

Fra Fysikkens Verden

NR. 4 – 2020
82. ÅRGANG

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP



Karbonfangst og -lagring

Les også om:

- Nobelprisen i fysikk 2020
- PEDOT
- Fusjonsenergi

Nr. 4 – 2020

82. årgang

Utgiver:

Norsk Fysisk Selskap
www.norskfysisk.no

Redaktører:

Professor Øyvind Grøn
OsloMet – storbyuniversitetet
E-post: oyvind.gron.no@gmail.com

Professor Emil J. Samuelsen
Institutt for fysikk, NTNU
E-post: emil.samuelsen@ntnu.no

Redaksjonssekretær:

Maria Hammerstrøm
Realfagsbiblioteket, UiO
E-post: maria.hammerstrom@astro.uio.no

Redaksjonskomité:

Professor Odd-Erik Garcia, Institutt for fysikk, UiT
Professor Ellen K. Henriksen, Fysisk institutt, UiO
Professor Per Osland, Inst. for fysikk og teknologi, UiB

Layout og sats:

Maria Hammerstrøm

Trykkeri:

Oslo Sats, repro og montasje A/S

Abonnere:

Fra Fysikkens Verden kommer ut fire ganger årlig.
Abonnement tegnes på følgende postadresse
eller e-post:

Fra Fysikkens Verden
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo
Boks 1048 Blindern, 0316 Oslo

E-post: nfs.styret@gmail.com

Årsabonnement: 200 kr. (studenter 100 kr.)
Bankgiro: 7878.06.03258

Retningslinjer for bidragsyttere

Fra Fysikkens Verden (FFV) utgis av Norsk Fysisk Selskap og sendes til alle medlemmer. Disse er vanligvis utdannet fra universiteter og høyskoler med fysikk i sine fagkretser. Andre kan også abonnere på bladet. Blant disse er elever og biblioteker ved videregående skoler.

Frist: Bladet gis ut fire ganger i året: mars, juni, oktober og desember. Tidsfristene for stoff er: 1. februar, 1. mai, 1. september og 1. november. Opplaget er for tiden 1400.

Formål: Formålet med *FFV* er å gi informasjon om aktuelle tema og hendiger innen fysikk, og å bygge bro mellom forskere, fysikklærere, studenter og andre interesserte. Ikke minst ønsker *FFV* å være til hjelp for elever og lærere i videregående skole og andre undervisningsinstitusjoner. Dette krever at artikler og annet stoff er skrevet på norsk og på en lett forståelig måte. Faguttrykk må defineres. En verbal form er oftest å foretrekke fremfor matematikk. Men det må brukes standard begreper og enheter. Matematikken må være forståelig for fysikkstudenter. Artiklene i *FFV* skal primært gi informasjon til dem som er utenfor det aktuelle fagfeltet. Artikler som bare forstås av en liten faggruppe har ingen plass i bladet. Alt stoff blir vurdert redaksjonelt, og redaksjonen forbeholder seg rett til å foreta mindre endringer.

Filformat: Manuskripter leveres i en form som forfatteren mener er direkte publiserbar. De skal levers elektronisk som e-post, og i et rent tekstformat (for eksempel Word), slik at redaksjonen kan redigere teksten direkte. Dersom manuskriptet inneholder matematiske ligninger, skal manuskriptet også leveres som PDF.

Lengde: Artikler bør ikke være lengre enn 6 sider med trykt tekst og figurer. Større avsnitt i teksten bør markeres med undertitler. Unngå fotnoter. Referanser kreves ikke, men det er ønskelig med en liste over lett tilgjengelig tilleggsstoff.

Småstykker: Gratulasjoner, nekrologer, bokomtaler, skolestoff, møterefater og lignenede mottas gjerne, men de må ikke være lengre enn 1–2 sider. Doktoromtaler begrenses til en halv side inkludert bilde.

Illustrasjoner: Legg mye omtanke i figurer, ettersom de er en viktig del av en artikkel. All figurtekst skal være på norsk. Figurene bør være av god oppløsning. Figurer og tabeller skal være referert i den løpende teksten. Hvis forfatterne selv ikke har laget figurene, skal opprinnelsen oppgis. Forfatterne må selv innhente tillatelse til bruk av slike illustrasjoner.

Korrektur: Forfatterne får tilsendt korrektur når layout er satt opp som må returneres snarest. Det må ikke gjøres unødige endringer i korrektur.

Innhold

Frå redaktørane *Emil J. Samuelsen* 67

Fysikknytt

Fusjonsenergi om 5 år? *Øyvind G. Grøn* 68

Artikler

Nobelprisen i fysikk 2020 *Øystein Elgarøy* 72

PEDOT – ein spesiell elektrisk polymer *Emil J. Samuelsen* 74

CO₂-fangst og lagring i geologiske formasjoner *Anne Schad Bergsaker* 78

Småstoff

Kelvin i det nye SI-systemet *Øyvind G. Grøn* 77

Doktorgrad: Nikolai Fomin 81

Bokomtale: *Den lille boka om universet* *Carl Angell* 82

In memoriam: Tore Olsen *Kristian Fossheim* 83

FRÅ REDAKTØRANE

Fusjonsreaktor og karbonfangst

Dette nummeret av *FFV* tar opp to viktige aspekt av energi- og klimaspørsmål: Greier vi å ta i bruk ei utømmelig energikjelde, og greier vi å kvitte oss med avfallsstoff frå fossilbasert energi?

Fusjonsbaserte kjernereaktorar skal i teorien kunne vere utømmelig. Men forskarane har strevd med fusjon i over femti år utan å få kontroll med prosessen, og framtidsutsiktene ser ikkje spesielt lyse ut. Ingen reaktor er blitt framskaffa til no som gir ut overskot av produsert energi, og fem nye år vil ikkje monne stort.

Det andre spørsmålet gjeld måtar å kvitte seg med karbondioksid CO₂ frå fossile energikjelder. Artikkelen om lagring gir nyttige og detaljerte beskrivelsar for korleis vi kan gå fram. Men årleg blir det deponert til atmosfæren 36 milliadar tonn CO₂ på jorda, av det 43 millionar tonn (1,2 ‰) her i landet. Det planlagte NORSEM-prosjektet skal ta 0,4 millionar tonn per år. Så kan pessimistane gjere overslag over kor mange NORSEM-anlegg som trengst for å ta unna til dømes halvparten av utsleppet på jorda.



