, in de experimenten van Jean Dalibard zelfs tot aan 11 toe. U kunt ook duidelijk zien dat de wervels zich rangschikken in regelmatige patronen, die u misschien herkent als de kristalstructuur van diamant. Tenslotte kunt u ook nog zien wat er gebeurt als een wervel niet precies op, maar wel evenwijdig aan, de symmetrieas in het midden van de sigaarvormige druppel bevindt. In dat geval gaat de wervel zelf ook rond deze symmetrieas draaien. Terugkomend op mijn eerdere opmerking, kan ik hier niet nalaten te vermelden dat deze film van een ronddraaiende wervel in essentie is gemaakt bij het absolute nulpunt van de temperatuur. Het zal duidelijk zijn dat de atomen allesbehalve stil staan.

Aangezien theoretisch fysici in het algemeen, en hier in Utrecht in het bijzonder, zeer kritisch zijn, zullen er nu misschien mensen in het gehoor zitten die denken: "Moet ik nu werkelijk geloven dat wat ik zojuist heb gezien wervels zijn? Hoe kan ik dan aan deze foto's zien dat de gehele druppel echt om zijn as ronddraait, want dat is toch immers de meest belangrijke eigenschap van een wervel? Misschien heeft de experimentator er gewoon een potje van gemaakt en heeft hij per ongeluk met zijn laserbundel een gat in de vloeistof geboord, op een vergelijkbare wijze zoals in het interferentieexperiment een laserbundel gebruikt werd om de druppel in tweeën te splitsen." In eerste instantie moet ik deze kritische geest dan gelijk geven dat de voorgaande resultaten geen hard bewijs vormen voor het feit dat de quantumvloeistof werkelijk ronddraait, alhoewel ik wel tegen zijn alternatieve verklaring kan inbrengen dat de foto's die ik heb laten zien gemaakt zijn nadat de laserbundel weer uitgeschakeld is. Als de laserbundel inderdaad een gat in de vloeistof geboord had, dan zou dit gat na uitschakeling van de laser zich snel weer met vloeistof hebben opgevuld en dat is duidelijk niet wat de experimenten laten zien. Desalniettemin, moet ik toegeven dat een hard bewijs mooier zou zijn. Gelukkig is dat inderdaad voorhanden.

Snelheidsprofiel van een wervel (JILA)



De precieze manier waarop de snelheidsmeting in de praktijk wordt uitgevoerd is iets te gecompliceert om hier uit de doeken te doen, maar voor mijn doel is gelukkig alleen het resultaat van belang. Dat is linksonder weergegeven in de kleurenfiguur. U ziet hier met kleuren aangegeven de snelheid van de quantumvloeistof rondom de kern van de wervel, zoals u die ziet als u van de zijkant tegen de sigaarvormige druppel aankijkt. Rood betekent dat de vloeistof recht op u af komt, en blauw dat deze zich recht van u af beweegt. Als u nu voor elke positie op een cirkel om de kern van de wervel de kleur aangeeft met een getal tussen -1 en 1, blauw is hierbij -1 en rood is 1, dan resulteert dat in de grafiek die naast de kleurenfiguur is weergegeven. U ziet dat het resultaat van deze procedure een sinusvormige curve is, en dat is in volledige overeenstemming met de theoretische voorspelling van het snelheidsprofiel van een gequantiseerde wervel. Hiermee hoop ik dan ook mijn kritische luisteraar overtuigd te hebben van de juistheid van mijn bewering dat we echt met wervels te maken hebben.

