

100 år med flydende helium

Af Finn Berg Rasmussen, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Hovedpunkter af lavtemperaturfysikkens historie gennemgås, med særlig vægt på den første begyndelse og på de eksperimentelle sider.

Indledning

Den 10. juli 1908 kan med god grund udnævnes til lavtemperaturfysikkens fødselsdag: det var på denne dag, at den sidste af de "permanente gasser" blev fortættet. Vi fik dermed adgang til et temperaturområde med helt ny fysik: superledning og superfluiditet. Efter opdagelsen af den kosmiske baggrundsstråling er det ydermere klart, at det var på denne dag, at mennesket for første gang passerede Universets laveste temperatur, 2,7 K.

Første bedrift i Leiden: fortætningen af helium

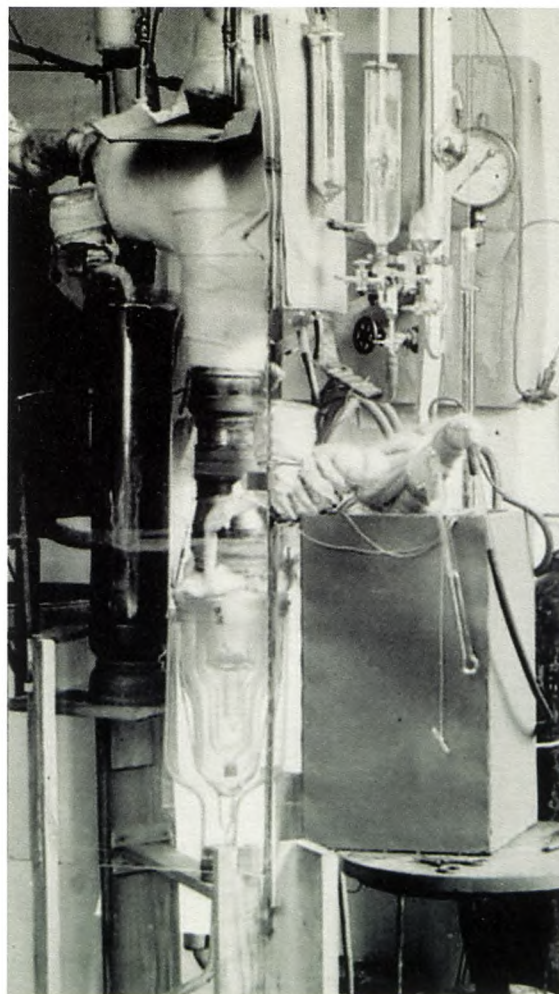
Da Heike Kamerlingh Onnes kl. 5 om morgenen den 10. juli 1908 tog ind til sit laboratorium, kunne han ikke med sikkerhed vide, at et tiårs systematiske forberedelser nu skulle bære frugt, men alt var klar: i dagene forud var opbygget et forråd på 75 l flydende luft, alt apparatur var pumpet ud, og gasbeholdningerne af brint og helium var omhyggeligt rensat. Næste skridt var at fortætte en tilstrækkelig mængde flydende brint, og ca. 13:30 stod der 20 l. Nu blev helium-delen af apparatet forkølet, og tre timer senere begyndte komprimering og cirkulering af heliumgas.



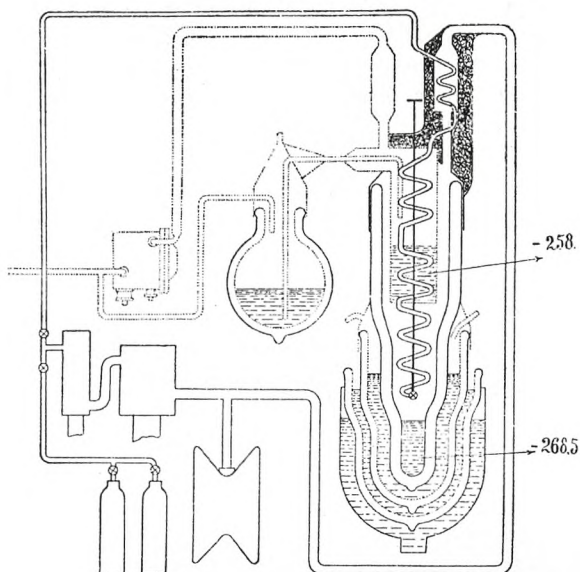
Figur 1. Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926), leder af Leiden-laboratoriet gennem 40 år, var den første til at fortætte helium.

