

ÉT ATOM TYKT: SØREN BYGGER DET TYNDESTE MATERIALE I VERDEN

Fysikeren Søren Ulstrup har med sine kolleger udviklet en ny metode til at lave materialet grafén. Han undersøger nu, om materialet kan lede til et gennembrud i forståelsen af fænomenet superledning.

Om forfatteren

Jeppé Kyhne Knudsen
er journalist ved Aarhus
Universitet



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

Artiklen er sponsoreret
af Danmarks Frie
Forskningsfond | Natur
og Univers.

Danmarks Frie Forsknings-
fond dækker alle viden-
skabelige hovedområder
og uddeler hvert år godt 1
mia. kr. til forskningspro-
jekter baseret på forsker-
nes egne ideer. Danmarks
Frie Forskningsfond består
af 84 anerkendte forskere
udpeget på baggrund
af deres høje faglige
kompetence. Formand for
Danmarks Frie Forsknings-
fond | Natur og Univers
er lektor ved DTU, Kirstine
Berg-Sørensen.
Se mere på www.dff.dk

En konstant summen,
hvislen og knagen af
maskiner omgiver fysiker
Søren Ulstrup.

Han står bøjet ind over et tårn af va-
kuumkamre, måleinstrumenter, rør
og ledninger. Vi er i kælderen under
et af de gule tårne i universitetspar-
ken i Aarhus. Her når solen aldrig
ned. Luften er tør og indeklemt, der
dufter af elektronik. Bagved må-
leudstyret står et par sofaer rettet
mod et fladskærms-tv.

»Det er til, når vores eksperimenter
trækker ud,« siger han smilende.

»Så bliver vi her nogle gange hele
natten. Den brune sofa sover man
overraskende godt i.«

I mere end fem år har Søren Ulstrup
bygget, modificeret, testet, bygget

om og rettet til på sit eksperiment.
Han har hentet udstyr hjem fra et
hav af forskellige special-leverandø-
rer og langsomt, men støt udbygget
setuppet.

Og nu er han begyndt at høste
frugterne af de mange nætter i
laboratoriet.

»Det er lykkedes os at skabe et
materiale, der kun er ét atom tykt.
Går du 25 år tilbage, var forsk-
ningsverdenen overbevist om, at
det var umuligt. Vi er ikke de ene-
ste, der har gjort det, men vi har
udviklet vores egen metode til det,«
siger han.

På en computerskærm peger Søren
Ulstrup på et billede af materialet.
Fordi det er så tyndt, kan det ikke
ses med det blotte øje, men med et

lysmikroskop med 100 gange for-
størrelse er det muligt at fotografere
det under særlige forhold.

»Vi placerer materialet på en over-
flade af siliciumdioxid. På grund af
lysets brydning skabes en optisk
kontrast, som gør det muligt at se
skyggerne af det ultratynde materi-
ale,« forklarer han.

På billederne ligner det lidt et
vissent blad, der er så skrøbeligt,
at det ved den mindste berøring
forvandles til støv. Men materialet
er faktisk enormt stærkt.

»Det er lavet af bittesmå flager
af grafit. Samme materiale som
sidder i spidsen af blyanter, og som
er bygget op af carbonatomer. Vi
kalder det grafén, når vi forvandler
det til et enkelt lag af atomer, og i

den konfiguration er det stærkere end stål.«

Det lyder måske nemt, men et materiale, der kun er et atom tykt, er ekstremt svært at håndtere. Ikke blot kan Søren Ulstrup og hans kolleger ikke se materialet direkte, men kun en skygge af det, og der findes intet værktøj småt nok til at håndtere det direkte.

»Vi bygger materialerne under et lysmikroskop. Her kan vi forsigtigt flytte rundt på og styre materialerne med glas-slides, som vi monterer nogle klistrede polymerer på. Klistretet gør, at vi kan samle de atomtynde materialer op, flytte rundt på dem, skære i dem og stable dem med en præcis rotationsvinkel,« siger han.

Jagten på fysikkens hellige gral

Det er i sig selv fascinerende, at vi mennesker kan lave materialer, der er så tynde som naturens allermindste byggesten. De kan dog også vise sig at være meget brugbare, hvis vi forstår at udnytte dem på den rigtige måde, forklarer Søren Ulstrup.

