



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Superfluid helium-3 in cylindrical restricted geometries : a study with low-frequency NMR

Benningshof, O.W.B.

Citation

Benningshof, O. W. B. (2011, March 30). *Superfluid helium-3 in cylindrical restricted geometries : a study with low-frequency NMR*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/16677>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/16677>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Samenvatting

Superfluïde helium-3 in ingeperkte cilindrische geometrieën

Een studie met laagfrequent NMR

Een fascinerend effect van vloeibaar helium-3 is dat twee atomen samen een Cooper paar kunnen vormen. Dit gebeurt op macroscopische schaal, en verandert de vloeistof in een superfluïde. Superfluïditeit is analoog aan supergeleiding met het verschil dat de Cooper paren worden gevormd door twee helium-3 atomen i.p.v. elektronen. In het geval van type I supergeleiders valt er maar één symmetrie (Gauge symmetrie) te breken. Dit is anders in het geval van helium-3, waarvan de totale symmetrie veel rijker is. Deze symmetrieën kunnen op verschillende manieren worden gebroken, waarbij elke soort van symmetriebreking correspondeert met een superfluïde fase. Het verschil tussen de superfluïde fasen zit hem dus in de overgebleven symmetrieën van de vloeistof, waaruit de voorkeursoriëntaties van baan- en spin-impulsmoment bepaald kunnen worden.

In bulk helium-3 zonder magneetveld bestaan twee van deze superfluïde fasen, genaamd de A- en de B-fase. Het aanleggen van een magneetveld induceert een voorkeursoriëntatie voor het spin-impulsmoment (komt overeen met breken van de rotatie-symmetrie), waardoor nog eens drie andere superfluïde fasen gevonden worden. Een alternatief om de oriëntatie in de superfluïde te beïnvloeden is door de vloeistof op te sluiten in een container met een bepaalde vorm, omdat de wand van de container de oriëntatie van het baan-impulsmoment beïnvloedt.

Het reduceren van de afmetingen van de container in een bepaalde richting tot de afmeting van het Cooper paar zal de superfluïde eigenschappen in die richting onderdrukken, en omdat dit ook gepaard gaat met het breken van een symmetrie zal men daar een nieuwe superfluïde fase verwachten.

Dit proefschrift betreft het onderzoek naar deze oriëntatie-voorkeuren en superfluïde fasen ingeperkt in cilindrische geometrieën in combinatie met een magneetveld. Twee verschillende cilindrische cellen zijn gemaakt, waarvan de as parallel loopt met het aangelegde magneetveld. De eerste cel heeft een diameter van 540 nm, wat

overeenkomt met enkele keren de afmeting van een Cooper paar. We hoopten hier een nieuwe superfluïde fase te vinden: de zogenaamde polaire fase. De tweede cel heeft een diameter van 1 mm; dit is een ideale geometrie om een geschikte potentiaal te creëren (in de B-fase) voor spingolven.

Om de superfluïde fasen en spingolven te meten hebben we gebruik gemaakt van kernspinresonantie, oftewel NMR (Nuclear Magnetic Resonance) technieken. De superfluïde fasen hebben een anisotropische susceptibiliteit, waardoor NMR een uitstekende manier is om de verschillende fasen te kunnen onderscheiden. Echter, onze cellen hebben een uiterst klein volume, en het gebruikte magneetveld is zeer zwak om extra symmetrie breking te voorkomen, en dus was het noodzakelijk om een uiterst gevoelige sensor te ontwikkelen, om het NMR signaal boven de ruis te krijgen.

Hoofdstuk 1 beschrijft de algemene eigenschappen van vloeibaar helium-3 en superfluïditeit. In het bijzonder zijn de eigenschappen van de superfluïde B-fase en de B₂-fase (met magnetisch veld) uitgelicht, waarbij de voorkeursoriëntaties en typische buig lengtes van de orde parameter in detail beschreven worden. Deze achtergrond informatie is noodzakelijk om de experimenten betreffende dit proefschrift te kunnen beschrijven en begrijpen.

Hoofdstuk 2 introduceert de gebruikte cellen (preparaathouders) samen met de experimentele opstelling. De experimentele cel is met zorg ontworpen, en kan (in principe) de experimenten met de twee verschillende diameters (540 nm en 1 mm) tegelijk uitvoeren. Deze cellen zijn gepositioneerd in een solenoïde magneet, die het statische magneetveld voor de NMR experimenten opwekt. De homogeniteit van deze solenoïde magneet is zo hoog mogelijk ontworpen, omdat dit van grote invloed is op de signaal-ruisverhouding voor de helium-3 NMR experimenten.

Ook wordt in dit hoofdstuk beschreven hoe de uiterst gevoelige detector is ontworpen, gesimuleerd en gebouwd. Door een LC-circuit te combineren met een zwak gekoppelde transformator kon een ultra hoge kwaliteitsfactor van het circuit worden behouden ondanks de noodzakelijke lange coaxiale draadverbinding van kamertemperatuur naar het centrum van de cryostaat, dat een temperatuur heeft onder één milliKelvin. Na zorgvuldige optimalisatie kon uiteindelijk een signaal van een micromol helium-3 worden uitgelezen in een zeer zwak magneetveld ($B_0 = 15$ mT).

Temperatuur-, magneetveldenveranderingen en drift effecten zorgden voor een verschuiving van de resonantie frequentie van het LC-circuit, waardoor de gevoeligheid van de detectie afneemt. Om voor deze effecten te compenseren is er een terugkoppelingsroutine geschreven die de gevoeligheid voor langere perioden kon behouden. De operatie en de resultaten van de simulaties van onze aanpak staan ook in dit hoofdstuk beschreven.