Hos Kamerlingh Onnes blev både luft, brint og helium afkølet (og fortættet) ved hjælp af Joule-Thomson køling. I denne proces lader man gassen ekspandere frit igennem en dyse eller en porøs prop. For en ideal

gas vil en sådan ekspansion ikke medføre nogen temperaturændring, men for reelle gasser kan temperaturen falde, hvis man begynder ved en temperatur, der er lavere end *inversionstemperaturen* (for helium ca. 23 K). Den afkølede gas føres tilbage således, at den kan køle den indkommende gas, og på den måde falder temperaturen lidt efter lidt, indtil gassen (måske) fortættes. Hvis helium skal afkøles (og fortættes) gennem Joule-Thomson processen, skal det derfor forkøles til en temperatur et stykke under 23 K, jo mere jo bedre. Brints kogepunkt er 20 K, men ved at lade brinten koge ved lavere tryk kan man sænke dens temperatur, indtil tripelpunktet nås ved 14 K, hvor brinten størkner (figur 2 og 3)



Figur 2. Verdens første heliumkryostat (udsnit af forsidebilledet). Yderst et glas med alkohol (forebygger dugdannelse), derefter: vakuum mellem to glasvægge, flydende luft, vakuum, flydende brint, vakuum, flydende helium.



Figur 3. Verdens første heliumkryostat skematisk. Yderst et glas med alkohol (forebygger dugdannelse), derefter: vakuum mellem to glasvægge, flydende luft, vakuum, flydende brint, vakuum, flydende helium. Pilen til -258 peger fra flydende brint ved 15 K.

I Kamerlingh Onnes laboratorium fulgte de temperaturen med et heliumgasthermometer og en elektrisk sensor, og gennem nogle timer faldt temperaturen lidt, fladede ud og faldt igen. Kl. 18:30 var man under temperaturen af den flydende brint, men der var intet at se i heliumreservoiret inderst i apparaturet. En time senere stod termometeret bomstille, omkring 4 K. En kollega kiggede ind for at se, hvordan det gik, og konstaterede at det jo var som om termometeret stod i en kogende væske. Den bemærkning fik Kamerlingh Onnes til at kigge nøjere ind i kryostaten. Med lys faldende ind skråt nedefra sås tydeligt refleksen fra en væskeoverflade. "Da overfladen først var set, tabte vi den ikke mere af syne". Beholdningen af flydende brint var næsten opbrugt på dette tidspunkt, så helium-kondenseringen måtte standses, og væsken stod nu roligt og fordampede (kogte!). Da der efter en times tid var 10 ml tilbage, blev trykket og dermed temperaturen reduceret for at se, om helium – ligesom alle andre væsker – ville blive fast, når man således pumpede sig ned til tripelpunktet. Et tryk på ca. 10 mbar blev nået, dvs. en temperatur under 2 K, men resultatet var negativt. Vi ved nu, at helium først kan gøres fast ved tryk på over 25 bar.

