

F7

Lågtemperaturfysik

Maria EKSTRÖM

Januari 2016 - Andra utgåvan

Syfte

Målet är att använda lågtemperaturfysik för studera hur den elektriska ledningsförmågan hos olika typer av material ändras med temperatur. Du kommer att få fyra prover av olika material att kyla ner och mäta resistansen som funktion av temperatur. Supraledning kommer att demonstreras. Dessutom kommer du att få se egenskaper hos superflytande helium.

Förberedelser

Innan laborationen är det viktigt att du läser detta labb-pm samt svarar på de förberedande frågorna.

1. Hur kan vi kyla prover under 100 K?
2. Hur kan vi kyla flytande helium lägre än dess kokpunkt?
3. Hur ser fasdiagrammet ut för helium?
4. Varför kallas fasomvandlingen av helium λ -punkten?
5. Hur beror olika materials elektroniska ledningsförmåga på temperaturen?

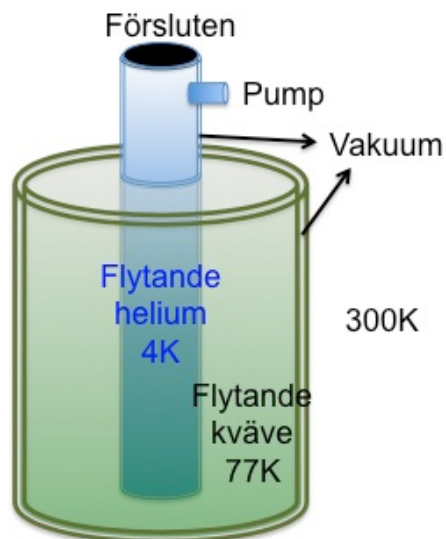
Namn:	Kurs:
CID:	Handledare:
Datum:	Signatur:

Första utgåvan: Nov 2014 av Maria Ekström på MC2, Chalmers Tekniska Högskola
Andra utgåvan: Jan 2016 av Maria Ekström på MC2, Chalmers Tekniska Högskola

1 Lågtemperaturteknik

En kryostat är i enkla termer en avancerad termos, designad för att behålla väldigt låga temperaturer. För att kyla ner från rumstemperatur använder vi först flytande kväve, som har en kokpunkt på 77 K. När vi fyller kryostaten med kväve, tillförs energi i form av värme till det flytande kvävet. Värmen omvandlas till ångbildningsvärme och därmed kvävgas. Kväve har högt ångbildningsvärme och kan därför omvandla mycket energi innan det kokar bort.

När vi vill kyla ner kryostaten under 77 K, använder vi flytande helium med en kokpunkt på 4.2 K (Figur 1). Helium har mycket lägre ångbildningsvärme och kokar bort mycket snabbt. Därför är det bra att förkyla med kväve samt nödvändigt att skärma och värmeisolera kryostaten. Av denna anledning har vi ett yttre kärl som vi fyller med flytande kväve och verkar som en barriär mellan rumstemperatur (300 K) och det flytande heliumet.



Figur 1: Flytande helium används i en kryostat för att kyla ner till 4.2 K. Om heliumet pumpas kan ännu lägre temperaturer nås. Det flytande kvävet fungerar som en barriär mot rumstemperaturen på utsidan kryostaten.

Mellan det flytande kvävet i yttrebehållaren och det flytande heliumet i innerbehållaren pumpar vi vakuüm för att minska värmeöverföringen från det varmare kvävet till heliumet. För att minska avkokningen av kvävet på grund av omgivningens temperatur omges kvävebehållaren också av vakuüm.

Om vi vill uppnå ännu lägre temperaturer än heliums kokpunkt krävs att vi sänker trycket i behållaren under atmosfärstryck. Då sjunker kokpunkten och vi kan kyla ytterligare genom att pumpa på heliumet.

1.1 Mäta låga temperaturer

Vid låga temperaturer går det inte längre att använda vanliga termometrar utan vi kan använda termoelement. Dessa består av två metalltrådar i olika material. De är isolerade från varandra och har varsin ände i innerbehållaren och i ytterbehållaren. Spänningsskillnaden mellan de olika metalltrådarna är känd som funktion av temperatur. Vi vet att kryostatens ytterbehållare är fylld med flytande kväve vilket har temperaturen 77 K. Därmed kan vi beräkna temperaturen enligt $T_{inner} = -67000 \frac{\mu V}{K} \times U + T_{ytter}$, där $T_{ytter} = 77$ K och -67000 är specifikt för det termoelement vi använder.