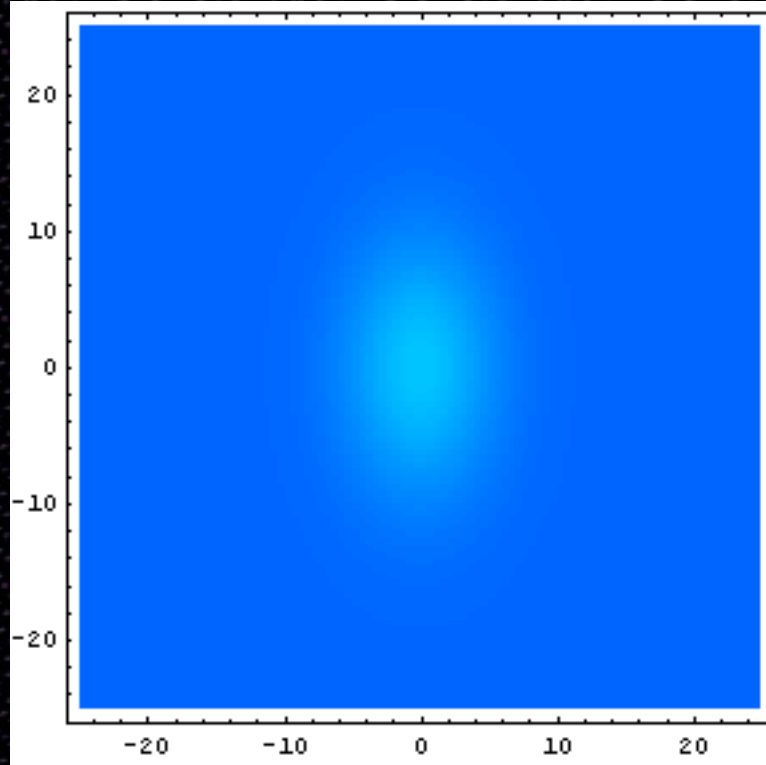
De laatste dialoog is natuurlijk fictief, maar geeft, denk ik, toch een aardig beeld van hoe fysici te werk gaan. Aan de ene kant voeren we experimenten uit, en aan de andere kant formuleren we theorieën die deze experimenten moeten verklaren. In het geval dat er meerdere verklaringen mogelijk zijn, proberen we te achterhalen waarin de theorieën verschillen en een nieuw experiment, dat precies naar deze verschillen kijkt, zal dan uitsluitsel moeten geven over welke verklaring correct is. Natuurlijk gebeurt het ook dat het nieuwe experiment laat zien dat alle mogelijke verklaringen

onjuist zijn. Dat is in zekere zin het beste wat ons kan overkomen, want dat betekent dat we echt iets fundamenteel nieuws op het spoor zijn. Dit is bijvoorbeeld de manier hoe de meest succesvolle theorie van dit moment, dat wil zeggen de quantummechanica, ontdekt is. In dit samenspel tussen theorie en experiment speelt theorievorming in mijn ogen een belangrijke rol, want het leidt niet alleen tot een verklaring van het experiment, maar schept ook een kader waarin het mogelijk is om nieuwe vragen te stellen die uiteindelijk zullen leiden tot een beter begrip van het onderwerp van studie. Bovendien is het zo dat de hedendaagse experimentele technieken meestal zo geavanceerd zijn, dat het haast onmogelijk is om zonder een terdege theoretische kennis van zaken de gewenste, vaak zeer subtiele, informatie aan het experiment te onttrekken.

Op dit punt aangekomen is het misschien goed op te merken dat de moderne theoretische fysica niet bestaat uit een willekeurig samenraapsel van verschillende onsamenhangende methoden, maar in feite een universele manier biedt om tegen de natuur en zijn werking aan te kijken. In essentie dezelfde methoden van de theoretische fysica worden dan ook toegepast van de allerhoogste energieën op de Planckschaal en de oerknal aan het begin van het heelal, tot aan de allerlaagste energieën en temperaturen dicht bij het absolute nulpunt. Een mooi voorbeeld van deze unificatie vormt de ineenstorting van een Einsteingecondenseerde vloeistof, die een grote analogie vertoont met de ineenstorting van zware objecten in het heelal, zoals bijvoorbeeld witte dwergen die ineenstorten tot neutronensterren en neutronensterren die op hun beurt ineenstorten tot zwarte gaten.

De eerste experimenten met ineenstortende quantumvloeistoffen zijn uitgevoerd door de groep van Randy Hulet op de Rice University in de Verenigde Staten. Voor deze experimenten maakt men gebruik van een gas van lithiumatomen. De reden hiervoor is dat lithiumatomen elkaar aantrekken, in tegenstelling tot de eerder genoemde rubidium- en natriumatomen, die elkaar juist afstoten. Het is deze aantrekkende interactie tussen twee lithiumatomen die er voor zorgt dat een druppel van deze quantumvloeistof ineen zal storten als het aantal atomen dat zich in de druppel bevindt te groot wordt. Voor de experimenten van Randy Hulet gebeurt dat als het aantal lithiumatomen in de druppel groter is dan 1250. Dit is te vergelijken met de situatie voor witte dwergen en neutronensterren, die ineenstorten onder hun eigen zwaartekracht als hun totale gewicht te groot is. Zijn de interacties tussen de atomen afstotend, dan bestaat er geen maximum aan het aantal atomen dat de vloeistofdruppel kan bevatten. In de hiervoor besproken experimenten hadden we dan ook altijd te maken met druppels bestaande uit tienduizend tot een miljoen atomen. We zien dus dat er een fundamenteel verschil bestaat tussen de eigenschappen van een quantumvloeistof met aantrekkende dan wel afstotende interacties tussen de atomen. Dit fundamentele verschil werd, met enige trots kan ik zeggen mede door mijzelf, voor het eerst opgemerkt door een theoretische analyse van een gas bestaande uit lithiumatomen en werd vervolgens ook experimenteel door de groep van Randy Hulet bevestigd.