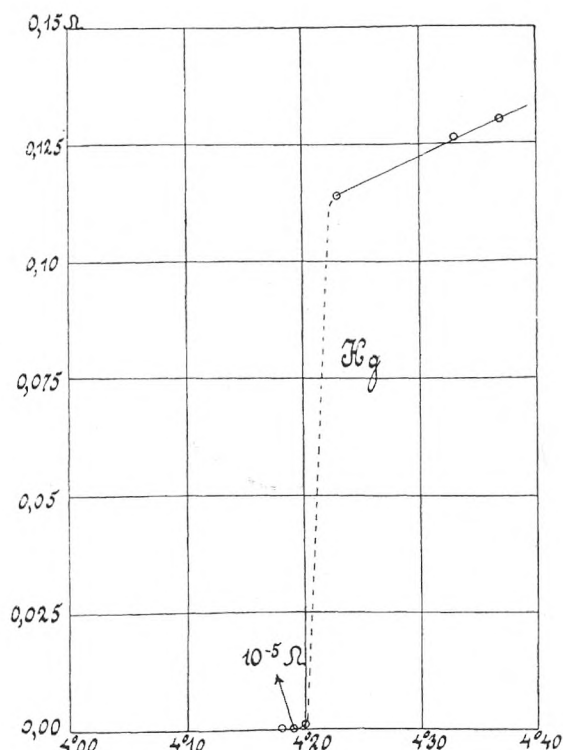
Kamerlingh Onnes var tiltrådt som professor i eksperimentel fysik og meteorologi ved universitetet i Leiden i 1882. I sin tiltrædelsesforelæsningsformulere han mottoet "door meten tot weten", "gennem måling til viden". Van der Waals havde kort tid forinden formuleret sin modifikation af idealgasligningen, og Onnes begyndte omfattende eksperimentelle studier af gassers egenskaber ved lave temperaturer, hvor afvigelserne fra idealgasopførsel er størst. Brint blev første gang fortættet i 1898, af J. Dewar, opfinderen af dewarkarret (den vakuumisolerede glas-termoflaske). Helium var opdaget i solspektret i 1868, men blev

først påvist på Jorden i 1895, af W. Ramsay. Helium på Jorden kommer fra alpha-radioaktive stoffer. Onnes fik sit første helium fra en ladning thorium-holdigt sand fra North Carolina. Kemikere i Leiden arbejdede i månedsvis for at udskille heliumgassen. Ved den første fordråbning af helium var der 200 l gas til rådighed, og heraf blev over en femtedel fortættet. Som følge af knapheden på helium var Leiden alene om at kunne bruge flydende helium i de første 15 år.

Fortætningen af brint og af helium var ganske naturligt genstand for et kapløb mellem Onnes i Leiden og Dewar i London. Mange interessante detaljer kan findes i ref. [2].

Appelsinen i turbanen: superledning

Efter opdagelsen af elektronen blev metallernes ledningsevne et særlig interessant emne. I Leiden kunne man efter 1908 studere den elektriske modstand til hidtil uhørt lave temperaturer, og i overensstemmelse med laboratoriets motto søgte man at etablere empiriske formler for temperaturafhængigheden. Efter guld og platin tog de fat på kviksølv, og i efteråret 1911 viste det sig, at kviksølvs modstand faldt til en umåleligt lille værdi indenfor et temperaturinterval på højst 20 mK lige omkring heliums kogepunkt 4,2 K (figur 4). Det er helt velgørende at se, hvor forsigtigt og omhyggeligt denne store (set med vores bagkloge øjne) opdagelse bliver beskrevet. Mange fejlkilder og mulige teoretiske forklaringer bliver forsøgt [3].



Figur 4. Fast kviksølvs elektriske modstand omkring 4,2 K, målt i 1911. Springet i modstand er målt til mindst en faktor 10^4 . Modstanden stiger ca. en faktor 500 fra 4,22 K til smeltepunktet 234 K.

I forsøg på at måle den forsvindende lille modstand blev der sendt høje strømstyrker gennem kviksølvet, hvorved det hurtigt blev opdaget, at der er en tærskelværdi for strøm (*den kritiske strøm*), over hvilken den superledende tilstand forsvinder, og den normaltledende tilstand vender tilbage. Først efter halvdandet år dukker ordet superconductivity op, og kort efter bliver fænomenet også set i tin og bly. Det bliver angivet, at modstanden aftager med en faktor på mindst 10^{10} i forhold til modstanden ved stuetemperatur. Eksistensen af et *kritisk magnetfelt* bliver påvist. For disse superledere er det kritiske felt for svagt til, at superledende magnetpoler kunne være til gavn på den tid, men der blev eksperimenteret med vedvarende strømme i kortsluttede superledende spoler.