»Når man tager to lag af grafén, lægger dem ovenpå hinanden og roterer dem 1,1 grad, sker der noget ejendommeligt: Materialet bliver superledende. Det betyder, at det kan lede strøm uden tab af energi. Kan vi udnytte det, vil det være en revolution indenfor computerteknologi,« siger han og fortsætter:

»Selvom udviklingen af mikrochips fortsat drøner derudaf, rammer vi på et tidspunkt et naturligt loft. I din telefon sidder der flere milliarder transistorer klemte sammen på en meget lille chip. Fordi de leder strøm, udvikler de varme – og jo flere vi klemmer ind på mindre plads, desto større bliver problemet med at komme af med varmen. Det problem vil forsvinde med en superleder.«

I dag findes der en række superle-



Foto: Jeppe Kyhne Knudsen

Om forskeren

Søren Ulstrup er lektor i fysik ved Institut for Fysik og Astronomi på Aarhus Universitet. Han forsker i todimensionelle materialer. Efter at have færdiggjort sin ph.d. på Aarhus Universitet rejste han til Berkeley i Californien for at arbejde på Lawrence Berkeley National Laboratory. Her var han med til at udvikle en ny teknologi til at "tage billeder" af elektroniske egenskaber i materialer med atomar tykkelse. En teknologi han tog med sig tilbage til Danmark, da han i 2017 blev ansat som adjunkt på Aarhus Universitet. Søren Ulstrup leder nu sin egen forskningsgruppe, som forsker i udvikling og produktion af nye, ultratynde materialer.

Søren Ulstrup har modtaget en Sapere Aude-bevilling fra Danmarks Frie forskningsfond, Natur og Univers til at forske i grundvidenskabelige spørgsmål, der knytter sig til fænomener, der opstår i stakke af 2D-materialer, herunder superledning.

dere, men fælles for dem alle er, at de kun fungerer superledende ved ekstremt lave temperaturer.

»De fleste af dem skal køles ned til tæt på det absolutte nulpunkt – altså omkring $-273,15^{\circ}\text{C}$. Det er for det første enormt energikrævende at køle ned, og desuden er det umuligt at bygge en computer af superledere, som vi kan tage med os rundt, som vi er vant til med vores telefoner og bærbare.«

Søren Ulstrup håber dog på, at han kan designe materialet, så det fungerer superledende ved langt højere temperaturer.

Lige nu er der et globalt kapløb i gang om, hvem der først kan udvikle en superleder, der fungerer

ved almindelige temperaturer. Det er den hellige gral. Rent teoretisk burde det være muligt, men ingen har løst problemet endnu.