Øyvind G. Grøn



◀ Emil J. Samuelsen

Fusjonsenergi om 5 år?

I et spesialnummer av *Journal of Plasma Physics* publisert 29. september i år presenteres status av et prosjekt for å produsere elektrisk energi ved hjelp av en tokamak fusjonsreaktor. Planen er at første fase – å få ut mer energi fra reaktoren enn den må tilføres, skal fullføres i løpet av 2025. Andre fase – å bruke en tilsvarende, men større reaktor til å produsere elektrisk energi i et fusjonskraftverk, er planlagt fullført i 2035.

Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

For at det skal skje fusjon av atomkjerner – at to kjerner slår seg sammen og danner kjernen til et tyngre grunnstoff – må den elektriske frastøtningen mellom kjernene overvinnnes. Denne frastøtningen kalles Coulomb-barrieren.

Det satses i første omgang på å produsere et enormt varmt plasma der deuterium og tritium fusjonerer til helium (figur 1).

Energien som må tilføres for å få atomkjernene til å fusjonere, er den potensielle energien to atomkjerner har når de berører hverandre. Dersom antall protoner i en deuterium- og en tritiumkjerne er henholdsvis Z_D og Z_T , er coulomb-energien

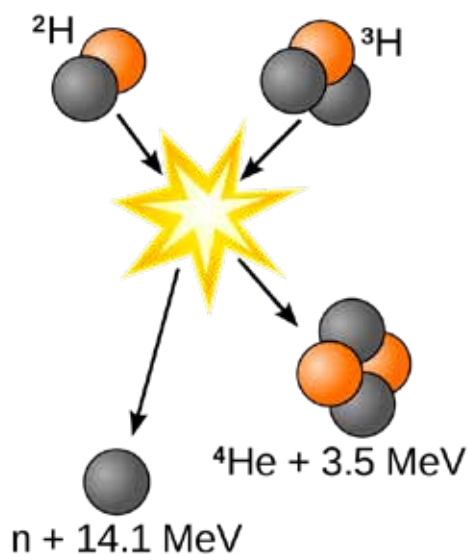
$$W_c = \frac{Z_D Z_T e^2}{4\pi\epsilon_0 r}, \quad (1)$$

der ϵ_0 er permittiviteten til tomt rom, e er elementærladningen og r kalles vekselvirkningsavstanden. Det er avstanden der den elektriske frastøtningen mellom kjernene og tiltrekningen på grunn av den sterke kjernekräften er like store. Vekselvirkningsavstanden er

$$r = A^{1/3} r_0, \quad r_0 = 1,25 \cdot 10^{-15} \text{ m}, \quad (2)$$

der A er summen av antall protoner og nøytroner i kjernen (massetallet), og konstanten r_0 er definert slik at likning (1) er oppfylt. For deuterium er $Z_D = 1$, $A_D = 2$, og for tritium $Z_T = 1$, $A_T = 3$. Dette gir vekselvirkningsavstanden $r_D = 1,56 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ for deuterium og $r_D = 1,80 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ for tritium. Innsetting av radien til deuterium i formel (1) gir coulombenergien $W_c = 280 \text{ keV}$ som svarer til temperaturen 3 milliarder Kelvin.

Man må tydeligvis ha et plasma med enormt høy temperatur for å overvinne Coulomb-barrieren. Den maksimale temperaturen man regner



Figur 1. Illustrasjon av at deuterium og tritium fusjonerer til helium. De grå kulene representerer nøytroner og de røde protoner. Ved hver slik reaksjon frigjøres et nøytron og energien 17.6 MeV.

med å kunne oppnå i plasmaet i en tokamak-reaktor (presentert nedenfor) er omtrent 200 millioner Kelvin, under en tidel av temperaturen som svarer til energien i Coulomb-barrieren. Dermed virker det ganske håpløst å få tokamak-reaktoren til å fungere.

Men det er to faktorer som gjør at det likevel er mulig.

1. Kvantemekanisk tunnelering demper kravet til høy temperatur.
2. I plasmaet har de ladde partiklene ulik hastighet. Noen har så høy fart at de greier å passere Coulomb-barrieren. Beregninger har vist at en tokamak med høy nok tetthet av plasmaet kan gi opphav til fusjon for temperaturer rundt 150 millioner grader.

Deuterium er stabilt og utgjør omtrent 0,03 % av hydrogenmassen i havet. Men tritiumisotopen av hydrogen er radioaktiv med en halveringstid på bare 12,3 år, så det eksisterer praktisk talt ikke noe tritium i naturen.

For å oppnå tilstrekkelig med tritium som brensel i en deuterium-tritium fusjonsreaktor, omdanner man derfor først litium til tritium ved nøytroninnfangning. Årsaken til at man ikke satser på deuterium-deuteriumfusjon er at sannsynligheten er 50 ganger større for en deuterium-tritiumreaksjon enn for en deuterium-deuteriumreaksjon. I forsøksreaktorer vil man derfor benytte deuterium-tritiumfusjon. Men med kraftigere elektromagneter enn vi kan produsere i

dag, vil tokamak-reaktorer for deuterium-deuteriumfusjon være det beste alternativet.

Lawsonkriteriet

Kriteriet for å få til en kontrollert fusjon med energigevinst kalles Lawsonkriteriet og er oppkalt etter den britiske fysikeren John David Lawson som publiserte det i 1957. Det sier at produktet av tettheten n av ladde partikler i plasmaet, innesperringstiden t og plasmaets temperatur T må være tilstrekkelig stort. For en reaktor som fusjonerer deuterium og tritium, er Lawsonkriteriet

$$ntT \geq 3,5 \cdot 10^{20} \text{ sK/m}^3. \quad (3)$$

Med en temperatur $T = 1,5 \cdot 10^8 \text{ K}$ gir Lawsonkriteriet $nt \geq 2,3 \cdot 10^{20} \text{ s/m}^3$. Dette kriteriet er til nå ikke blitt oppfylt for noen reaktor.