Grundvidenskabeligt set åbnede opdagelsen af superledning en helt ny verden. Der skulle gå næsten et halvt århundrede, før en tilfredsstillende kvantemekanisk teori blev fremsat (Bardeen-Cooper-Schrieffer- eller BCS-teorien, 1957). Se fx [4]. Her blev det klart, at ledningselektronerne i en superleder danner en fælles kvantetilstand, et Bose-Einstein-kondensat [5], der strækker sig gennem hele det superledende materiale. I en superledende ring vil bølgefunktionen således være underkastet en kvantiseringsbetingelse med den virkning, at kun bestemte strømme vil være tilladt. De strømbærende partiklers ladning indgår i kvantiseringsbetingelsen, og det viser sig, at elektronerne optræder i par ("Cooper-par") med ladningen $2e$, hvor e betegner ladningen på en enkelt elektron.

Det er et ret simpelt forsøg at fange en vedvarende strøm i en superledende blyring af fx 5 cm diameter. I denne sammenhæng kan ringen - eller i hvert fald elektronerne i den - betragtes som ét stort atom, selv om den altså er en genstand, som kan ses med det blotte øje. Hvis elektronerne i en superleder kan gå to forskellige veje og mødes igen, vil der opstå interferens, hvilket kan udnyttes til konstruktion af meget følsomme detektorer, kvanteinterferometre, for magnetfelt og dermed for strøm.

Anvendelsesmæssigt begyndte det store gennembrud også omkring 1960. På den tid blev der opdaget en række metallegeringer med høje overgangstemperaturer og meget høje kritiske felter. Et eksempel er Nb_3Sn , der bliver superledende ved 18,3 K og har et kritisk felt på 19 tesla. Det har vist sig muligt at fremstille kilometervis af superledende tråd i disse materialer og at vikle magnetpoler til sådanne høje felter, ofte med en særlig feltprofil, specielt meget homogene felter. Magnetene er meget brugt til grundforskning i fysik og kemi, fra små enkeltmandsforsøg over NMR-spektrometre (NMR = kernemagnetisk resonans, Nuclear Magnetic Resonance) til afbøjningsmagnetene i LHC ved CERN-forskningscenteret. NMR-spektrometre spiller også en stor rolle i industriel forskning. NMR-teknikken har kunnet udvikles til billeddannelse og dermed er de superledende magneter stormet frem i den medicinske verden, hvor de trækker læsset i de såkaldte MR-scannere.

Det sidste store kapitel i superledningens historie begyndte i 1986, da Bednorz og Müller [6] påviste superledning ved ca. 30 K i et cuprat af lanthan og enten barium, strontium eller calcium. Den hidtidige rekord lå ellers omkring 23 K, og det var teoretisk bevist, at 30 K var den absolut øverste grænse for superledning (med den mekanisme, som man regnede med på det tidspunkt). Få uger inde i 1987 var der fundet andre cuprater med langt højere overgangstemperaturer, fx 98 K for $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{4+\delta}$, populært kaldet YBCO. YBCO kan holdes superledende med det billige flydende nitrogen, hvis kogepunkt er 77 K. Der er siden fundet forbindelser med overgangstemperaturer i nærheden af 150 K, men fælles for dem alle er, at de er keramiske materialer, og det er derfor en stor udfordring at fremstille tråd af dem. En kendt dansk fysiker kom for skade at sammenligne opdagelsen med opfindelsen af hjulet, men nu, 20 år efter, har vi stadig en overbevisende teknisk anvendelse til gode.

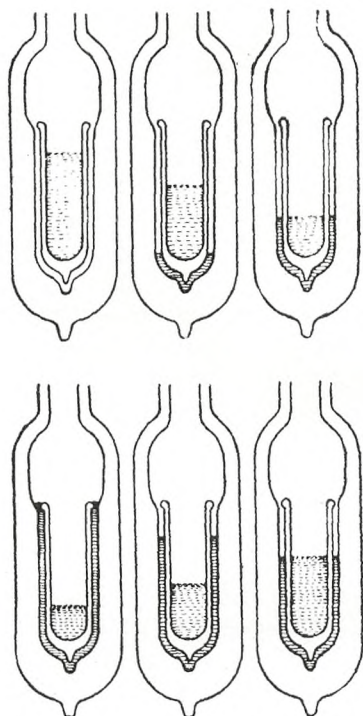
Superfluiditet

Henimod slutningen af 1930'erne blev det klart, at når man afkølede flydende helium under sit eget damptryk, gik det over i en ny tilstand ved temperaturen 2,17 K. Nu taler vi om den superflydende tilstand eller fase; dengang brugtes den mere forsigtige betegnelse He II, hvor He I så betegnede den normaltflydende tilstand. Lige ved overgangstemperaturen divergerer varmekapaciteten; kurven minder om det græske bogstav λ , hvorfor denne temperatur kaldes "lambda-punktet", T_λ .

