

# Inhomogene supervloeistoffen

**Als de dichtheid van een stof niet afhangt van de plaats, maar overal gelijk aan een constante is, dan is die stof homogeen. Vloeistoffen zijn homogeen. Na een faseovergang naar een vaste stof is de dichtheid niet meer overal gelijk. Deeltjes zitten dan namelijk geordend in een kristalstructuur en de dichtheid is nu een functie van positie. In ons onderzoek bekijken we een bijzondere vloeistof, namelijk een supervloeistof. Wij voorspellen dat er gevallen zijn waarin de dichtheid in deze supervloeistof van de plaats afhangt en de supervloeistof dus niet homogeen, maar inhomogeen is.**

Jildou Baarsma

108

## Ultrakoud

Een ijl gas van atomen kan gevangen worden in een magneetveld en vervolgens met lasers afgekoeld worden. De fotonen afkomstig van de lasers hebben een impulsmoment en dragen dit bij een botsing over aan het atoom. Als een foton en een atoom in tegengestelde richting bewegen, wordt het atoom door de botsing een klein beetje afgeremd. Door met heel veel fotonen van verschillende kanten tegen het gas van atomen te botsen, worden de atomen bijna tot stilstand afgeremd en hierdoor koelt het gas af. Met laserkoeling kan een gas afgekoeld worden tot de microkelvinschaal. Dit is geen koud, maar een ultrakoud gas.

Bij deze temperaturen kan het gas nog verder afgekoeld worden door de magnetische val minder diep te maken. De atomen met de meeste energie, de heetste atomen, ontsnappen dan uit de val en de rest van het gas koelt daardoor verder af. Dit koelingsmechanisme heet verdampingskoelen en heeft veel weg van het afkoelen van een kop koffie door erop te blazen. De heetste koffiemoleculen blaas je weg, waardoor de rest van de koffie afkoelt. Met verdampingskoelen kunnen tem-

peraturen in het nanokelvinregime bereikt worden.

In dit regime kan er een faseovergang plaatsvinden van een klassiek gas naar een quantummechanische fase, een zogenaamde supervloeistof. Dit is een fase waarin alle atomen zich in dezelfde quantummechanische toestand bevinden en wrijving tussen de atomen volledig afwezig is.

## Supervloeistof

Als de atomen bosonisch zijn, oftewel als de spin van de atomen een geheel getal is, dan kunnen meerdere atomen dezelfde quantumtoestand aannemen. Het is zelfs zo dat als een aantal bosonen al een bepaalde quantumtoestand heeft, het waarschijnlijk is dat er meer bosonen die toestand aannemen. Dit quantummechanische effect heet Boseversterking. Bij het afkoelen van een Bosegas gaan steeds meer atomen in de grondtoestand zitten. Als een eindige fractie van de atomen in de grondtoestand is, ontstaat er een supervloeistof. Die atomen in de grondtoestand vormen een Bose-Einsteincondensaat.

Als de atomen fermionisch zijn, oftewel als de atomen een halfal-

lige spin hebben, dan kan er slechts één atoom een bepaalde quantumtoestand aannemen. Dit effect heet Fermiblokkering. Fermionen kunnen niet, zoals de bosonen, allemaal dezelfde toestand aannemen. Hierdoor kan er in een Fermigas niet zomaar een faseovergang naar een supervloeistof plaatsvinden. Echter, als er een aantrekkende kracht is tussen de fermionen, hoe klein ook, dan kunnen twee fermionen een zogenaamd Cooperpaar vormen. Cooperparen zijn een soort bosonen en kunnen wel allemaal dezelfde quantumtoestand aannemen en een supervloeistof vormen.

Een gevolg van de Fermiblokkering

Jildou Baarsma (1986) studeerde theoretische natuurkunde in Utrecht en rondde haar studie daar in 2009 af. Sindsdien doet zij in de groep van Henk Stoof aan de Universiteit Utrecht promotieonderzoek naar faseovergangen in Fermimengsels en in het bijzonder naar de supervloeistoffen die dan kunnen ontstaan.