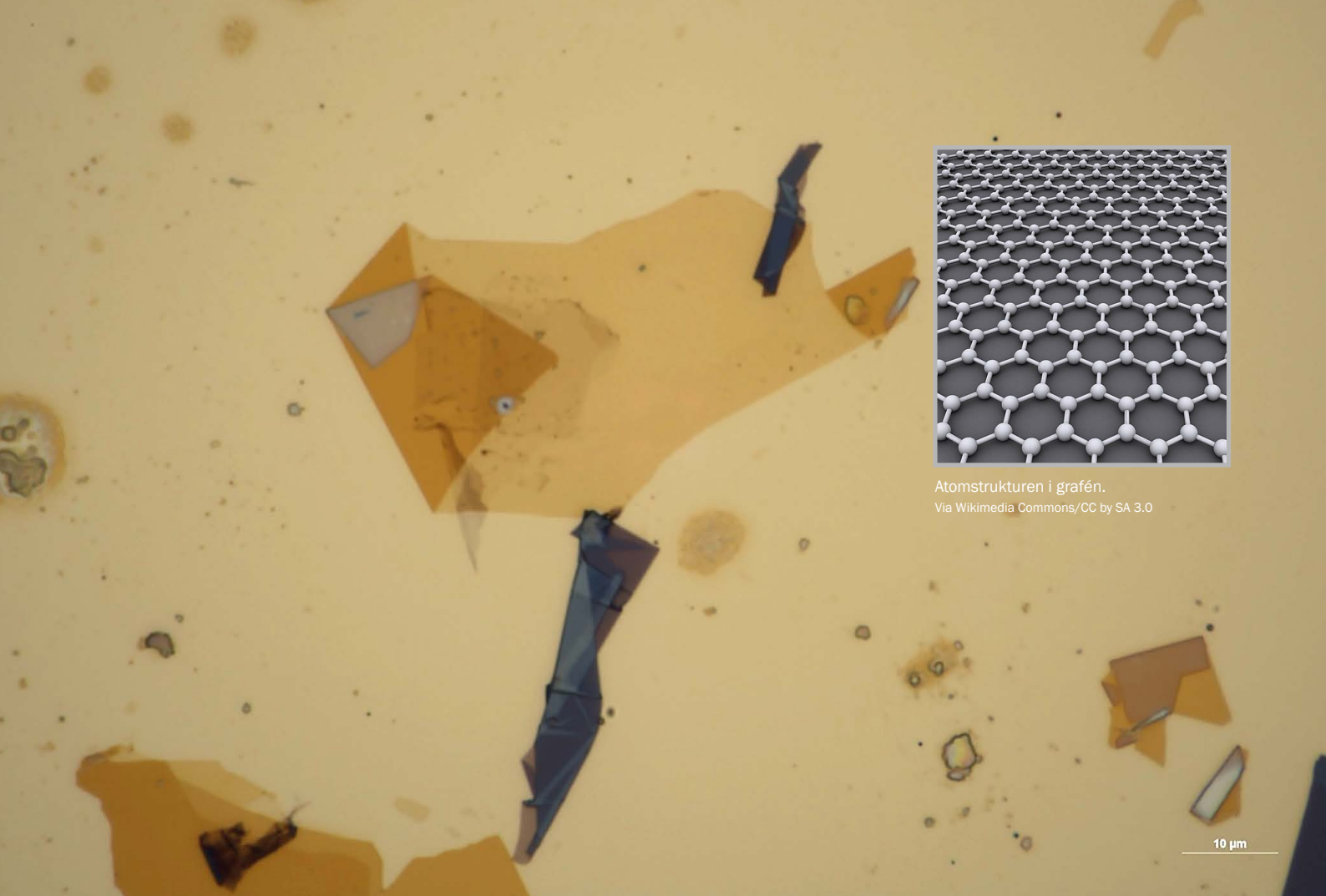
»Ved at fintune vores materiale, håber vi på at nærme os målet. Vi sigter efter at forbedre vores superleder, så den kun skal køles ned til $-196,15^{\circ}\text{C}$. Ved den temperatur kan man køle med flydende kvælstof i stedet for helium – og det er meget billigere.«

Superleder kan løse vores energikrise

Hvis det engang i fremtiden lykkes at udvikle en superleder, der fungerer ved normale temperaturer, vil det ikke blot revolutionere vores elektroniske apparater. Det vil praktisk talt gøre energi gratis, fortæller Søren Ulstrup.

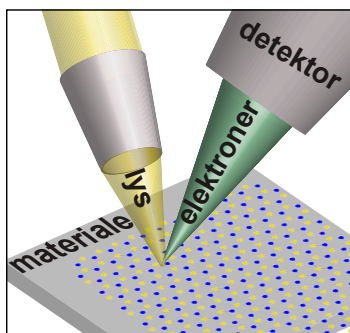


**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK



Atomstrukturen i grafén.
Via Wikimedia Commons/CC by SA 3.0

Et billede taget med mikroskop af grafénflager. Flagerne er lavet i Søren Ulstrups laboratorium, og er et eksempel på de materialer, de eksperimenterer på, for at udvikle fremtidens superledere.



For at teste om der er opnået den helt rigtige vinkel mellem de to lag, bestråler man efterfølgende materialet med stråling fra Aarhus Universitets partikelaccelerator. Vi visualiserer elektronernes tilstand i materialet ved hjælp af strålingen. Hvis elektronerne har en "flad" energifordeling, har vi optimale betingelser for at stabilisere en superledende tilstand.