Den superflydende væske kan flyde gennem snævre kanaler uden gnidningsmodstand (op til en vis kritisk hastighed), og den reagerer meget specielt på temperaturforskelle, fx som om dens varmeledningsevne er uendelig stor (igen til en grænse). Lettest at beskrive og måske mest aparte er fænomenet *film flow*. I figur 5 øverste række ses et glas, der er fyldt med superflydende helium. Væsken flyder i en tynd film op over kanten og drypper fra bunden ned i den ydre beholder, indtil væsken står i samme højde i de to beholdere. Omvendt flyder væsken fra den ydre beholder til den indre, hvis niveauet i den ydre er højest. Der er ikke noget specielt ved, at en overflade i kontakt med en væske dækkes af en film (prøv bare at vippe lidt med en kop te!), men heliumfilmen er særligt tyk, og desuden er strømningsmodstanden nul.

Figur 5 viser resultatet af film flow, men for Kamerlingh Onnes, som viste figuren i et foredrag i 1922 [7], illustrerede den et mislykket forsøg på at gøre helium fast. Den viste anordning var helt omgivet af flydende helium ved 4,2 K, og ideen var at nå den lavest mulige temperatur under kogning ved lavt tryk i den inderste beholder, som er isoleret fra 4,2 K af en dobbelt vakuuminisolering. Den inderste beholder var forsynet med en omrører i form af en lille vandret skive, der ville kunne vise, om væsken var blevet fast; men som også blev brugt som en ske til at øse væske til den ydre beholder. Kamerlingh Onnes formodede, at der foregik en destillationsproces, men processen forløb

for hurtigt, så han erklærede, at videre undersøgelser var nødvendige.



Figur 5. "Film flow". Øverste række: inderbeholderen er først næsten fuld af superflydende helium og yderbeholderen er tom; væsken flyder op over kanten i en tynd film, og efter få minutter er der samme væskestand i yder- og inderbeholder. Nederst: væsken fra inderbeholderen er øst ud (med en lille ske); niveauerne udlignes igen (Kamerlingh Onnes 1922).

Med superfluiditet står vi igen overfor et makroskopisk kvantefænomen, blandt andet med den konsekvens, at der optræder kvantiserede hvirvler [5], når væsken roterer. Iøvrigt skyldes det også en kvantemekanisk effekt, at helium under sit eget damptryk som den eneste væske forbliver flydende til de laveste temperaturer: hvis man prøver at spærre et atom inde i et mindre volumen, stiger dets kinetiske energi (kan beregnes af Heisenbergs usikkerhedsrelation), og konkurrencen mellem denne *nulpunktsenergi* og tiltrækningen mellem atomerne bliver for heliums vedkommende vundet af den kinetiske energi.

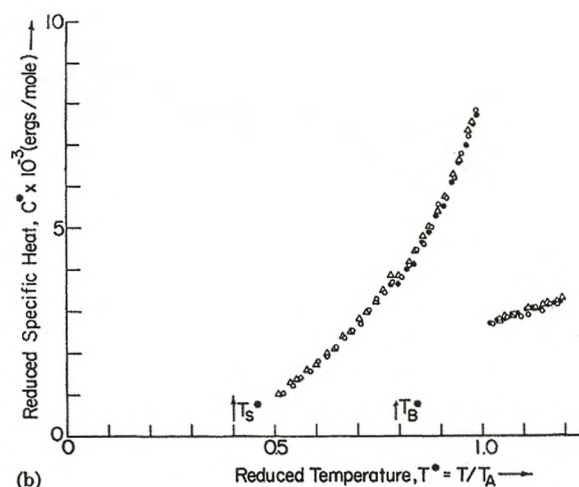
Helium-3

Den lette heliumisotop ^3He blev tilgængelig i 1950'erne. Den fremkommer ved henfald af tritium, ^3H (halveringstid ca. 12 år), som bliver fremstillet ved neutronbombardement af lithium med henblik på anvendelse i brintbomber. Anskaffelsesprisen er høj, men man kan arbejde med små mængder og genbruge gassen. Som følge af ^3He -atomets mindre masse sammenlignet med ^4He er damptrykket højere, og det er let at pumpe flydende ^3He ned til en temperatur på 0,3 K (med ^4He er selv 1 K vanskelig at nå). En endnu mere effektiv køleproces er at opløse ^3He i ^4He , se fx

