

Øvelsesvejledning – Lavtemperaturfysik

Resumé

Denne øvelsesvejledning indeholder en kort introduktion til superledere og flydende kvælstof samt en vejledning til forsøgene (i) måling af kvælstofs udvidelse ved overgang fra væske- til gasfase, (ii) Ohms lov, (iii) måling af den kritiske temperatur for en superleder og (iv) Meissner-effekten.

Skrevet af: Jeppe Brage Christensen, november 2013.
Rettelser sendes til: jeppebrage@gmail.com

Introduktion

Superledere: I en superleder løber ledningselektronerne uden modstand, så der sker ikke noget energitab til termisk energi. Da strømme inducerer magnetfelter, kan der ved brug af superledere og stærke strømme laves meget kraftige magnetfelter. Dette vil normalt ikke kunne lade sig gøre idet store mængder energi afsættes i normale ledere. Sådanne magnetfelter bruges i alt fra partikelacceleratorer [1] over MR-scannere [2] til magnetisk løftede tog (MagLev-tog) [3].

Efter at hollænderen Heike Kamerlingh-Onnes i 1911 opdagede, at kviksølv er superledende, er der i dag kendt over 10.000 forskellige superledende stoffer, som dog skal nedkøles under en for hvert stof særegen kritisk temperatur T_c for at være superledende.

Der kendes dog desværre ingen superledere med en kritisk temperatur i nærheden af stuetemperatur, hvorfor køling med fx flydende kvælstof er nødvendigt.

En superleder udviser den såkaldte Meissner-effekt, hvor den i superledende tilstand vil afvise alle magnetfelter, hvorved en magnet kan bringes til at svæve.

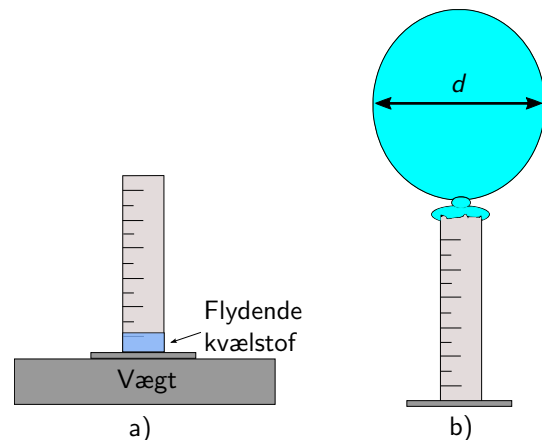
Flydende kvælstof: I alle fire forsøg vil flydende kvælstof blive brugt. Enten til nedkøling af superlederen, til undersøgelse af Ohms lov eller til at undersøge volumenændringen ved overgang fra væske- til gasfase.

Da kvælstof koger ved 77K, vil der ved kontakt mellem kvælstof og fx laboratorieudstyr ved stuetemperatur blive dannet en gashinde mellem udstyret og det flydende kvælstof. Dermed vil det flydende kvælstof prelle af på udstyret – dette er den såkaldte Leidenfrost-effekt, som også kendes fra vanddråber på en varm kogeplade. Derfor kan der springe dråber med flydende kvælstof rundt i luften, hvorfor det er vigtigt at have sikkerhedsbriller på og evt. aftage fingerringe.

Forsøg 1: Flydende kvælstofs overgang fra væske- til gasfase

Dette forsøg har til formål at undersøge, hvor meget flydende kvælstof udvider sig ved overgangen fra væske- til gasfasen.

Forsøgsopstillingen er illustreret i figur 1a), hvor et måleglas er placeret på en (nulstillet) vægt. Forsøg nu at få



Figur 1: a) Forsøgsopstillingen og b) oppustet ballon efter det flydende kvælstof er overgået til gasform.

ca. 3–4g flydende kvælstof i måleglasset. Efter volumenet og massen er aflæst, placeres ballonen på måleglasset så kvælstoffet kan fordampe op i ballonen, se figur 1b).