»Får vi udviklet et materiale, der både er billigt og superledende ved almindelige temperaturer, vil strømtabet være så lille, at computere og telefoner nærmest aldrig vil skulle oplades. Det vil fuldstændig ændre den måde, verden fungerer på. Pludselig vil vi vælte os i

billig energi. Det er ikke blot godt for os, men også for klimaet.«

Men der er lang vej endnu. Forskningen i superledere kan sammenlignes med en rutsjebanetur. Der har været enkelte nedkørsler, hvor vi virkelig har haft fart på de seneste 100 år, men de har hver gang været efterfulgt af lange og seje opkørsler med at finde bedre teorier og materialer. Endnu går jagten på at udvikle det helt rigtige materiale, og Søren Ulstrup tør ikke spå om, hvornår det store gennembrud kommer.

»Der kan gå årtier. Måske mere. Vi roder med universets helt basale byggesten her. Når det foregår på atomart niveau, er forskningen langsom og tidskrævende. Man skal nok væbne sig med tålmodighed.«

Endnu et uløst mysterium

Det var først i 2018, at en gruppe forskere opdagede, at man kunne

omdanne grafén til en superleder ved at rotere to plader i forhold til hinanden.

Forskergruppen kunne dog ikke forklare, hvorfor det skete. Det mysterium satte Søren Ulstrup sig for at løse for fem år siden, og i dag er han kommet et skridt nærmere på en forklaring.

»Med vores forsøgsopstilling kan vi registrere, hvad der sker inde i materialet, når det bliver superledende. Ved at bombardere de to lag med lys fra Aarhus Universitets partikelaccelerator, ASTRID2, kan vi med en detektor måle, hvilke kvantemekaniske tilstande elektronerne befinder sig i.«

»Sagt simplere kan vi se, hvordan elektronerne bevæger sig rundt om atomkernerne i materialet. I superledende materialer opstår der det, vi kalder Cooper-par – og det sker også her. Hvorfor det netop sker

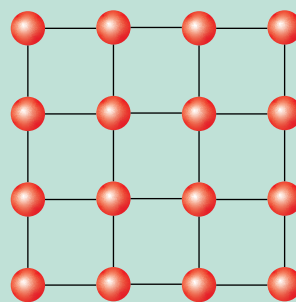
Cooper-par

I 1911 opdagede den hollandske forsker Heike Kamerlingh Onnes, at den elektriske modstand i kviksølv forsvinder, når det bliver kølet ned til $-268,96\text{ }^{\circ}\text{C}$. Det bliver med andre ord forvandlet til en superleder.

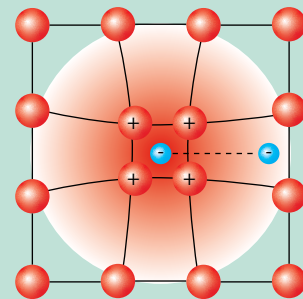
I mange år kunne ingen forskere forklare, hvorfor det skete. Man kunne blot måle det. Indtil 1956. Det år udviklede den amerikanske fysiker Leon Cooper en teori om, at elektroner kan danne par over meget lange afstande i materialer – og dermed befinde sig i den samme kvantemekaniske grundtilstand. Den fuldstændige teori om disse såkaldte Cooper-par udviklede Leon Cooper i samarbejde med John Bardeen og John Robert Schrieffer i 1957. Den blev døbt BCS-teorien efter initialerne i deres efternavne. BCS-teorien er bredt accepteret som grundlaget for lav-temperatur-superledning, og de tre modtog Nobelprisen i fysik i 1972.

Det centrale i BCS-teori er forklaringen på, hvordan to elektroner under særlige betingelser kan danne par. Normalt frastøder elektroner hinanden, fordi de har samme negative ladning. En elektron kan dog tiltrække de omkringværende positivt ladede atomkerner, hvilket skaber en "sky" af positiv ladning omkring elektronen, som kan virke tiltrækkende over lange afstande på en anden elektron (se figur).