Tokamak fusjonsreaktorer

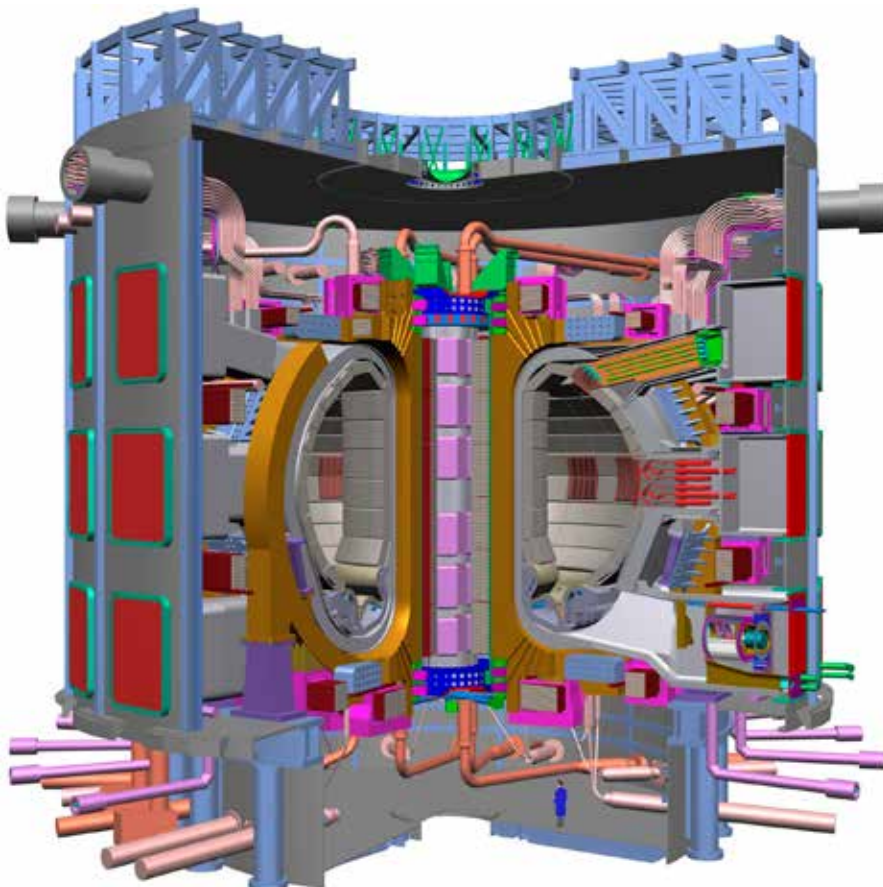
Ordet 'tokamak' er en forkortelse av «Toroidalnaya Kamera i Magnitnaya Katushka», 'smultringformet kammer med magnetiske spoler' på russisk. Tokamak-reaktoren ble opprinnelig designet av de russiske fysikerne Igor

Tamm og Andrei Sakharov rundt 1950. De første tokamak-reaktorene ble bygget i Russland i 1950-årene. Den største tokamak-reaktoren som nå er under konstruksjon, er ITER-reaktoren (se figur 2) som vi bli presentert nedenfor.

En tokamak er en fusjonsreaktor med et smultringformet kammer der et varmt plasma holdes innesperret ved hjelp av et kraftig magnetfelt. Dette kalles *magnetisk innesperring* (på engelsk «magnetic confinement»). For at ikke plasmaet skal avkjøles ved kontakt med veggene i kammeret, må magnetfeltet være så sterkt at plasmaet unngår å være i fysisk kontakt med veggene.

Årsaken til smultringformen er at man da unngår endeflater der magnetfeltet er svakere, og hvor plasmaet ville lekket ut fra kammeret. Det krevde et betydelig utviklingsarbeid å konstruere et system av elektromagneter som sørget for både innesperring av det enormt varme plasmaet og at det oppførte seg på en stabil måte. Omkring 1960 var disse tekniske utfordringene overvunnet og en fungerende tokamak konstruert.

Men det viste seg å være mye vanskeligere enn man hadde forutsett å konstruere en reaktor som gir ut mer atomenergi enn man må tilføre den for



Figur 2. ITER-tokamak fusjonsreaktoren. Den bygges i Saint-Paul-lès-Durance i Frankrike. Størrelsen av reaktoren er vist ved en person på gulvet. (Illustrasjon: U.S. Department of Energy)

å holde den gående. Fortsatt eksisterer det i 2020 ingen reaktor hvor dette er oppnådd. Men både ITER og SPARC er designet for å klare det.

ITER

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) er et internasjonalt prosjekt som går ut på å bygge en tokamak-reaktor for å frigjøre atomenergi ved fusjon av deuterium og tritium til helium (figur 1). Den er en forskningsreaktor som ikke er konstruert for å produsere elektrisk strøm. Den bygges i Frankrike. Dimensjonene er enorme (figur 2). Total høyde er 73 m.

Reaktoren veier 23 tusen tonn. Kamrene med plasma har et volum på 840 m^3 . Plasmaet i de smultringformede kamrene vil ha en arbeidstemperatur på 150 millioner grader. Reaktoren vil frigjøre atomenergi med en effekt på 500 MW i pulser med varighet på mellom 400 s og 600 s.

Planen er at reaktoren skal fylles med plasma i 2025. Så kommer en ti år lang periode med testing og forskning. Reaktoren skal være klar til full ytelse i 2035.

Figur 3. SPARC fusjonsreaktoren er en tokamak som er mer kompakt enn ITER. (Illustrasjon: T. Henderson, CFS/MIT-PSFC)