Rumfanget af den oppustede ballon kan nu bestemmes på to måder:

- 1) En direkte måling af omkredsen, hvorefter volumenet V_{eks} findes som

$$V_{\text{eks}} = \frac{4}{3}\pi r^3, \quad (1)$$

hvor r er radius af ballonen.

- 2) Ved udregning af det teoretiske volumen af ballonen, (V_{teo}). Da en kvælstofgas tilnærmelsesvist opfører sig som en idealgas, kan V_{teo} findes ved brug af idealgasligningen

$$PV_{\text{teo}} = nRT, \quad (2)$$

hvor P er trykket, n er stofmængden, R er gaskonstanten og T er den absolutte temperatur. Stofmængden kan findes som $n = \frac{m}{M}$, hvor m er massen og M er molarmassen af det flydende kvælstof. Overvej hvilken af følgende dimensioner af gaskonstanten, der er

mest brugbar i (2):

$$R = 8,31 \frac{\text{J}}{\text{K mol}}$$

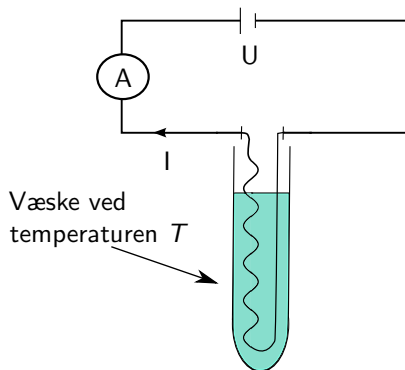
$$= 0,0821 \frac{\text{L atm}}{\text{K mol}}.$$

Sammenlign V_{teo} og V_{eks} . Er der afvigelser? i så fald: hvorfor?

Udregn hvor meget flydende kvælstof udvider sig ved overgang fra væske- til gasfase. Overvej hvilke antagelser der er blevet gjort samt usikkerheder i forsøget.

Forsøg 2: Ohms lov

Dette forsøg har til formål at undersøge modstanden R af en modstandstråd ved først stuetemperatur, og derefter omkring 77K. Forsøgsopstillingen kan ses i figur 2.



Figur 2: Schematisk forsøgsopstilling. Her ses modstandstråden nedsænket i en beholder (fx termokande) med flydende kvælstof.

Sammenhængen mellem strømstyrken I gennem tråden og spændingen U over tråden er givet ved Ohms lov

$$U = R \cdot I, \quad (3)$$

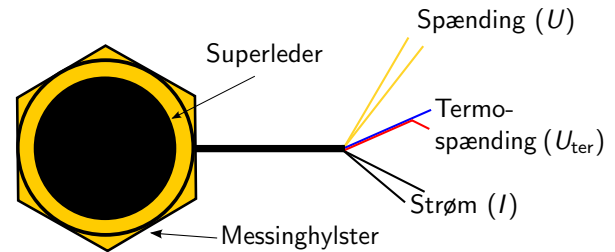
hvor R er trådens modstand. Modstanden ved stuetemperatur bestemmes på følgende vis:

- 1) Foretag en aflæsning af strømstyrken og den tilhørende spænding, og indtegn dette punkt i et (I, U) -koordinat-system. Justér spændingen og tag på denne måde flere datapunkter. Vær opmærksom på, at spændingen ikke må overskride 8V. Modstanden R kan nu findes ud fra en lineær regression.
- 2) Nedsæk nu forsigtigt røret med konstantantråden i termokanden med flydende kvælstof, hvormed konstantantråden får en temperatur på ca. 77K. Find modstanden ved samme metode som før.

Er der en forskel mellem modstanden fundet i 1) og 2)? Er det som forventet?