J.E.Baarsma@uu.nl

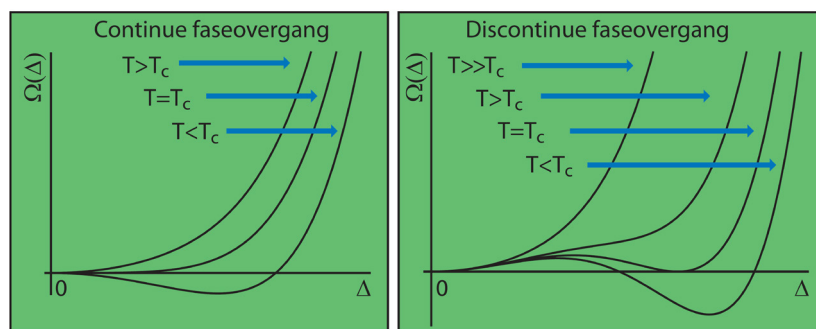
is dat een golf functie die twee identieke fermionen beschrijft oneven is, wat betekent dat deze een minteken krijgt onder verwisseling van de deeltjes. Deze golf functie is een product van een baandeel, dat de beweging van de twee fermionen beschrijft, en een spintoestand, waarvan een van de twee oneven moet zijn. Als dit het baandeel is, hebben de twee fermionen een verschillende impuls. Een botsing kan dan alleen plaatsvinden als de twee fermionen genoeg energie hebben om de centrifugale barrière over te komen die door het verschil in impuls ontstaat. Door deze barrière vinden er bij lage temperatuur vrijwel geen interacties plaats tussen fermionen met een oneven baandeel en een Cooperpaar van identieke deeltjes bestaat daardoor uit twee fermionen met dezelfde impuls, maar verschillende spintoestanden.

## Supergeleiding

Toen Heike Kamerlingh Onnes voor het eerst supergeleiding waarnam in 1911, nam hij ook als eerste, zonder dat hij het wist, een supervloeistof van Cooperparen waar. Hij had namelijk een supervloeistof van elektronen gecreëerd. Elektronen hebben halftallige spin en zijn dus fermionen. Bij zeer lage temperatuur vormen twee elektronen een Cooperpaar en ontstaat er een supervloeistof van elektronen. De supervloeistof kan wrijvingloos bewegen en dit is wat Kamerlingh Onnes heeft gemeten: bij een bepaalde temperatuur, de kritische temperatuur genoemd, verdwijnt de weerstand van een metaal volledig. Er kan in dat geval veel stroom door het metaal gestuurd worden, zonder dat het metaal opwarmt, vandaar de naam supergeleider.

De supergeleider kent al menig toepassing. Doordat supergeleiders grote stromen kunnen vervoeren, kunnen er grote magneetvelden mee opgewekt worden. Dit wordt bijvoorbeeld gebruikt in de MRI-scanner. In de scanner bevinden zich grote spoelen die met vloeibaar helium worden afgekoeld tot beneden de kritische temperatuur, zodat de spoelen supergeleidend worden. De grote magneetvelden die deze spoelen dan opwekken, worden gebruikt om een scan te maken.

Als er een materiaal zou bestaan dat supergeleidend is bij kamertempera-



**Figuur 1** De thermodynamische potentiaal  $\Omega$  als functie van het aantal Cooperparen  $\Delta$ , bij verschillende temperaturen. Een minimum bij nul betekent geen Cooperparen en geen supervloeistof, een minimum bij een eindig aantal Cooperparen betekent dat er een faseovergang naar een supervloeistof heeft plaatsgevonden. In de rechter figuur verschuift het minimum op een continue manier weg uit het nulpunt, terwijl er in de linker figuur een sprong is. In het geval van de rechter figuur treedt er fase-separatie op.

tuur zou het wereldenergieprobleem voor een groot deel opgelost zijn, doordat er dan bij energietransport veel minder energie verloren zou gaan. Het begrijpen van de overgang van losse fermionen naar een supervloeistof van Cooperparen kan helpen bij de ontwikkeling van een dergelijk materiaal. Het is echter lastig om dit fenomeen te bestuderen in een metaal, omdat de elektronen daar door een roosterstructuur bewegen. Atomen zijn goed te manipuleren in een experiment en bieden een uitstekende mogelijkheid om de supervloeistof te bestuderen.

## Ultrakoude atomen: ${}^6\text{Li}$ en ${}^{40}\text{K}$

In een experiment met een ultrakoud gas van fermionen, oftewel een Fermigas, kunnen veel aspecten van de faseovergang naar een supervloeistof onderzocht worden. Belangrijk is dat het effect van de interacties tussen de atomen op een faseovergang onderzocht kan worden. De interactie tussen atomen kan in een experiment namelijk gecontroleerd worden met een extern magneetveld. Bij een sterke aantrekkende interactie vormen de atomen eerder Cooperparen en daardoor is de kritische temperatuur relatief hoog, terwijl bij zwakke interacties de kritische temperatuur heel laag is.