2 Elektrisk ledningsförmåga

Genom att skicka en ström genom vårt prov samtidigt som vi mäter spänningen kan vi beräkna resistansen enligt Ohms lag $V = RI$. Resistansen i kontaktorna och ledningarna till provet är vid rumstemperatur försumbara i jämförelse med provets resistans. Däremot minskar resistansen när vi kyler ner vissa prover. Då är kontakt- och ledningsresistansen inte längre försumbar. För att kunna mäta vid låga temperaturer används därför fyrpunktsmätningar. I en fyrpunktsmätning skickas strömmen genom två kontakter till provet och spänningen mäts genom två andra kontakter. På så sätt mäter vi enbart provets resistans.

Resistans R är resistivitet ρ per längdenhet ($R = \rho \frac{length}{Area}$). Resistiviteten kan delas upp i två delar som uppstår på grund av två olika fenomen. Den ena kommer från defekter i materialet och kallas den intrinsiska resistiviteten ρ_i . Den andra uppstår från fonon-elektron interaktion och gittervibrationer, dvs termisk rörelse av joner och betecknas ρ_{ph} . Eftersom ρ_i och ρ_{ph} uppkommer av olika anledningar har de olika temperaturberoende. Detta kommer att undersökas i laborationen.

2.1 Metaller

Metaller kan beskrivas av den fria elektronmodellen, där jonerna är organiserade i ett periodiskt gitter. Ett periodiskt gitter ger upphov till ett energiband-gap, som kan separera valensbandet från ledningsbandet. I metaller överlappar ledningsbandet och valensbandet. Detta ger en bra ledningsförmåga då valenselektronerna kan röra sig fritt i metallen.

Resistiviteten i metaller kan approximeras av $\rho(T) = \rho_i + \rho_T(T)$, där $\rho_T(T)$ är det temperaturberoende bidraget vilket går mot noll vid låga temperaturer $\rho_T(0) = 0$. Det icke-temperaturberoende bidraget är det som kommer från den intrinsiska resistiviteten, dvs från föroreningar, gränssytor och gitterdefekter såsom dislokationer och vakanser.

2.2 Halvledare

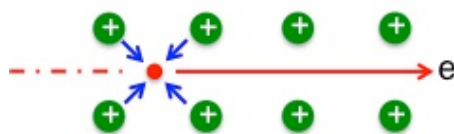
I en halvledare separeras valensbandet från ledningsbandet av bandgapet. Det betyder att elektronerna måste exciteras från valensbandet till ledningsbandet för att leda ström. I en ren halvledare betyder det att atomerna exciteras och den exciterade elektronen lämnar ett hål i valensbandet. Strömmen leds av både den exciterade elektronen i ledningsbandet och hålet i valensbandet. Vid temperaturer större än bandgapet finns det exciterade elektroner i halvledaren och ledningsförmågan är god. När temperaturen sänks finns det ingen energi för att excitera elektronerna över bandgapet. Då höjs resistansen.

2.3 Supraledare

Det finns även material som blir supraledande under en viss temperatur och ett visst magnetfält. I det supraledande tillståndet saknar materialet resistans och magnetfält kan inte penetrera materialet (typ I supraledare).

2.3.1 Den enkla modellen

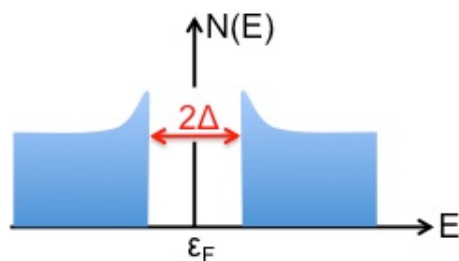
Enligt den enkla modellen kan vi utgå från den fria elektronmodellen för metaller. Men nu när en elektron passerar mellan jonerna i gittret får dessa en liten impuls i riktning mot elektronen (Figur 2). Jonerna är mycket tyngre än elektronerna och rör sig därför långsammare. Elektronen har hunnit långt bort innan jonerna svänger tillbaka till sin ursprungsposition. En annan elektron med motsatt riktning mot den första känner av den positiva potentialen då jonerna är nära varandra och attraheras till den första elektronens spår. Då den första elektronen har hunnit långt bort blir Coulombrepulsionen svag mellan elektronerna, medan gittervibrationerna utverkar en attraherande kraft mellan elektronernas banor. Nettoresultatet blir en attraktiv växelverkan mellan elektronerna och dessa bildar ett så kallat ett Cooper-par.