[8]. Med den metode kan man kontinuerligt opretholde temperaturer ned til nogle få millikelvin.

Hvis man vil gøre ^3He fast, kræver det endnu højere tryk end for ^4He , men det er mere interessant at se på de forskelle, der skyldes, at ^3He -atomet er en fermion, medens ^4He -atomet er en boson. I flydende ^3He findes der ikke overgang til superfluiditet ved en temperatur, der kan sammenlignes med T_λ for ^4He . Men i 1972 opdagede Osheroff, Richardson og Lee [9], [10] en faseovergang i flydende ^3He ved ca. 2,6 mK – altså en tusindedel af T_λ .

I ^3He -kernen findes en uparret neutron, og derfor har kernen et spin på $\frac{1}{2}$ og et magnetisk moment. Det er dette, der gør ^3He til en fermion, og det giver anledning til et kompliceret fasediagram og en rigdom af magnetiske og andre fænomener. Fermion-karakteren bevirker, at den "superflydende" fase kvantemekanisk set minder mere om den superledende tilstand for elektroner end om superflydende ^4He . Således ligner varmekapacitets temperaturafhængighed, figur 6, til forveksling kurven for en superleder [11].



Figur 6. Varmekapacitet af flydende ^3He langs smeltepunktsskurven. Temperaturen er givet i enheden $T_A = 2,6$ mK.

Magnetisk køling

Den først kendte form for paramagnetisme i faste stoffer hidrører fra ioner med et magnetisk moment, hvis retning kan indstille sig frit, for eksempel i forhold til et ydre magnetfelt. Længe inden atomfysikken kunne forklare de magnetiske momenter eksistens, behandle Langevin dette system ved hjælp af statistisk fysik. Så tidligt som 1905 forudsagde han, at når systemet blev anbragt i et magnetfelt, ville der komme en temperaturstigning. Årsagen er, at momenterne prøver at sænke deres energi ved at rette sig ind efter magnetfeltet – i konkurrence med de termiske forstyrrelser – og den overskydende energi kommer ud som varme. Hvis man afkøler materialet til udgangstemperaturen og derpå skruer ned for feltet, dvs. afmagnetiserer, vil der omvendt komme et temperaturfald. Ved høje temperaturer er disse effekter alt for svage til at

bruges som kølemetode. Men i 1923 leverede Leiden-laboratoriet endnu et vigtigt bidrag. Woltjer og Kamerlingh Onnes opdagede, at nogle paramagnetiske salte, fx gadoliniumsulfat (hvor Gd-ionen har et magnetisk moment), stadig fulgte Langevins teori ved de laveste helium-temperaturer. Den magnetiske susceptibilitet er omvendt proportional med temperaturen, og derfor bliver effekterne store ved lav temperatur. Nogle år senere foreslog Debye og Giaque uafhængigt af hinanden at udnytte denne mulighed for køling, og i 1933-1934 kunne tre forskellige grupper rapportere temperaturer ned til 0,25 K.

Teknikken var i brug i de følgende fyrré år, først til at studere de paramagnetiske stoffer selv, siden til at køle andre systemer; der blev fx fundet nye superledere med overgangstemperaturer under 1 K.

Ifølge den statistisk-fysiske beregning afhænger stoffets magnetisering, entropi osv af den helt afgørende Boltzmann-faktor $\exp(-\frac{E}{kT})$, hvor E i dette tilfælde er energien af det magnetiske moment i magnetfeltet, k er Boltzmanns konstant og T er temperaturen. E er proportional med magnetfeltet B , og under en adiabatisk, reversibel proces, hvor entropien er konstant, vil forholdet B/T derfor også være konstant. Man kan imidlertid ikke opnå $T = 0$, for hvert moment i stoffet er udsat for et lokalt, indre felt fra de omgivende momenter, og det sætter en nedre grænse for B . Til gengæld kan det indre felt give anledning til, at momenterne ordner sig i et eller andet mønster, og denne *magnetiske orden* kan være et mere interessant fænomen end en eventuel temperaturrekord.