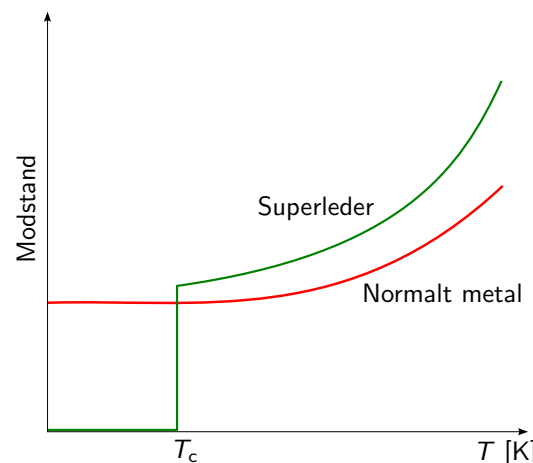
Forsøg 3: Måling af den kritiske temperatur

I denne øvelse skal den kritiske temperatur af det superledende materiale $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (BSCCO) findes. Dette materiale er indlejret i et messinghylster som vist i figur 3.



Figur 3: En BSCCO-superleder, hvor de tre par ledninger er vist.

Der stikker tre par ledninger ud af hylsteret (se mere om disse nedenfor), der bruges til at udregne den absolutte temperatur og modstanden. Ud fra disse er det muligt at konstruere en (T, R) -graf som vist i figur 4, hvorfra T_c kan aflæses.



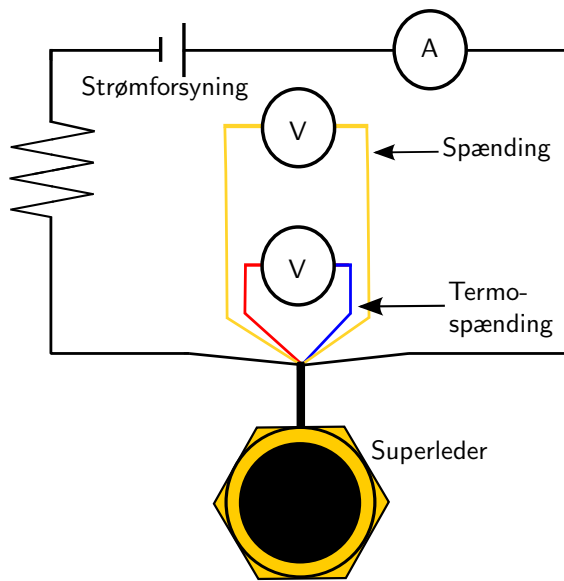
Figur 4: (T, R) -graf for en superleder og et normalt metal. Under T_c løber elektronerne i superlederen uden modstand.

Forsøgsopstillingen er vist i figur 5. Det sorte og gule par ledninger bruges til at bestemme modstanden: Ved at indsætte en stor modstand i kredsløbet, vil strømstyrken I tilnærmelsesvis være konstant gennem hele forsøget og behøves således kun aflæses én gang. Ved aflæsning af spændingen U kan modstanden altså findes som

$$R = \frac{U}{I}. \quad (4)$$

Det sidste par ledninger er forbundne til et termoelement, og giver den såkaldte termospænding, U_{ter} . Disse kan bruges til at finde den absolutte temperatur T ud fra sammenhængen

$$T(U_{\text{ter}}) = 290\text{K} - 43,3 \frac{\text{K}}{\text{mV}} U_{\text{ter}} + 1,60 \frac{\text{K}}{\text{mV}^2} U_{\text{ter}}^2. \quad (5)$$



Figur 5: Kredslobet, hvor de tre par ledninger fra superlederen bruges til at bestemme modstanden og temperaturen ud fra (4) og (5) respektivt.