Normal struktur



Struktur med cooper-par



Strukturen af materialer er beskrevet ved atomer (røde cirkler), der er bundet til hinanden i en perfekt gitterlignende struktur (figur til venstre). Til højre ses en situation, hvor en elektron (blå) har forvrænget gitteret og dannet et cooper-par med en anden elektron.

Når Cooper-par fører til, at et materiale bliver superledende, sker det, fordi elektronerne ikke længere kolliderer med hinanden, med vibrationer i atomgitteret eller med urenheder i materialet. Det er nemlig disse kollisioner, der skaber elektrisk modstand. Fordi elektronerne i en superleder alle befinder sig i samme grundtilstand, kolliderer de ikke, men strømmer roligt og parvist rundt.

ved den vinkel, kan vi endnu ikke forklare.»

Ekstremt følsomme målinger

For at Søren Ulstrup og hans kolleger kan måle, hvordan elektronerne opfører sig inde i det ultratynde materiale, må de arbejde i vakuum. Selv enkelte molekyler fra luften i rummet kan forstyrre måleudstyret, som er ekstremt følsomt.

»Vores forsøg fungerer kun under det, vi kalder for ultrahøjt vakuum. Derfor har vi bygget det her vakuumkammer,« siger han og peger på det tårn af instrumenter, han tidligere var bøjet ind over.

»Den summende lyd stammer fra en masse pumper, der hele tiden holder kammeret fri for luft og andre gasser. Trykket derinde er 10^{-10} millibar. Det svarer til 10^{-13} af trykket ved jordoverfladen. Så lavt et tryk, at man skal ud forbi den

Hvad er superledere?

Superledere er materialer, der kan lede strøm uden varmespild. Det betyder, at når man først sender strøm ind i et kredsløb af superledere, vil strømmen i teorien drøne rundt i materialet i en uendelighed.