Figur 2: I en supraledare attraheras jonerna i gittret av en passerande elektron. Elektronen rör sig snabbt förbi, medan de tyngre jonerna rör sig långsamt mot den plats elektronen passerade. Då bildas en positiv potential, vilken attraherar nästa elektron som passerar åt andra hållet. Dessa två elektroner bildar ett Cooper-par.

Elektroner är fermioner, men när de bildar ett Cooper-par blir elektronparet en boson. Det betyder att Pauli-principen inte gäller längre. Paret bildas nära fermienergin och då uppstår ett område Δ som inte innehåller några tillstånd för vanliga elektroner. Detta område kallas supraledarens energigap och det uppstår

på vardera sidan av fermienergin (Figur 3). För att bryta upp ett Cooper-par till två vanliga elektroner behövs därför minst Δ för varje elektron, dvs totalt 2Δ . Så länge strömmen genom supraledaren är så låg att enstaka kollisioner inte ger upphov till 2Δ , kan paret inte brytas upp och resistans saknas.

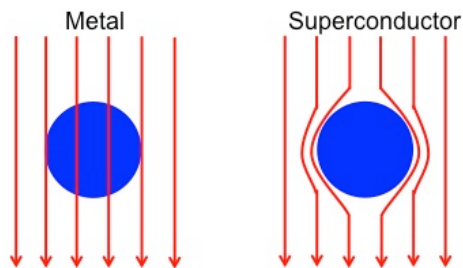


Figur 3: När Cooper-paren bildas, uppstår ett område runt fermienergin utan några tillstånd för vanliga elektroner. Detta kallas supraledarens energigap och betecknas 2Δ .

Ett starkt magnetfält kan också ge Cooper-paren tillräckligt med kinetisk energi för att brytas upp och häva supraledningen.

2.3.2 Meissner effect

När vi utsätter en vanlig metall för ett externt magnetfält, går de magnetiska fältlinjerna rakt igenom metallen (Figur 4). Men om en supraledare (typ I) utsätts för ett magnetfält, böjs fältlinjerna av kring supraledaren och magnetfältet i supraledaren är noll. Om ett magnetfält läggs på en supraledare i normaltillståndet, kommer fältlinjerna att trängas ut när supraledaren kyls under den kritiska temperaturen. Detta fenomen vid den supraledande fasövergången kallas Meissner effekten.



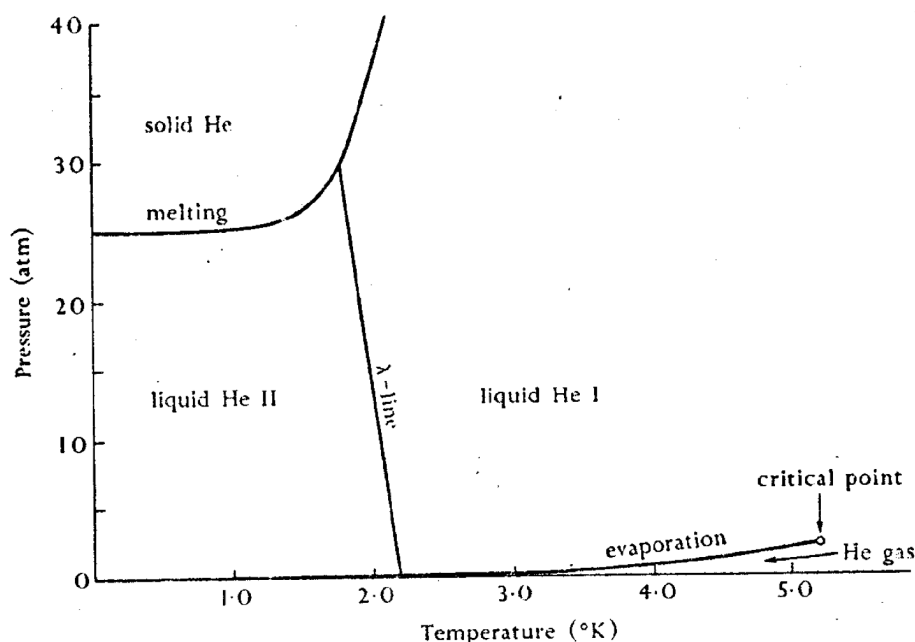
Figur 4: En metall och en supraledare utsätts för ett externt magnetfält. Fältlinjerna går rakt genom metallen, medan de inte kan existera i supraledaren och därför böjs av.

Det finns dock en annan typ av supraledare typ II, där magnetfält kan ex-

istera i vissa normala regioner omgivna av cirkulerande superströmmar. Dessa bildar gitter av normala regioner genom supraledaren som magnetfältet kan frysas in i.