I metodens senere år var cerium-magnesium-nitrat (CMN) et populært salt, både til køling og til termometri. Her er det indre felt så svagt, at temperaturer ned til omkring 2 mK kunne nås. Som generel køleproces er metoden nu helt fortrængt af den ovenfor nævnte $^3\text{He}/^4\text{He}$ -blandingskøler, der kan holde en konstant, lav temperatur i lange tidsrum, om nødvendigt i flere måneder.

Kernemagnetisk køling

Atomkernernes magnetiske momenter er stort set tusind gange mindre end ioners momenter (som skyldes elektroner); det indre felt er derfor tusind gange mindre, og kernemomenternes energier i det indre felt er således en million gange mindre. Følgelig kan man forvente at kunne nå omkring 2 nK ved magnetisk køling med atomkerner.

En pioner for denne metode var Nicholas Kurti (figur 7) i Oxford. Kurtis gruppe arbejdede med kernespinnene i kobber. Kobberet blev forkølet i et magnetfelt til ca. 12 mK ved hjælp af et paramagnetisk salt. Den påfølgende afmagnetisering bragte kernespinnenes temperatur i nærheden af 1 μK [12]. Man havde her den mærkværdige situation, at kernes magnetiske momenter (eller spin) befandt sig ved 1 μK , mens metallets elektroner og krystalgitter havde temperaturen 12 mK. Varmeudvekslingen mellem de to systemer var ikke stærkere, end at det tog flere minutter, før kerne-

spinnene atter var ved 12 mK. Denne relaksationstid er omvendt proportional med elektronernes temperatur og kan bringes op på hele dage.



Figur 7. Nicholas Kurti (1908-1998), bragte kernespinnene i kobber til en temperatur omkring 1 mikrokkelvin under sine eksperimenter ved Oxford Universitets Clarendon laboratorium. Billedet er muligvis taget i forbindelse med et af Kurtis TV-programmer.

Kurti var en farverig personlighed, som ikke veg tilbage for at lade TV-seerne kigge med i en live transmission af en kernemagnetisk afmagnetisering i laboratoriet. Han optrådte også som "Physicist in the Kitchen" med en del utraditionelle opskrifter [13].

Fra omkring 1970 blev der ved Helsinki Tekniske Universitet opbygget et laboratorium, som i henseende til fokusering og til uddannelse og motivering af en teknisk og videnskabelig stab bringer Leiden-laboratoriet i erindring. Den drivende kraft var Olli V. Lounasmaa



Figur 8. Olli V. Lounasmaa (1930-2002), Helsinki Tekniske Universitet, indførte tottrins kernemagnetisk køling. Indehaver af den nuværende lavtemperaturrekord: 50-100 pikokelvin.

Under brug af to kernemagnetiske køletrin forbundet i serie ("i kaskade", som de yndede at kalde det) blev der her sat den ene rekord efter den anden i kernespin-temperaturer. Formålet var dog mere dybsindigt: kernespinnene i mange metaller antages at udgøre et

så simpelt system, at de i særlig grad egner sig til afprøvning af teorierne for magnetisme, herunder magnetisk orden. I 1982 blev der påvist ordning i kobber (ved 52 nK), i 1991 i sølv (560 pK). Køleteknikken var så effektiv, at de magnetiske strukturer har kunnet analyseres i detaljer med neutronstråling. Den laveste spintemperatur (ca. 100 pK) er nået i rhodium [14]; trods velbegrundede forventninger sås der ingen tegn på ordning. Nogle af disse forsøg er tidligere beskrevet i KVANT [8].

På det seneste er der fundet tegn på kernemagnetisk orden i lithium (ved ca. 300 nK). I forlængelse af de eksperimenter er det opdaget, at lithium som det foreløbig eneste alkalimetall bliver superledende, ved ca. 300 μ K [15].