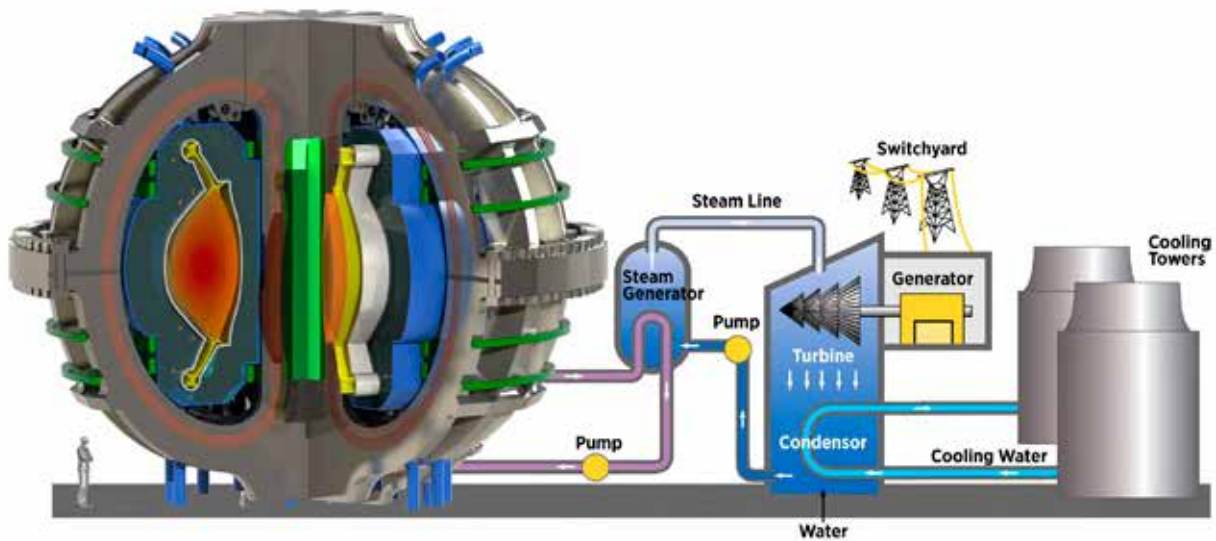
SPARC

SPARC (Soonest/Smallest Private-Funded Affordable Robust Compact) er et prosjekt der det skal bygges en mindre fusjonsreaktor enn ITER (figur 3). Ved å utnytte de siste årenes gjennombrudd i produksjon av superledende magneter skal den likevel gi ut mer energi enn den tilføres. Den skal ha omtrent en tredjedel av ytelsen til ITER. I tillegg er det i dette prosjektet planlagt at fusjonsenergien fra en større reaktor skal brukes til å produsere elektrisk strøm.

Det hele er et prosjekt sprunget ut fra fusjonsforskning som har foregått ved Massachusetts Institute of Technology (MIT) siden begynnelsen av 1990-årene. Der ble det bygget en forskningsreaktor kalt C-mod i 1993. I 2017 ble det etablert et privat firma, Commonwealth Fusion Systems (CFS), med privat finansiering som samarbeider med MIT om utviklingen av et fusjonskraftverk.

En fordel SPARC vil ha i forhold til ITER, er at SPARC vil bruke høy-temperatur superledende magneter som bare har vært kommersielt tilgjengelige de siste 5 årene, lenge etter at ITER ble påbegynt. Magnetene består av stål der det er limt superledende materiale av yttrium-barium-kopper oksid på overflaten. SPARC-magnetene kan produsere mye sterkere magnetfelter enn magnetene i





Figur 4. En fusjonsreaktor kalt ARC skal levere energi til et fusjonskraftverk. (Illustrasjon: CFS/MIT-PSFC)

ITER. De er designet for en maksimal magnetisk flukstetthet på 21 Tesla, mens ITERs magneter klarer 12 Tesla. Til sammenlikning har jordas magnetfelt en flukstetthet på en femti milliondeler av en Tesla.

Desto sterkere magnetfeltet i plasmaet er, jo mindre kan reaktoren være og likevel oppfylle Lawsonkriteriet. Plasmakammeret i SPARC vil ha omtrent tredjeparten av diameteren til ITER. Dette gir en vesentlig reduksjon i vekt, kostnader og byggetid i forhold til ITER.

Reaktoren vil frigjøre atomenergi med en effekt på 140 MW i 10 sekunders pulser. SPARC er designet for å produsere mellom 2 og 10 ganger mer atomenergi enn den energien som må tilføres reaktoren for å opprettholde fusjonsprosessene.

Arbeidet med å utvikle magnetene slik at de passer med spesifikasjonene til SPARC, har for tiden første prioritet i prosjektet og ventes å være fullført i 2021. Da starter byggingen av SPARC-reaktoren som etter planen skal være fullført i 2025. Så starter byggingen av en større tokamak enn SPARC, kalt ARC, og av et fusjonskraftverk som er planlagt ferdig i 2035.

Fusjonskraftverk

Konseptet for et fusjonskraftverk er vist i figur 4.

SPARC vil bli konstruert for å oppnå et 'brennende plasma'. Det betyr at fusjon frigjør atomenergi der en del av energien brukes til å

varme opp plasmaet slik at det ikke blir nødvendig å tilføre energi utenfra for å holde fusjonsprosessen gående. Forskerne skriver at dette er nødvendig for å lykkes med det neste steget – å bygge et kraftverk basert på atomeenergi frigjort i en fusjonsreaktor.

Forskningsarbeidet som rapporteres i de syv artiklene publisert 29. september 2020 i *Journal of Plasma Physics*, danner et vitenskapelig grunnlag for det videre arbeidet med utviklingen av høytemperatur superledende magneter for en tokamak og konstruksjonen av fusjonsreaktoren SPARC. Ifølge rapportene er de i rute til å starte byggingen av denne sommeren 2021. ■

Referanse

3. Spesialnummer av *Journal of Plasma Physics*, 86, 861860501, publisert 29. september 2020 med leder av Martin Greenwald og syv vitenskapelige artikler. Nummeret er fritt tilgjengelig på adressen: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-plasma-physics/article/status-of-the-sparc-physics-basis/B21625B93C0654B955B776566C96DF6B>

Husk å melde adresseendring til
nfs.styret@gmail.com



Nobelprisen i fysikk 2020

Nobelprisen i fysikk 2020 er gitt til Roger Penrose for «oppdagelsen av at dannelsen av svarte hull er en robust forutsigelse i den generelle relativitetsteorien», og til Andrea Ghez og Reinhard Genzel for «oppdagelsen av et supermassivt kompakt objekt i sentrum av vår galakse».

Øystein Elgarøy Institutt for teoretisk astrofysikk, UiO

Del 1: Penrose og matematikken bak sorte hull

I 1916 fant Karl Schwarzschild en løsning av den generelle relativitetsteorien som beskriver krumningen av tidrommet utenfor en kuleformet, ikke-roterende massefordeling. Den hadde to singulariteter, det vil si steder der løsningen divergerte: én i sentrum, og én ved en radius $R_s = 2GM/c^2$, kalt Schwarzschild-radien. Her er M massen, G er Newtons gravitasjonskonstant og c er lysfarten i tomt rom. Betydningen av denne andre singulariteten var uklar, men i 1939 viste Robert Oppenheimer og Harland Snyder at en samling av partikler som kollapset til en radius mindre enn Schwarzschildradien ikke lenger ville kunne kommunisere med universet utenfor. Lys ville ikke slippe ut fra området innenfor Schwarzschild-radien. En observatør som fulgte den kollapsende materien ville derimot se at all massen endte opp i ett punkt, singulariteten i sentrum. Det ble spekulert i om tunge stjerner ville ende livene sine som slike svarte hull, som disse objektene ble kjent som senere. Oppenheimer hadde også vist, sammen med George Volkoff at det fantes en øvre grense for massen til nøytronstjerner. Hvis de overskred denne, kunne ingen kjente krefter hindre fullstendig kollaps.