Hoofdstuk 3 concentreert zich op de experimenten die uitgevoerd zijn in een lange cilindrische container met een diameter van 1 mm. Speciaal aan deze afmeting is dat de voorkeursoriëntaties van de orde parameter van de B-fase lokaal verschillend zijn, en als geheel gebogen zijn over de cel. Dit verschijnsel noemen we een textuur.

Doordat ons experiment is uitgevoerd bij lage drukken en magneetvelden treedt de bijzondere situatie op dat we een metastabiele textuur kunnen maken, die onveranderd blijft bij verandering van temperatuur en druk. Een dergelijke textuur fungeert ook als potentiaal voor spingolven, en doordat deze bepaald wordt door de geometrie en magneetveld hebben we de unieke gelegenheid de spingolven te bestuderen in (nagenoeg) dezelfde potentiaal bij verschillende drukken en temperaturen. De potentiaal laat zich in goede benadering beschrijven als een kwadratische potentiaal, en doordat het systeem in essentie twee dimensionaal is, hebben alle modes min of meer dezelfde intensiteit. Dit alles gaf ons de perfecte condities om het aantal spingolf modes te zien groeien bij toenemende druk.

Uiteindelijk weten we ook de overgang te maken naar de bij voorbaat verwachte (op energetische gronden) stabiele textuur. Hieruit hebben we geconcludeerd, dat de metastabiele textuur gerealiseerd wordt als het langzaam genoeg kan groeien.

Hoofdstuk 4. In dit hoofdstuk staan de metingen in en rond een bundel van photonic crystal fibers (fotonische kristal vezels) centraal. In deze fibers zitten cilindrische kanaaltjes die een diameter hebben van ongeveer 540 nm. Het hoofdstuk start dan ook met de beschrijving van de verwachte superfluïde fasen in zulke geometrieën. Daarnaast staat beschreven hoe deze fasen het NMR spectrum kunnen of zullen beïnvloeden.

De ruwheid van de wand in deze kanaaltjes is belangrijk, doordat de correlatie en de amplitude van de oppervlakte-ruwheid bepaalt hoe de quasi-deeltjes zich zullen verstrooien. Dit heeft grote invloed op de stabiliteit van de verwachte superfluïde fasen, waardoor ruwheidsmetingen aan de wand van deze kanaaltjes wenselijk waren. Speciale technieken zijn ontworpen om deze kanaaltjes open te breken, zodat we de primeur hebben in het uitvoeren van atoomkrachtmicroscopie aan de binnenkant van een dergelijk kanaaltje.

Het vervolg van dit hoofdstuk gaat over de NMR experimenten aan helium-3, dat de nanokanaaltjes vult van een bundel van ongeveer 200 optische fibers, met elk 324 kanaaltjes. Het eerste stuk beschrijft de NMR metingen van de vloeistof in de kanaaltjes. Het resultaat van deze metingen is dat niet kan worden uitgesloten of er een superfluïde fase is gevormd binnen het kanaaltje. Door het kennelijk afwezig zijn van de (verwongen) B-fase ontbreekt een natuurlijk calibratie punt van het verwachte fasediagram. Hierdoor kunnen alleen bepaalde onderwaarden worden vastgelegd (voor deze geometrie in het bijzonder). Dit gedeelte eindigt dan ook met een voorstel: Hoe de configuratie van de cel aangepast dient te worden om de verwachte fasen, in het bijzonder de polaire fase, te kunnen meten.

Het tweede gedeelte beschrijft de NMR metingen van ongesloten ruimtes tussen de fibers. Aanvankelijk hadden deze ruimtes gesloten moeten zijn met epoxy, en ondanks dat ze niet gepland zijn, blijken ze de goede afmeting te hebben om de invloed van het geadsorbeerde helium-3 aan de wand op de B-fase te bestuderen. De totale hoeveelheid atomen in de vaste fase (geadsorbeerd helium-3 aan de wand) is in zijn totaliteit wel een stuk minder dan de hoeveelheid atomen in de vloeistof (ongeveer een promille), maar de totale magnetisatie (bij milliKelvin temperaturen) zijn van

beide nagenoeg gelijk. Hierdoor is de invloed van de vaste stof op het NMR signaal van de vloeistof duidelijk zichtbaar. Een model, normaal gesproken gebruikt om deze invloed te vertalen naar NMR verschuivingen voor cellen gevuld met helium-3 ingebed in poreus materiaal (bijvoorbeeld aerogel), is nu getest voor onze geometrieën. Dit model, geconstrueerd in the limiet van snelle uitwisseling tussen de vaste en vloeibare atomen, geeft een verklaring voor de observatie van slechts één NMR piek. Al is er in ons geval een duidelijk ruimtelijke scheiding tussen de vaste en vloeibare atomen, in tegenstelling de situatie met helium-3 in poreus materiaal, verklaart dit model zeer goed de geringe verschuiving van de resonantielijin in het NMR spectrum.

Hoofdstuk 5. Hier wordt een elektromagnetisch bediende kraan voor lage temperaturen gepresenteerd, die gesloten is wanneer er *geen* elektrisch stroomtoevoer is. Deze kraan is bedoeld voor de regeling van de toevoer van vloeibaar helium vanuit het 4.2 K hoofdreservoir (helium bad) naar de 1K pot. Het blijkt dat het ontwerp zo goed is, dat de kraan zelfs (superfluïde) lekdicht is, en dus ook zal kunnen worden ingezet om (meet) cellen af te sluiten. De kraan is zo ontworpen dat vervorming van de kunststofzitting door de robijnkogel geminimaliseerd wordt, waardoor hij duurzaam is en intensief gebruikt kan worden.