Konklusion

Lavtemperaturfysikkens 100-årige udvikling er primært båret af grundvidenskabelige interesser og har medført overraskende opdagelser om stoffets egenskaber ved ekstremt lave temperaturer, foreløbig ned til omkring 0,1 nanokelvin.

Da helium i 1908 for første gang blev fortættet, produceredes der ca. 60 ml væske efter to dages forberedelser. Nu tilbyder i hvert fald ét firma [16] en standardmaskine, der kan fremstille 280 l flydende helium i timen, og der tilbydes kapaciteter helt op til 3500 l/h. Denne teknologiske bedrift skyldes behovet for at køle superledende magneter, hvadenten de er beregnet til store acceleratorer som LHC i CERN, eller til hospitalernes MR-scannere. Ligesom på andre områder har der kunnet gå mange år, før tilsyneladende nytteløse opdagelser har fundet betydningsfulde anvendelser.

Litteratur

- [1] H. Kamerlingh Onnes: The liquefaction of helium. Communications from the Physical Laboratory at the University of Leiden, no.108 (1908), gengivet i: Boston Studies in the Philosophy of Science **124** (1991), med ialt 27 udvalgte artikler af Kamerlingh Onnes.
- [2] Dirk van Delft: Little cup of helium, big science. Physics Today March 2008, p.36-42
- [3] H. Kamerlingh Onnes: On the sudden change in the rate at which the resistance of mercury disappears. Communications from the Physical Laboratory at the University of Leiden, no.124c (1911), se [1].
- [4] Per Hedegård: Forenede Elektroner A/S. Om superledning og kvanteteori, s.36-45 (Munksgaard-Nysyn, København 1991)
- [5] Kasper T. Therkildsen og Jan W. Thomsen: Bose-Einstein-kondensation i atomare gasser. KVANT **19**, nr. 2 (2008) – dette nummer.
- [6] J.G. Bednorz and K.A. Müller. Z. Phys. **B64**, 189 (1986)
- [7] H. Kamerlingh Onnes: On the lowest temperature yet obtained. Communications from the Physical Laboratory at the University of Leiden, no.159 (1922), se [1].
- [8] Kim Lefmann og Finn Berg Rasmussen: Verdens trediekoldeste eksperiment – kernemagnetisk orden i sølv. KVANT **7**, nr.4, p.1-10 (1996)

- [9] D.D. Osheroff, W.J. Gully, R.C. Richardson, D.M. Lee: New magnetic phenomena i liquid ^3He . Phys. Rev. Lett. **29**, 920-923 (1972)
- [10] Finn Berg Rasmussen: Nobelprisen i fysik 1996. KVANT **8**, nr.1, p.18-24 (1997)
- [11] W.P. Halperin, C.N. Archie, F.B. Rasmussen, T.A. Alvesalo, R.C. Richardson: Specific heat of normal and superfluid ^3He on the melting curve. Phys. Rev. **B13**, 2124-2131 (1976)
- [12] N. Kurti, F.N. Robinson, F. Simon, D.A. Spohr. Nature **178**, 450 (1956)
- [13] N. Kurti and H. This-Benckhard: Chemistry and physics in the Kitchen. Scientific American April 1994, p.44-50, 94-96
- [14] http://ltd.tkk.fi/wiki/LTL/World_record_in_low_temperatures
- [15] J. Tuoriniemi, K. Juntunen-Nurmilaukas, J. Uusvuori, E. Pentti, A. Salmela, A. Sebedash: Superconductivity in lithium below 0.4 mK at ambient pressure. Nature **447**, p.187-189 (2007)
- [16] www.Linde-Kryotechnik.ch



Finn Berg Rasmussen, har gennem sin tid som lektor ved Niels Bohr Institutet studeret faste og flydende stoffer ved lave temperaturer (termiske, elektriske og magnetiske egenskaber). Er nu pensioneret. Medlem af KVANT's redaktion.

PFEIFFER  **VACUUM**

I året 1958

Kom den første turbopumpe på markedet



Meget er sket siden.

Ring for yderligere information

Tlf. 4352 3800 Fax 4352 3850
efa@pfeiffer-vacuum.dk