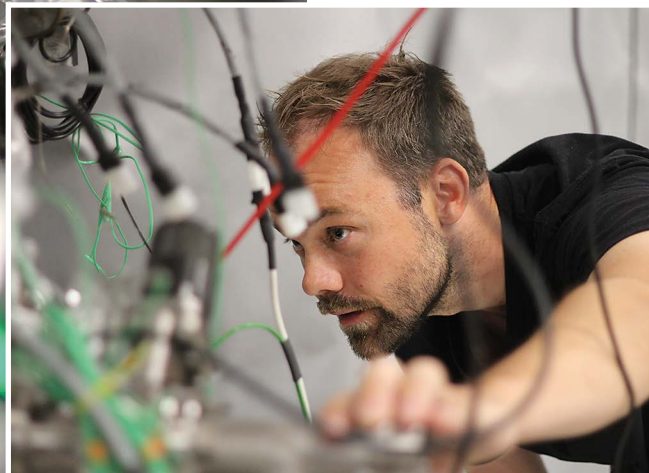
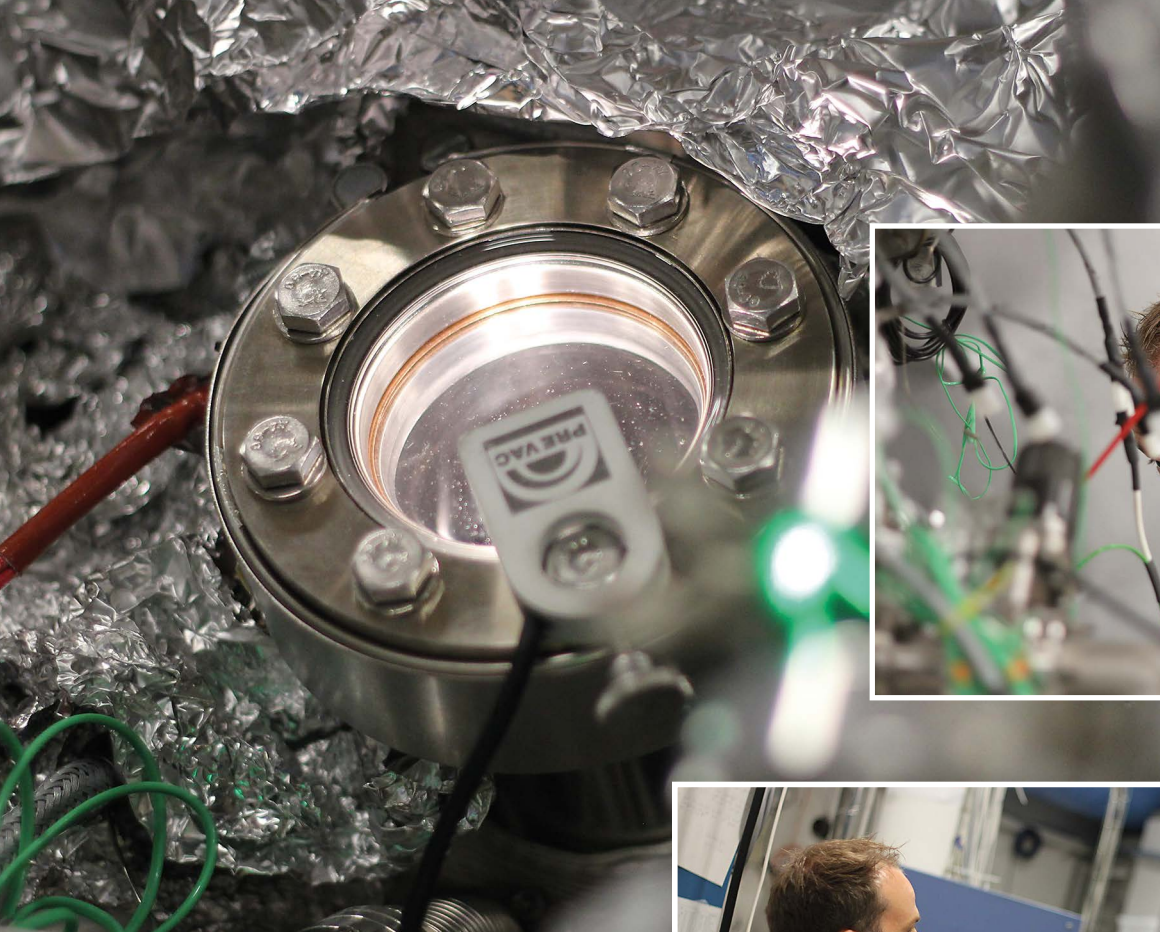
I almindelige kredsløb, eksempelvis vores computere og telefoner, taber materialet hele tiden energi i form af varme. Det er derfor computeren bliver varm og skal køles – og jo mere strøm den bruger, desto varmere bliver den.

I dag ved vi, at superledere opstår, fordi elektronerne i materialet danner Cooper-par. Men fordi den tiltrækkende vekselvirkning mellem de to elektroner gennem forvrængningen af atomkernerne er meget svag, kan Cooper-par nemt ødelægges igen. Det kræver blot, at materialet tilføres små mængder energi – eksempelvis i form af varme. Superledning forekommer derfor oftest ved ekstremt lave temperaturer.

I 1986 opdagede forskere de såkaldte højtemperatur-superledere. Det er superledere, der fungerer ved temperaturer over $-196,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Netop den grænse er sat, fordi det er ved den temperatur, nitrogen (kvælstof) bliver flydende. Den nuværende rekord for en fungerende superleder er på $-139\text{ }^{\circ}\text{C}$. Den blev opnået i komplekse kobberoxider. Der findes endnu ikke en bredt accepteret teoretisk forklaring på højtemperatur-superledning. Fysikere er enige om, at der også dannes Cooper-par i disse materialer, men det er endnu ukendt, hvordan de dannes – og hvorfor de ikke går i stykker ved høje temperaturer.