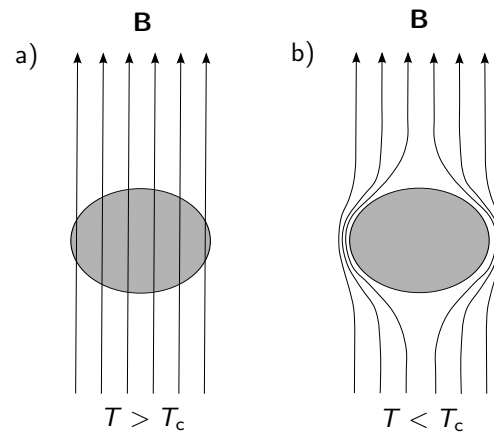
Fremgangsmåden for at bestemme den kritiske temperatur er som følger:

1. Læg forsigtigt messinghylsteret med superlederen ned i det flydende kvælstof for at nå under T_c .
2. Når det flydende kvælstof omkring superlederen ikke koger mere, løftes den op og lægges på kanten af flamingokassen, så den varmes op.
3. Notér løbende U - og U_{ter} -værdierne fra de to multimeter – især når spændingen begynder at stige (hvorfor?).
4. Når superlederen ikke længere er superledende, skal U - og U_{ter} -værdierne omregnes til R - og T -værdier ved brug af (4) og (5) respektivt. Lav en (T, R) -graf som ovenfor og aflæs T_c .

Forsøg 4: Meissner-effekten

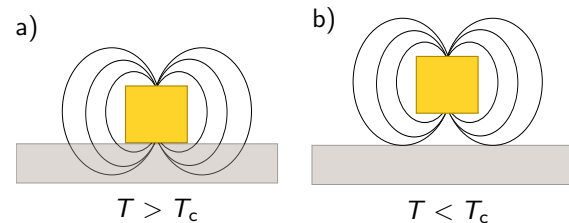
Formålet med denne øvelse er at undersøge den såkaldte Meissner-effekt, som er illustreret i figur 6. Her ses en superleder ved en temperatur over den kritiske temperatur, hvor de magnetiske feltlinier fint kan gennemtrænge superlederen (figur 6a). Køles superlederen ned til en temperatur under T_c som i figur 6b), vil der kunne induceres strømme (uden modstand) i overfladen af superlederen. Magnetfelterne fra disse overfladestrømme vil udligne det pålagte magnetfelt inden i superlederen, og superlederen vil udvise perfekt diamagnetisme [4].

Når en superleder overgår fra en ikke-superledende tilstand som i 7a) til en tilstand under T_c og udviser perfekt diamagnetisme, vil den afvise en permanent magnet som



Figur 6: a) Ved en temperatur over den kritiske temperatur kan de magnetiske feltlinier gennemtrænge superlederen. Dette er ikke tilfældet i b), hvor inducerede overfladestrømme vil afvise det pålagte felt inden i superlederen.

illustreret i figur 7b). En superleder kan således få en magnet til at svæve over sig i sin superledende tilstand. Bemærk, at Meissner-effekten er forskellig fra den frastødning af en permanent magnet en perfekt leder vil udvise – laboratoriestruktoren kan uddybe dette.



Figur 7: a) Ved en temperatur $T > T_c$ kan feltlinierne gennemtrænge superlederen. I en superledende tilstand b) vil superlederen udvise perfekt diamagnetisme og frastøde magneten.

I en såkaldt type-II superleder vil magnetfeltet ikke blive afvist helt, men gennemtrænge superlederen i urenheder (såkaldt 'flux pinning') og være omgivet af superledende hvirvelstrømme, og fastlåse superlederen i dens position i forhold til magnetfeltet. En magnet kan således fastholdes i en position i forhold til (type-II) superlederen – også under superlederen forudsat den ikke vejer for meget. Øges temperaturen og/eller magnetfeltet, vil der komme flere af disse hvirvelstrømsområder, indtil de vil overlape hinanden og superledningen går tabt.

Litteratur

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Synchrotron>.
- [2] <http://da.wikipedia.org/wiki/MR-scanning>.
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Maglev>.
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/Diamagnetism>.