Bosenova (UU)



Op het moment is het belangrijkste onderwerp van onderzoek in dit verband de precieze manier waarop de ineenstorting van de quantumvloeistof in de tijd plaatsvindt. In een woordspeling op de naam supernova, die in de astrofysica gebruikt wordt voor de ineenstorting van bepaalde sterren, wordt dit nu in deze context een Bosenova genoemd, naar de Indiase fysicus Satyendranath Bose, die met zijn artikel over lichtdeeltjes Einstein inspireerde tot de ontdekking van de Einsteincondensatie. In de nu volgende film ziet u een theoretische visualisatie van een Bosenova, die overigens bijzonder goed overeenstemt met de voorlopige experimentele gegevens die deze zomer op een conferentie in het Lorentz Centrum aan de Universiteit Leiden vrij zijn gegeven. Ze zijn helaas echter nog niet gepubliceerd, en u zult mij wat dat betreft daarom op mijn woord moeten geloven. Ik hoop dat de beelden nu voor zich spreken, maar misschien ten overvloede vermeld ik dat voor deze film groen betekent dat er op die positie veel atomen aanwezig zijn, terwijl blauw betekent dat er zich daar helemaal geen atomen bevinden. Wat u wellicht iets minder goed aan deze visualisatie ziet is dat, naast de heftige oscillaties van de druppel, er gedurende de ineenstorting ook voortdurend atomen uit de druppel geslingerd worden, zodat aan het eind van het hele proces slechts een kwart van het oorspronkelijke aantal atomen over is gebleven. Luisteraars vertrouwd met astrofysica zal dit inderdaad sterk aan een supernova doen denken.

Gerard 't Hooft (1946)