En svakhet med arbeidet til Oppenheimer og Snyder var at de antok at kollapsen foregikk kulesymmetrisk, det vil si at den hendte helt radielt. Virkelighetens stjerne-kollaps er langt mer kompliserte, blant mye annet fordi stjerner roterer. Det var derfor mange som mente at i realistiske tilfeller ville det være fysiske prosesser som hindret en total kollaps. Fordi Einsteins feltligninger er

kompliserte, ikke-linære differensialligninger, var det svært vanskelig å studere mer generelle tilfeller enn det kulesymmetriske. Det var her **Roger Penrose** kom inn.

Roger Penrose utviklet matematiske teknikker som gjorde det mulig å studere strukturen til løsningene av feltligningene i tilfeller der de ikke kan løses eksplisitt. I en artikkel publisert i 19651 viste han, uten antagelser om symmetrier, at hvis det under kollapsen dannes et område som lys ikke kan slippe ut av, vil kollapsen være total. Alt som kommer innenfor Schwarzschildradien vil ende opp i den sentrale singulariteten, som er et punkt der tiden slutter. Under svært generelle betingelser er derfor total kollaps til et svart hull uunngåelig når kollapsen har nådd langt nok. Penrose viste dermed at eksistensen av svarte hull var en mulighet som må tas alvorlig.

Del 2: Ghez' & Reinhard's observasjoner av et supermassivt sort hull

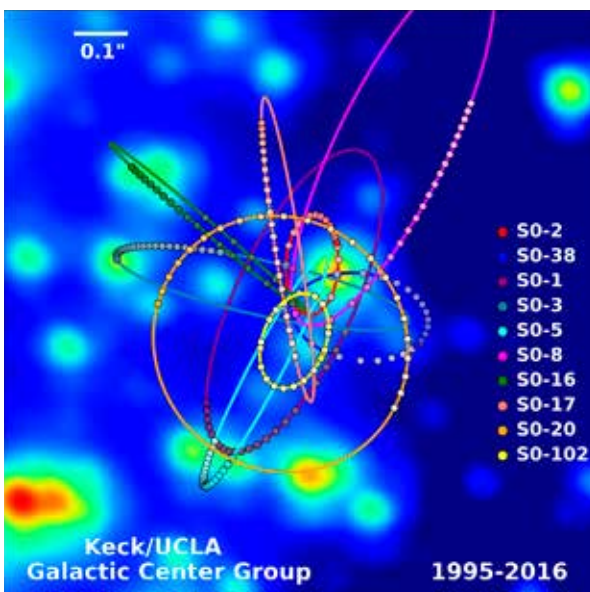
At svarte hull eksisterer teoretisk garanterer imidlertid ikke at de finnes i virkeligheten. På 1960-tallet ble det klart at kvasarer best kunne forklares ved at det i sentrum av mange galakser finnes supermassive svarte hull med masser fra noen millioner til flere milliarder ganger solens. Finnes det et slikt i sentrum av vår egen galakse? Fra 1990-tallet ledet **Andrea Ghez** og **Reinhard Genzel** hver sin forskergruppe som begge hadde som mål å svare på dette spørsmålet. De har gjennomført nøyaktige målinger av bevegelsene til stjerner nær sentrum av galaksen, også kjent som Sgr A*. For å få til dette, måtte mange problemer løses. Interstellart støv gjør det umulig å obser-



Figur 1. Årest nobelprisvinnere i fysikk. Fra venstre: Roger Penrose, Reinhard Genzel og Andrea Ghez. (Illustrasjon: © Nobel Media/Niklas Elmehed)

vere sentrum med synlig lys. Dette ble løst ved å bruke infrarød stråling i stedet. Å følge stjerners bevegelse over lang tid er upraktisk fra rommet, så observasjonene ble gjort med bakkebaserte teleskoper. Gruppen til Ghez hadde Keck-teleskopet på Hawaii som sitt hovedinstrument, Genzels gruppe brukte ESOs teleskoper i Chile. Ved observasjoner fra bakken vil turbulens i atmosfæren gi forstyrrelser i signalet, og dette var et problem som prisvinnerne utviklet teknikker for å løse. I begynnelsen brukte de serier av bilder med veldig korte eksponeringstider. Fra årtusensskiftet ble adaptiv optikk tilgjengelig, der et referansesignal

Figur 2. Banene til åtte stjerner nær Melkeveiens sentrum. I bakgrunnen ses et bilde tatt av det sentrale området i 2016. (Illustrasjon: UCLA Galactic Center Group - W.M. Keck Observatory Laser Team)



sammen med justerbare speil brukes til å korrigere for atmosfæriske forstyrrelser.

Ved å følge bevegelsene til stjerner nær Sgr A* i flere tiår har gruppene til Ghez og Genzel etablert at det må være et objekt med masse på fire millioner solmasser innenfor et område mindre enn vårt solsystem nær sentrum av Melkeveien^{2,3}. Av kjente objekter er det bare et svart hull som kan forklare dette resultatet. Svarte hull er ikke bare en teoretisk mulighet, de er en observert realitet.

Forøvrig gikk også nobelprisene i 2017 og 2019 til arbeider innenfor astrofysikk. Dette viser den nære forbindelsen mellom studiet av fysikkens grunnleggende lover og universet på stor skala, og hvilken gyllen tid astrofysikken er inne i nå. ■

Referanser

1. R. Penrose. «Gravitational collapse and space-time singularities». *Physical Review Letters* (1965) vol. 14, no. 3, s. 57–59.
2. A. Ghez et al. «Measuring distance and properties of the Milky Way's central supermassive black hole with stellar orbits». *The Astrophysical Journal* (2008) vol. 689, no. 2, s. 1044–1062.
3. S. Gillessen, F. Eisenhauer, S. Trippe, T. Alexander, R. Genzel, F. Martins og T. Ott. «Monitoring stellar orbits around the massive black hole in the Galactic center». *The Astrophysical Journal* (2009) vol. 692, no. 2, s. 1075–1109.