Sinds een aantal jaren lukt het experimentatoren ook om verschillende soorten atomen in dezelfde val te vangen. Dit is een belangrijke stap richting een supervloeistof van niet-identieke fermionen. In ons onderzoek rekenen we de kritische temperaturen uit in een mengsel van  ${}^6\text{Li}$ -atomen en  ${}^{40}\text{K}$ -atomen. Dit mengsel is al wel eens gevangen in een magnetische val,

maar nog niet genoeg afgekoeld om een supervloeistof te zien.

In de experimenten met dit mengsel hebben alle  ${}^6\text{Li}$ -atomen dezelfde spintoestand, waardoor bij lage temperatuur er geen interacties tussen de  ${}^6\text{Li}$ -atomen zijn. Hetzelfde geldt voor de  ${}^{40}\text{K}$ -atomen. Er kunnen wel interacties plaatsvinden tussen de  ${}^6\text{Li}$ - en  ${}^{40}\text{K}$ -atomen, dat zijn immers geen identieke fermionen en de Fermiblokkering treedt niet op. Een  ${}^6\text{Li}$ -aatom en  ${}^{40}\text{K}$ -aatom kunnen samen dus een Cooperpaar vormen. Door het grote massaverschil tussen de atomen,  ${}^{40}\text{K}$  is ongeveer zeven keer zo zwaar als  ${}^6\text{Li}$ , is dit echter minder gemakkelijk dan bij gelijke massa's.

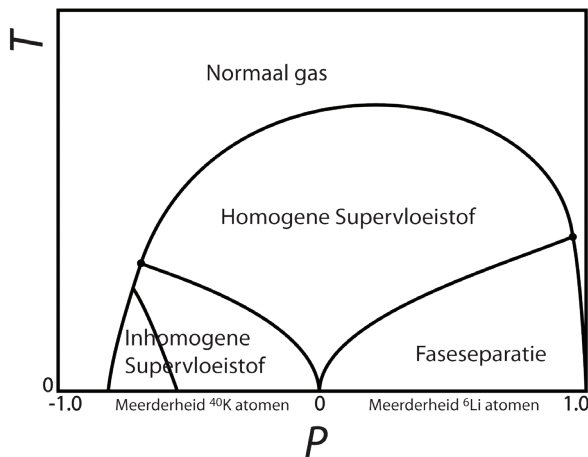
Juist dit massaverschil maakt dit een interessant systeem om te bestuderen. Fermionen met verschillende massa's komen namelijk ook in de natuur voor, zoals bijvoorbeeld in de kern van een neutronenster, die uit quarks bestaat. Door het mengsel van  ${}^6\text{Li}$ - en  ${}^{40}\text{K}$ -atomen te bestuderen, kunnen we ook meer over neutronsterren leren.

## Het fase-diagram

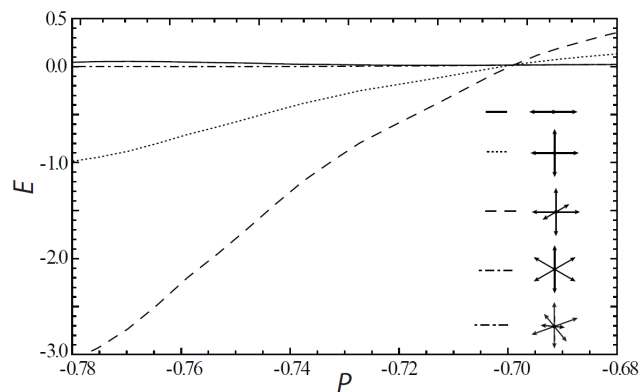
We hebben voor het mengsel van  ${}^6\text{Li}$  en  ${}^{40}\text{K}$  het complete fase-diagram uitgerekend. Dat wil zeggen dat we voor alle polarisaties de kritische temperatuur berekend hebben. De polarisatie  $P$  is het verschil in deeltjesaantallen gedeeld door het totale aantal deeltjes,

$$P = \frac{n_{\text{Li}} - n_{\text{K}}}{n_{\text{Li}} + n_{\text{K}}}$$

Bovendien hebben we bestudeerd wat voor supervloeistof de Cooperparen



**Figuur 2** Het fasediagram van het  ${}^6\text{Li}$ - ${}^{40}\text{K}$ -mengsel. Voor een meerderheid van  ${}^6\text{Li}$ -atomen treedt er faseseparatie op, terwijl er een continue overgang naar een inhomogene supervloeistof plaatsvindt voor een meerderheid van  ${}^{40}\text{K}$ -atomen. Er treden twee verschillende inhomogene fasen op.