3 Superflytande helium

Helium har den lägsta kokpunkten av alla substanser vi känner till idag. Den vanligaste isotopen av helium ^4He har en kokpunkt på 4.2 K vid atmosfärstryck (Figur 5). Helium är det enda ämne som bibehåller vätskefas under atmosfärstryck ner till absoluta nollpunkten. Detta är på grund av att dess svaga van der Waals interaktioner kombinerat med dess lilla massa resulterar i en relativt hög energi vid 0 K.



Figur 5: Fasdiagrammet beskriver hur helium-4 ändrar fas beroende på temperatur och tryck. De två olika flytande faserna skiljs åt vid lambdapunkten. (Bilden är tagen från M.Hansson, F7 Lågtemperaturfysik, 1984)

När helium kyls ner ytterligare under sin kokpunkt sker en fasövergång från flytande ^4He (He I) till superflytande ^4He (He II). Det är en andra ordningens fasövergång som sker vid 2.2 K, den så kallade lambdapunkten. Fasomvandlingen innebär att heliumatomerna bildar ett Bose-Einstein-kondensat. Dessa atomer är i samma kvanttillstånd - grundtillståndet, mycket likt Cooper-paren i en supraledare.

Eftersom atomerna i kondensatet är i samma kvanttillstånd delar de samma vågfunktion och agerar kollektivt.

3.1 Tvåvätskemodellen

Ett sätt att betrakta He II är med hjälp av tvåvätskemodellen. Där beskrivs He II som en blandning av två vätskor; superfluiden med densitet ρ_S och normalfluiden med densitet ρ_N . Superfluiden saknar entropi och rör sig fritt utan viskositet medan normalfluiden har både entropi och viskositet. Den totala densiteten beskrivs av $\rho_{Tot} = \rho_S + \rho_N$. Proportionen av superfluid och normalfluid beror på temperaturen. Vid låg temperatur består He II nästan enbart av superfluiden, dvs $\rho_N \approx 0$ och $\rho_{Tot} \approx \rho_S$.

3.2 Speciella egenskaper hos superflytande helium

Detta ger upphov till speciella egenskaper såsom att värmeledningsförmågan är 100 miljoner gånger större under lambdapunkten än över den. Den stora värmeledningsförmågan orsakas av att det entropilösa heliumet strömmar dit temperaturen är högre eftersom koncentrationen av det entropilösa heliumet är lägre där. Det exciterade helium trängs då undan av det entropilösa samtidigt som det tar med sig värmen bort.

3.3 Hög värmeledningsförmåga

Den stora värmeledningsförmågan i superflytande helium går att se när trycket på kokande helium sänks och temperaturen sjunker under lambdapunkten. Plötsligt slutar heliumet att bubbla. Värmeledningsförmågan är så stor att temperaturfluktuationerna som normalt sett ger upphov till gasbubblorna inte hinna utvecklas.

3.4 Rollin-film

På alla ytor som är kallare än lambdatemperaturen bildas kondens av helium. Om vi har doppat en kopp i det superflytande heliumet kommer denna att vara kyld. Då bildas kondens på hela koppen. Eftersom alla heliumatomerna som befinner sig i grundtillståndet har samma vågfunktion kommer de att agera kollektivt. Om någon del av det superflytande heliumet har lägre potential uppstår ett sannolikhetsflöde mot området med lägst energi. När koppen lyfts upp kommer det kondenserade heliumet på koppen samt heliumet i koppen att ha högre potential än det i badet i kryostatens. Därför kommer heliumet i koppen att krypa ur koppen och droppa ner i badet.

Vanliga vätskor hindras från att rinna ur koppen av gravitationen och viskositeten mot väggarna, men supraflytande helium har ingen viskositet och kan strömma fritt. Därmed kostar det mer energi att bryta den tunna heliumfilmen jämfört med att gå emot gravitationen, och det superflytande heliumet kryper ur koppen.

4 Experiment

Under laborationen kommer du att få hjälpa till med följande experiment:

1. Kalibrera termoelementen för att kunna bestämma temperaturen i kryostatens.
2. Förkyla kryostaten till 77 K med kväve.
3. Mäta resistansen som funktion av temperatur för fyra prover (Ge, Cu, Nb och manganin) samtidigt som vi kyler ner kryostaten från 77 K till 10 K med helium-4.
4. Kyla ner kryostaten ytterligare under heliums kokpunkt. Därefter demonstreras två olika fenomen av superflytande helium.
5. Demonstrera Meissnereffekten med en kvävekyld högtemperatursupraleddare.

Ha det riktigt roligt och lärorikt på laborationen!