PEDOT – ein spesiell elektrisk polymer

Nobelpris i kjemi for 2000 blei gitt for oppdaginga og utviklinga av organiske polymere materiale med elektrisk leiande og halvleiande eigenskapar. Av dei mange aktuelle materiala skal eg her beskrive materialet PEDOT, som kombinerer materialeigenskapar med høg stabilitet og stort bruksområde.

Emil J. Samuelsen Institutt for fysikk, NTNU

Ein hovudregel er at organiske materiale er elektrisk ikkje-leiande stoff, men der er mange unntak. Generelt gjeld at i stoff med vekslande enkelt- og dobbelt-bindingar kan elektrona knytte til bindingane bli gjort *mobile* så dei kan gi opphav til ei viss elektrisk leiingsevne. Ordet *polymer* kjem av gresk *poly* (av *polu*) som betyr «mange», og *mer* (av *meros*) som betyr «enkelgruppe». Polymere materiale kan utgjere opptil tusenvis av enkeltmolekyl (kalla *monomere*, der *mono* er gresk for «ein» eller «enkel»). Ofte, men ikkje alltid dannar dei lineære kjeder. Figur 1 viser korleis karbohydrid-gruppa C-H kan inngå i ei polymer kjede med vekslane enkelt- og dobbelt-bindingar (– = – =). Polymeren blir kalla polyacetylen og er eit eksempel på ein av dei første halvleiande polymere som blei framstilt.

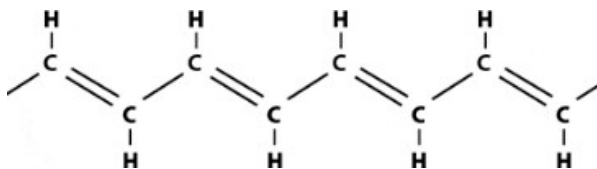
Polyacetylen er av betydeleg akademisk interesse, men er for ustabil for teknisk utnytting.

Elektrisk leiingsevne kan påverkast ved tilsetjing av dopemiddel. Dopemidlet gir frå seg eller tar opp elektrisk ladning frå polymeren, noko som opnar for at ladningar kan flytte seg i systemet av enkle og doble bindingar mellom molekyla.

Leiande og halvleiande polymerar

Nobelprisen gjekk til fysikkprofessor Alan Heeger, Santa Barbara, og kjemiprofessorane Alan MacDiarmid, Philadelphia og Hideki Hirakawa, Tsukuba, Tokyo. Både før og etter nobelpristildelinga i 2000 var det betydeleg interesse for halvleiande polymerar, og ein forstod at feltet kunne opne for materiale på nye bruksområde. PA (polyacetylen)

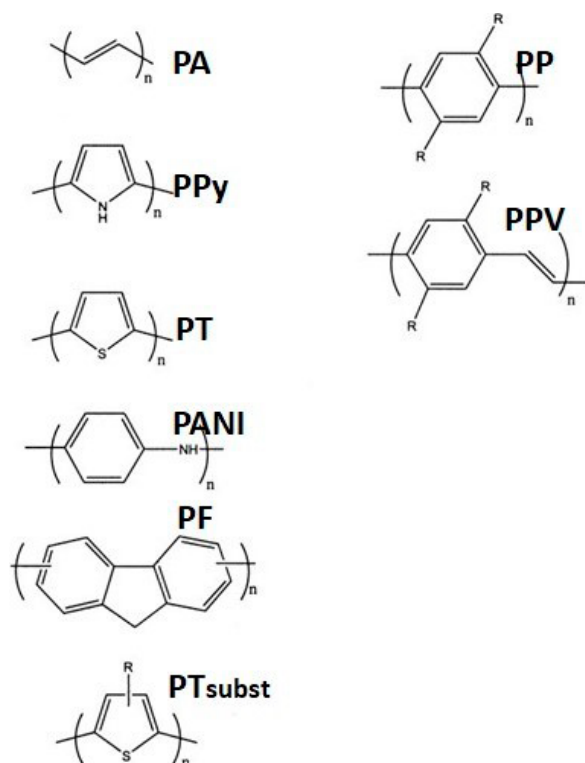
Figur 1. Skjelettet av polyacetylen med vekslande enkelt- og dobbelbindingar langs polymerkjeda.

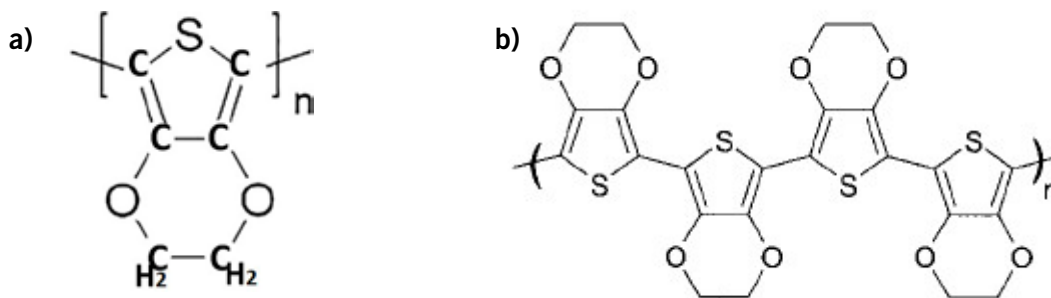


er alt nemnt. Andre eksempel er PANI (polyanilin), og vi kan elles summarisk nemne PP (polyphenylene), PPy (polypyrrol), PT (polythiophene), PPV (polyphenylene-vinylene), PF (polyfluorene) med variantar, og ein god del andre (sjå figur 2). Somme av dei er løyselege i organiske væsker og kan derfor formast til trådar eller tynne flak ved trekking eller utspreing på høvelege substrat. Strukturen kan vere amorf eller delvis krystallinsk, og elektriske og optiske eigenskapar kan ofte varierast med ulik fordampings- eller nedkjølings-fart.

Dopa PANI har ei betydeleg elektrisk leiingsevne og blir nytta for skjerming av elektroniske kretsar, og fungerer også som korrosjonshindrande maling. PP og delvis PPy kan tjene som absorlator av mikrobølggestråling, noko som gjer overflater med PP eller PPy lite synleg med mikrobølgjesøkande innretningar som radar. PT og substituerte PT blir tatt i bruk i felttransistorar i organisk elektronikk, t.d. i organiske dataskjermar (OLED). PPV blir omtalt som kandidat for elektro-

Figur 2. Oversikt over eksempel på polymere halvleiarar representert ved monomere molekylgrupper som blir gjentatte n gonger i polymeren. I krysspunkta for bindingane (\sphericalangle) er det eit C-atom eller ei CH-gruppe. Dei nedkorta polymer-symbola er viste. Dei sekskanta gruppene med tre doble bindingar blir kalla phenylene på engelsk, (fenyl på norsk). PT_{subst} betyr at polytiofenet har ei 'substituert' sidegruppe R.