**Figuur 3** De energie  $E$  van het  ${}^6\text{Li}$ - ${}^{40}\text{K}$ -mengsel langs de lijn van faseovergangen. Bij de grootste polarisatie waar een inhomogene supervloeistof optreedt, is een dichtheidsconfiguratie met een periodiciteit in één richting het gunstigst (doorgetrokken lijn). Voor kleinere polarisaties is het gunstiger om in drie richtingen een periodiciteit te hebben (gestreepte lijn). Andere roosterconfiguraties geven nooit de laagste energie (gestippelde en gestreept-gestippelde lijnen).

in dit mengsel vormen en of er door het massaverschil ook meer exotische quantumfasen ontstaan.

Om het fasediagram uit te rekenen, bepalen we de thermodynamische potentiaal  $\Omega$  van dit mengsel van fermionen. Deze hangt af van de thermodynamische parameters van het systeem, zoals de temperatuur en de polarisatie. Bovendien is de thermodynamische potentiaal een functie van het aantal Cooperparen  $\Delta$ , zie figuur 1, waarbij de evenwichtstoestand van het systeem het minimum is. Als het minimum van de potentiaal bij nul Cooperparen ligt, is er geen supervloeistof, terwijl er een faseovergang heeft plaatsgevonden als dit minimum niet bij nul ligt. Het minimum kan op een continue of discontinue manier wegschuiven van nul. In het laatste geval treedt er een scheiding tussen twee fasen (faseseparatie) op. Als er evenveel  ${}^6\text{Li}$ - als  ${}^{40}\text{K}$ -atomen in de magnetische val zijn,  $P=0$ , dan kan elk atoom deel uitmaken van een Cooperpaar, zie figuur 2. De dichtheid van de supervloeistof is hier onafhankelijk van de plaats. De overgang naar deze homogene supervloeistof is continu. Als de polarisatie klein is, kunnen er nog steeds Cooperparen gevormd worden, maar blijven er wel atomen over.

Voor een grote meerderheid van  ${}^6\text{Li}$ -atomen is er een discontinue faseovergang naar een homogene supervloeistof. In het experiment zal op dat

moment faseseparatie optreden. In het diepste gedeelte van de val bestaat een homogene supervloeistof met evenveel  ${}^6\text{Li}$ - als  ${}^{40}\text{K}$ -atomen, terwijl er zich aan de rand van de val een gas van  ${}^6\text{Li}$ -atomen bevindt. Faseseparatie is niet ongewoon bij faseovergangen, het treedt bijvoorbeeld ook op bij het koken van water.

### Inhomogene supervloeistoffen

Het interessantste gebied in het fasediagram is bij een meerderheid van  ${}^{40}\text{K}$ -atomen. We vinden dan een continue faseovergang naar een inhomogene supervloeistof. In deze exotische fase hangt de dichtheid van Cooperparen van de positie af. De dichtheid kan echter op vele manieren plaatsafhankelijk zijn en elke dichtheidsconfiguratie levert een andere thermodynamische potentiaal op. Deze hebben wij voor allerlei configuraties uitgerekend en vervolgens hebben we het minimum bepaald, wat de energie van de supervloeistof geeft. De dichtheidsconfiguratie die in werkelijkheid op zal treden, is die met de laagste energie, zie figuur 3.

Wij hebben gevonden dat het mengsel van  ${}^6\text{Li}$  en  ${}^{40}\text{K}$  twee verschillende dichtheidsconfiguraties kan vertonen. Allereerst treedt er een faseovergang op naar een inhomogene supervloeistof waarbij in twee ruimtelijke richtingen de dichtheid constant is, terwijl de dichtheid in de derde richting een staande golf is. De periodi-

citeit en de amplitude van de dichtheidsgolf hangen van de temperatuur en de polarisatie af. In dit geval is de supervloeistof homogeen in twee richtingen.

Voor kleinere polarisaties en lagere temperaturen is de supervloeistof inhomogeen in alle ruimtelijke richtingen en de dichtheid is een staande golf in alle drie de richtingen. De amplitudes en de periodiciteit van de dichtheid zijn in de drie richtingen gelijk. Deze fase heeft ook eigenschappen van een vaste stof, namelijk positie-afhankelijke dichtheden, maar het is geen vaste stof. Het is een inhomogene supervloeistof!

Dergelijke exotische fasen, een supervloeistof met een dichtheid die in drie richtingen een periodiciteit heeft, zijn nog nooit in een experiment waargenomen. Er is wel een fase met vergelijkbare eigenschappen in een eendimensionale val waargenomen, maar de dichtheidsvariaties zijn daar alleen indirect waargenomen. Het zou een grote doorbraak betekenen als de fasen die wij voorspellen worden waargenomen!