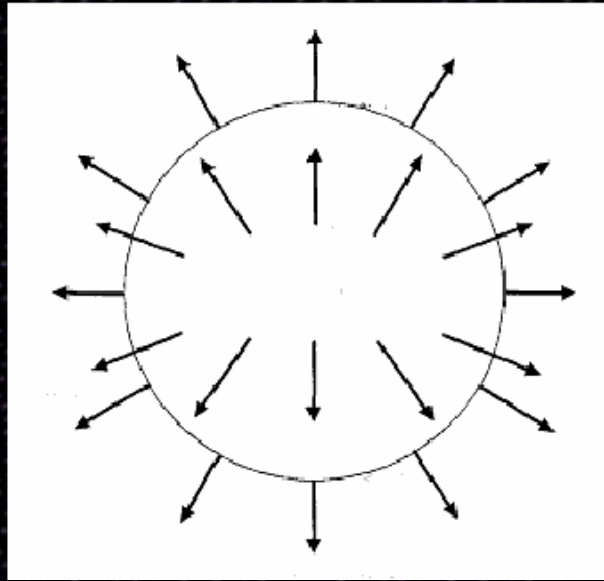


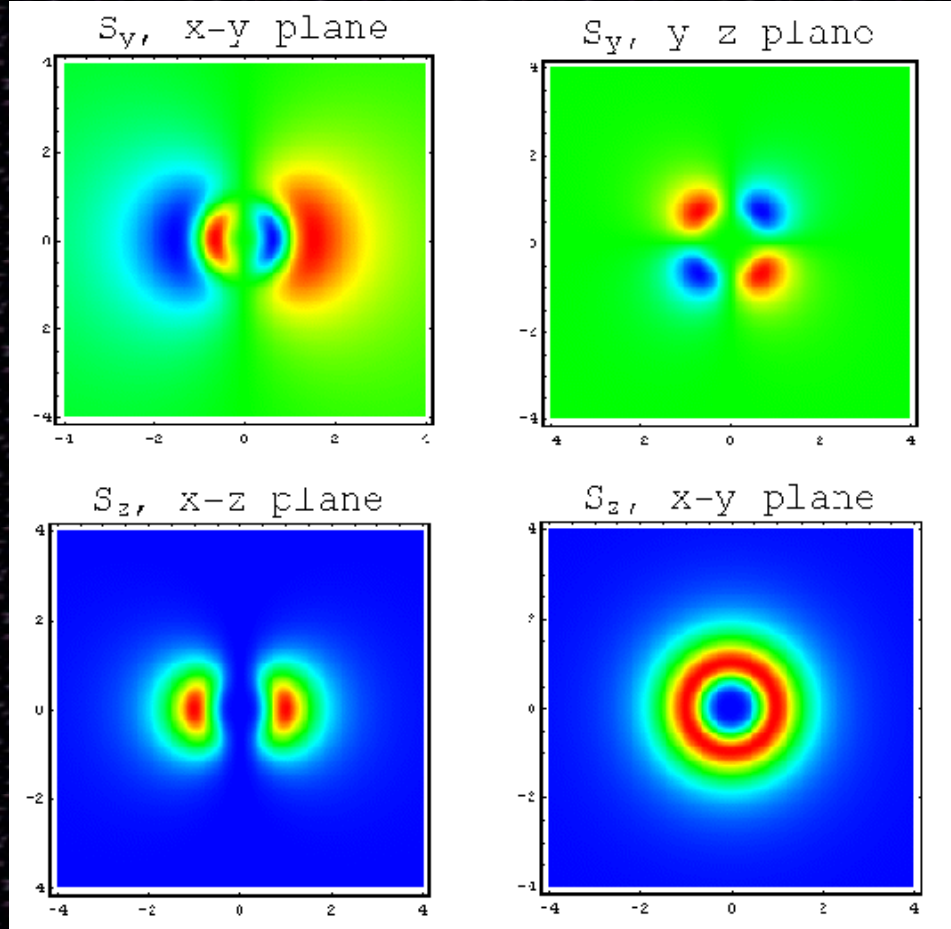
Ik ben mijn betoog begonnen met het noemen van een aantal Nobelprijslaureaten die van groot belang zijn geweest voor de theoretische fysica. Ik kan daarom hier natuurlijk niet voorbij gaan aan het feit dat Gerard 't Hooft, gezamenlijk met zijn promotor Tini Veltman, vorig jaar eveneens die eer te beurt viel. Die heugelijke gebeurtenis is hier nogmaals te zien. Ik prijs mij zeer gelukkig om nu officieel een collega van Gerard te zijn, alhoewel dit natuurlijk ook het gevaar met zich meebrengt dat van je verwacht wordt om tot zijn niveau te stijgen. Dat is natuurlijk onmogelijk, maar ik zie het wel als mijn taak om, samen met de binnen een maand na mijn benoemde hoogleraar Philip Stamp, te proberen de theorie van de gecondenseerde materie in Utrecht dezelfde status in Nederland en in de rest van de wereld te geven als die van de hoge-energie fysica en de statistische fysica in Utrecht.

Afgezien van de uitreiking van de Nobelprijs, die wat mij betreft, mede door mijn persoonlijke aanwezigheid in Stockholm, tot de belangrijkste gebeurtenis van 1999 is uitgegroeid, is het vermelden van Gerard 't Hooft ook zeer toepasselijk in verband met mijn opmerking dat de moderne theoretische fysica een sterk interdisciplinair karakter heeft. In doel hier in het bijzonder op de magnetische monopool, die mede door hem ontdekt is in bepaalde quantummechanische theorieën voor het gedrag van elementaire deeltjes zoals quarks, electronen en neutrino's. Aan de hierboven geprojecteerde schematische visualisatie van deze monopool kunt u zien waarom deze wel enigzins

liefkozend 'de egel' genoemd wordt. Zeer recentelijk hebben wij ons gerealiseerd dat dergelijke monopolen ook een rol spelen bij Einsteingecondenseerde vloeistoffen van ruidium- en natriumatomen. Het idee hierbij is dat we niet moeten vergeten dat deze atomen in feite ook kleine magneetnaaldjes zijn. Deze magneetnaaldjes kunnen in principe een willekeurige richting hebben en daardoor is het mogelijk om met deze magneetnaaldjes een configuratie in de ruimte te maken die vanuit een wiskundig optiek identiek is aan de orientatie van de stekels van de 't Hooft-Polyakov egel.