Figur 3. Venstre del (a): Monomerdelen av poly-etylén-di-oksy-tiofén (PEDOT) med svovel S, oksygen O, karbon C og hydrogen H identifiserte. 'Femkanten' er tiofénkjelettet, og 'sekskanten' etyléndioksykjelettet. Halvleiareigenskapen er knytt til enkel-dobbel-bindingssystemet i tioféndelen, mens etyléndioksydelen gir stor termisk stabilitet.

Høgre del (b): Stykke av ei PEDOT-kjede. Ved doping blir elektron mobile parallelt med polymerkjeda, som gir konduktivitet langs kjeda.

lumenisente skjermar, og PF med variantar kan gi fullfarge videoskjermar frå tynt pålagde lag.

Desse organiske polymerane er kjemisk stabile i varierende grad. Spesielt vil høge temperaturar i stor grad endre dei mekaniske eigenskapane, og materiala vil gjennomgå smelteliknande prosessar ved temperaturar over 100–150 °C.

Men ein spesiell variant av PT_{subst} kalla PEDOT viser seg å vere ekstra stabil over stort temperaturområde.

Polytiofenet PEDOT

'PEDOT' står for poly-etylén-di-oksy-tiofén (norsk skrivemåte). Denne er ein polytiofen med substituent i form av ei molekyllbru med to oksygenatom i brua, som vist i figur 3.

Innhaldet i artikkelen er i stor grad basert på referansane [1] og [2].

Polymerisering

Polymeren PEDOT med variantar er eit resultat av innsatsen med prøving og feiling ved det tyske firmaet Bayer AG over mange år. Viktig metode for syntetisering kom i 1988, fulgt av seinare utvikling og raffinering. Her er det meininga ikkje å gå inn på detaljar av syntesemetodar, anna enn å konstatere at både kjemiske og elektrokjemiske prosessar er blitt tatt i bruk for oksiderings-polymerisering av ethylenedioxythiophene, med treverdige jern-ion som oksydant. Det gir relativt korte polymerkjeder på <100 monomer-einingar. Ei ulempe er at produktet er praktisk talt uløysleg i vatn eller andre løysmiddel. Trikket for å få formbare polymerprodukt som kan utnyttast, er å la polymeriseringsprosessen skje i nærver av løyslege dopemiddel, som PSS (poly-styrén-sulfonat = $C_2HC_6H_5SO_3$) og Tos (toluen-sulfonat = $CH_3H_4SO_3$). Dopinga gir dei ferdige materiala ei viss elektrisk leiingsevne, nokre titalls S/cm for PSS-doping, og opptil mange tusen S/cm for Tos-doping. Udopa

PEDOT er funne å vere halvleiarar med bandgap på 1,6–1,7 eV.

Materialeigenskapar

Suspensjonar av desse stoffa, av Bayer AG kalla 'Baytron', er utgangsmateriale for ulike variantar av eigenskapar.

Leiingsevne

Suspensjonar kan støypast ut på høvelege substrat, og slike flak av materialet har betydeleg elektrisk leiingsevne, avhengig av konsentrasjonsforholda. Konduktivitet i området 10–10000 S/cm er oppnåeleg, med dei høgste verdiane for Tos-dopa PEDOT. Der er ei viss temperaturavhengigheit, med høgast konduktivitet ved høgre temperaturar, motsett av det ein observerer for ordinære metalliske leiarar.

Farge

Utstøypte materialflak er blåfarga. Tynne flak har ein bleik blåleg farge, og flak med mikrometertjulleik er mesta transparente, noko som blir utnytta teknisk.

Krystallinsk struktur

Røntgendiffraksjon viser at Tos-dopa PEDOT er krystallinsk. Grunnleggande studiar blei gjort av Aasmundtveit og medarbeidarar i 1999 [3]. Andre forskarar har funne analog struktur i PSS-dopa materiale, men med redusert krystallinitet. Mens halvleiande polymere nemnte i avsnitt to har vekslende krystallinske og amorfe område, manglar Tos-PEDOT signal frå amorf del (i form av breie diffraksjonstoppar). Det krystallinske bilede som framstår er vist i figur 4, og viser vekslende sjikt av PEDOT-kjeder og dopemolekyla 'Tos'.

Stabilitet

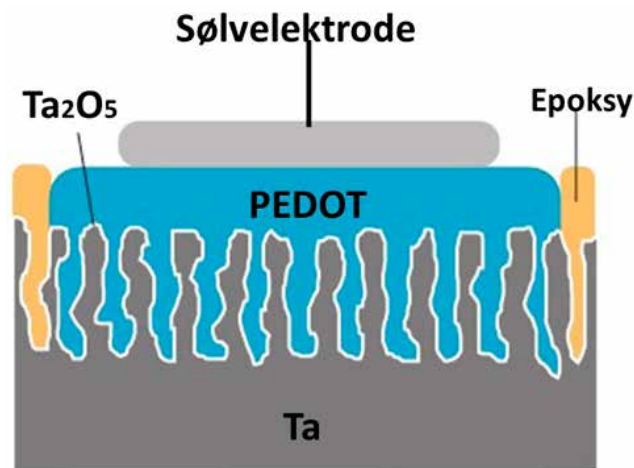
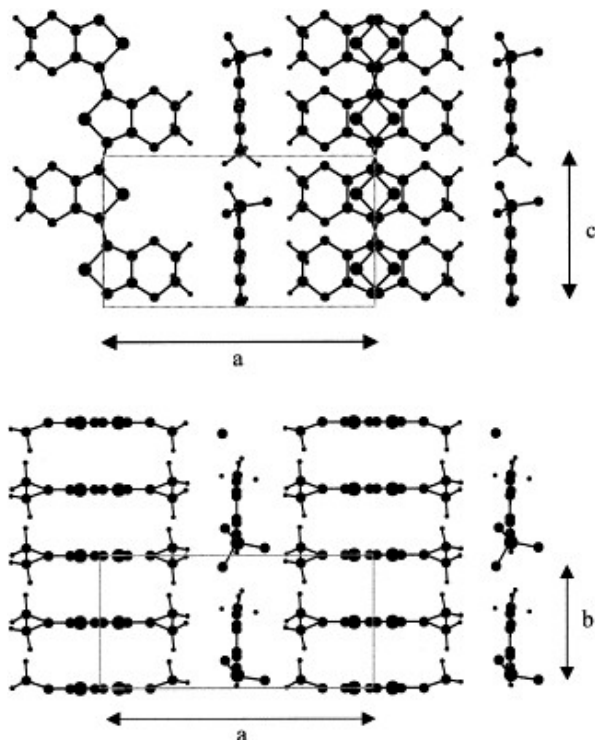
Dei fleste polymere leiarar og halvleiarar er ikkje stabile over lengre tider og må beskyttast mot