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

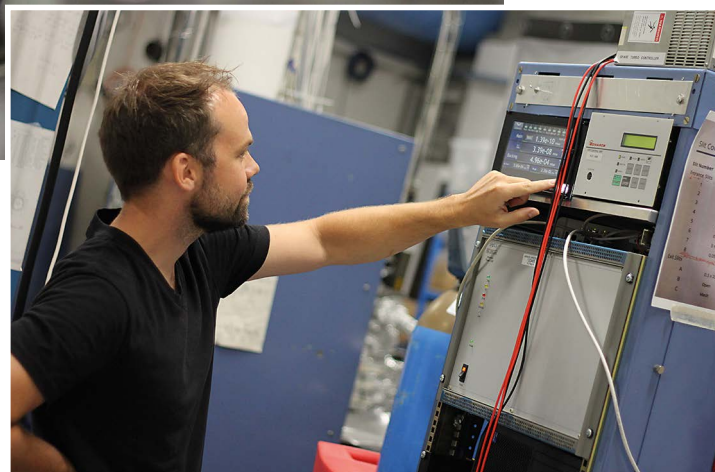


Fotos: Jeppe Kyhne Knudsen

Et nærbillede af et inspektionsvindue til vakuumkammeret. Det er nødvendigt for Søren Ulstrup og hans hold at kunne følge med i, at alt er som det skal være inde i kammeret.

Øverst til højre: Søren Ulstrup tjekker op på vakuumkammeret. Hans forsøg kræver, at han konstant skal være over kammeret og tjekke, at alt er okay. Det er svært at opretholde et ultrahøjt vakuum, og kun små ting skal gå galt, før et forsøg må tages om.

Nederst: Søren justerer det udstyr, som styrer vakuumkammeret.



Videre læsning:

Podcast på Videnskab.dk: Strøm uden energitab...

Om "twistronics" og superledning i grafen: Cao, Y., Fatemi, V., Fang, S. et al. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. Nature 556, 43–50 (2018).

Formidlingsartikel: quantamagazine.org/how-twisted-graphene-became-the-big-thing-in-physics-20190430/

Aktuel artikel i Science: Jeong Min Park et al. , Experimental evidence for nodal superconducting gap in moiré graphene. www.science.org/doi/10.1126/science.adv8376

Ny formidlingsartikel i Chemistry World: New evidence sheds light on mystery of 'magic-angle' graphene's superconductivity.

Nobelprisen i fysik i 2010: nobelprize.org/prizes/physics/2010/press-release/

internationale rumstation, 400 km ude i rummet, for at opnå noget tilsvarende.»

Pumperne suger stort set alle gaspartikler ud. Lige på nær hydrogen, som kan trænge gennem næsten alt – også metalvægge.

»For at holde hydrogenatomerne væk, har vi installeret ionpumper, som anvender højspænding til at fange restgasser af hydrogen i væggene af vakuumkammeret.«

Det tog Søren Ulstrup flere år at få samlet, tilpasset og kalibreret vakuumkammeret. Men nu fungerer det, og han kan lave nøjagtige forsøg med de ultratynde materialer for at blive klogere på, hvad der præcist sker, når de bliver superledende.

»Vi håber, at vi løbende kan lave små justeringer af materialet, så det bliver superledende ved højere temperaturer. Det er det, vi arbejder på lige nu. Eksempelvis afprøver vi forskellige rotationsvinkler, og vi eksperimenterer også med andre materialer såsom wolfram.«

Et eftertragtet materiale

Vi har sat os på Søren Ulstrups kontor. Et grønt skær fra træerne i universitetsparken under os, fylder det lille kontor. På reolerne ligger grundbøger i fysik, godt slidte efter gentagne opslag gennem årene. En computer fylder skrivebordet, og rundt omkring ligger et par stakke papirer. Ellers er kontoret overraskende tomt. En kontrast til laboratoriet i kælderens med ledninger, rør og dioder, der stak ud overalt i, hvad der virkede som rent kaos.

Søren kigger drømmende ud ad vinduet. Han er lige nu ved at søge penge til at omsætte sin forskning til en forretning. Et såkaldt spin-out. For der er mange, der gerne vil have fat i det ultratynde materiale, forklarer han.

»Vi er et af de eneste steder i verden, der kan lave det. Der findes måske en håndfuld steder på verdensplan, men vi kan nogle specielle tricks, som giver materialer af meget høj kvalitet.

Planen er i første omgang at sælge materialet til andre laboratorier. Ikke blot vil det være en god forretning, det vil også hjælpe forskningen på feltet fremad, da flere vil få adgang til at lave forsøg med det. Jeg håber, at det lykkes for os. ■