't Hooft-Polyakov monopool





Zoals u hier met enige moeite kunt zien, ziet in detail de ruimtelijke structuur van de magneetnaaldjes er ruwweg uit als een opgeblazen fietsband. Ver verwijderd van de fietsband zijn alle magneetnaaldjes altijd omhoog gericht, dat wil zeggen loodrecht op een vlak door de fietsband. Gaan we echter dichterbij de fietsband toe dan draaien de magneetnaaldjes geleidelijk op een dussdanige manier dat op het oppervlak van de fietsband de magneetnaaldjes precies bovenop het oppervlak liggen. Gaan we in het binnenste van de fietsband zelf, dan draaien de magneetnaaldjes nog geleidelijk verder tot uiteindelijk alle magneetnaaldjes midden in de fietband naar beneden gericht zijn. Het leven van deze egels, door kernfysici ook wel skyrmionen genoemd, is ronduit verbazingwekkend. Ze komen volwassen ter wereld en nemen gedurende hun gehele leven in omvang af. Ze zijn op zich vrij om zich te verplaatsen, maar worden door hun baas Heisenberg wel gedwongen om voortdurend pirouettes te maken. Komen ze tijdens een wandeling een andere egel tegen dan zullen ze in eerste instantie altijd van schrik achteruitdeinzen. Alleen als de stekels van de twee egels op precies de juiste manier in elkaar passen is een toenadering tussen beide egels mogelijk. Al met al zijn er dus voldoende redenen om deze interessante wezens aan een nader onderzoek te onderwerpen. Er is op dit moment slechts één klein probleempje. Hoe kunnen we ze in de kunstmatige omgeving van het laboratorium geboren laten worden?

Dames en Heren, hiermee ben ik bijna aan het eind van mijn betoog gekomen, waarin ik u een beeld heb willen schetsen van de laatste ontwikkelingen en van mogelijke toekomstige ontwikkelingen op het vakgebied van de quantumvloeistoffen. Tot slot wil ik echter nog enigen in het bijzonder

vermelden.

Ik dank het College van Bestuur van de Universiteit Utrecht en het Bestuur van de faculteit Natuur- en Sterrenkunde voor het in mij gestelde vertrouwen. Ik ben u zeer erkentelijk voor het door u gevoerde tweesporenbeleid, dat voor mij de mogelijkheid geschapen heeft om dit ambt te aanvaarden. Ik ben van mening dat het instellen van deze leerstoel een duidelijk signaal is voor het belang dat u hecht aan de theorie van de gecondenseerde materie. Ik beschouw dit als een belangrijke opdracht en als een steun in mijn rug.

Waarde collega's van het Instituut voor Theoretische Fysica. Ik kan nauwelijks met woorden uitdrukken hoe belangrijk het voor mij is geweest toen u mij, nu al weer zeven jaar geleden, in de donkerste periode van mijn carrière in uw midden opnam. Ik ben u daar nog steeds erg dankbaar voor. Door uw steun in raad en daad bent u een belangrijke factor geweest voor het totstandkomen van deze dag. Zonder iemand tekort te willen doen, wil ik hier met name Matthieu Ernst en Bernard de Wit noemen, waarvan ik weet dat zij zich in het bijzonder ingespannen hebben voor het succes van vandaag. Zoals ik al eerder aangaf heeft de theoretische fysica in Utrecht een roemrijke traditie. Ik ben zeer vereerd daar nu deel van uit te maken en hoop aan deze traditie geen afbreuk te zullen doen.

Waarde collega's van het Debye Instituut, in het bijzonder Peter van der Straten en Jaap Dijkhuis. Ik heb al duidelijk gemaakt hoe belangrijk ik de wisselwerking tussen theorie en experiment vind. Ik hoop dat onze samenwerking in de toekomst even plezierig zal zijn als hij nu al is, en was.

Dames en Heren studenten. Als u uit het voorafgaande alleen maar meeneemt dat ik fysica het schitterendste vak vind dat er bestaat, dan zal ik mijn voordracht als geslaagd beschouwen. Ik hoop dat ik in de toekomst ook op andere manieren mijn enthousiasme voor en kennis van de fysica aan u zal kunnen overdragen, bijvoorbeeld via mijn functie als studieadviseur, of via het nieuwe internationale masterprogramma theoretische fysica dat zojuist van start is gegaan. Mijn deur zal in ieder geval voor u open staan.

Beste familie, vrienden en kennissen. Vele mensen hebben me al vele jaren lang op het persoonlijke vlak geholpen met hun steun, belangstelling en vriendschap. Het zou teveel tijd nemen ze allemaal hier te noemen. Ik wil slechts drie uitzonderingen maken. Allereerst mijn ouders. Ik ben bijzonder blij dat zij deze dag nog in goede gezondheid mogen meemaken en met hun eigen ogen kunnen aanschouwen wat zij teweeg hebben gebracht. Ik hoop dat ze niet teleurgesteld zijn, met een zoon die zich bezig houdt met onbegrijpelijke zaken en daar nog plezier aan beleeft ook. Tenslotte Jolanda. Zonder haar was dit alles ook niet mogelijk geweest.

Ik dank u allen voor uw aandacht.

Hora Est

Met dank aan
Rembert Duine,
Usama Al Khawaja,
en Theo Stoof