fukt og/eller luft, noko som blir gjort ved innkapsling eller spyling med inerte gassar som nitrogen eller argon. Med PEDOT er ikkje dette noko stort problem; materialet kan bli eksponert til ordinære atmosfæriske forhold i veker og månader utan større degradering.

Tilsvarande stabilitet gjeld ved høge temperaturar: Det vanlege er at krystalliniteten til polymerane avtar med aukande temperaturar og blir heilt borte ved temperaturar over ca. 100 °C, kalla *smeltetemperatur*. Det kjem til uttrykk ved at diffraksjonssignala aukar i breidde og minkar i amplitude. For PEDOT er oppførsla motsett. Diffraksjonssignala blir tvert i mot sterkare med aukande temperaturar til over 200 °C.

Ein analog effekt er påverknad av ioniserande stråling. Etter sterk røntgenbestråling (som med synkrotron-strålar) blir 'ordinære' polymere halvleiarar misfarga og materialet øydelagt etter nokre minutt, mens PEDOT toler røntgenbestrålinga utan merkbare endringar.

Figur 4. Ordna krystallinsk struktur i Tos-dopa PEDOT etter Aasmundtveit et al 1999 [1]. Strukturen består av ortorombiske repedisjonsceller *a*, *b*, *c* med 90° mellom dei tre akseretningane. Polymerkjedene går i *c*-retninga, som også har størst konduktivitet. Tos-molekyl ligg mellom polymerkjedene, også orientert langs *c*-retninga. Dimensjonane er *a* = 1,40 nm; *b* = 0,68 nm; *c* = 0,78 nm.



Figur 5. Kondensator med PEDOT og tantal (Ta) med Ta_2O_5 som dielektrisk skilje. Grenseflata er gjort ru for å auke kontaktarealet.

Bruksområde

Mange forskargrupper reknar PEDOT som den mest allsidige for bruk [1, 2], jamvel om det ikkje utelukkar at fleire av dei andre polymerane også har sine bruksområde.

Antistatisk beskyttelse

Kombinasjonen av elektrisk leiingsevne, mekanisk fleksibilitet og stabilitet gjer at PEDOT kan nyttast som elektromagnetisk skjerming av delikat elektronisk utstyr, som skjerming av katodestrålerør. Ein viktig effekt er bruk som antistatisk belegg av fotografisk film. Her blir PEDOT lagt på plastfilmar av polyetylen med polytereftalat før fotobelegget. Agfa oppgir at hundrevis av millionar kvadratmeter fotografisk film er blitt beskytta på den måten dei seinare åra, kanskje den mest kjende industrielle utnytting av PEDOT.

Også for innpakking av andre delikate elektroniske element blir PEDOT filmar brukt.

Kondensatorar og superkondensatorar

PEDOT inngår som ein viktig del i visse høgkapasitive kondensatorar, og også i såkalla superkondensatorar, som har særst høg kapasitans (~1 farad) (sjå artikkel av Lars Egil Helseth i *FFV* 82/3 (2020) s. 55). Figur 5 viser eit eksempel.

Gjennomsiktige elektrodar

Luminiscens, OLED og elektrokromisme

Tynne flak som er omtrent gjennomsiktige kan tjene som transparente elektrodar for instrument for elektroluminiscens, og også for organiske lysmitterande diodar, OLED. Det sentrale her er at vi har å gjere med det sjeldne tilfellet med gjennomsiktige materiale som også er godt elektrisk leiande.

Systematisk oppbygging med OLED-element er bakgrunnen for kommersielt tilgjengelege orga-

nisk-baserte OLED data-skjermar og TV-skjermar.

Transparent PEDOT saman med organisk oppbygde lys-til-straum-konverterande element er grunnlaget for organiske solceller, med effektivitet i 15–16 % området.

Fordi doping kan regulerast med påtrykt elektrisk spenning, er *elektrokrom effekt* tilgjengeleg. Effekten har opphav i at påtrykt spenning vil påverke dopemidlet, som vil vandre ut eller inn i materialet PEDOT, avhengig av retninga av den påtrykte spenninga. Materialet endrar farge, og tjener slik som ein 'elektrisk gardin'.

Biokompatibilitet

Det er registrert at PEDOT er i betydeleg grad *biokompatibel*, det vil seie at det kan fungere i samvirke med levande vev. Det blir rapportert om studiar av signal frå hjerneaktivitet ved hjelp av PEDOT-PSS-elektrodar. Også signal frå elektrodar plasserte i planter er rapportert.

Termoelektrisitet

Termoelektrisk materiale er interessant for elektrisk energi-gjenvinning frå spillvarme. Det krev materiale med høg elektriske leiingsevne kombinert med låg varme-leiingsevne, uttrykt med ein såkalla Seebeck-koeffisient S [4]. PEDOT er ein interessant kandidat som konkurrerer med uorganiske termoelektriske materiale som Bi_2Te_3 og CoAs_3 . Polymeren er billigare, er stabil og utviklar ikkje giftige biprodukt.

Avslutning

Sidan nobelprisen i 2000 har det skjedd ei betydeleg utvikling på feltet 'polymere halvleiande og

leiande materiale', der denne lille oversikten berre kan gi smakebitar av utviklinga, spesielt av polymervarianten PEDOT. PEDOT utmerkar seg med serleg god stabilitet under varierende forhold, og har alt blitt tillempa mange bruksområde. Materialet kan bli gjort tøyeleg og oppvise strekkstyrke jamførbart med nylon, og det er bøyeleg og blir iblant jamført med grafén.

PEDOT-basert materiale kan også bli inkorporert i tekstil-materiale for variert bruk, som fargeendring, temperatursensing med eventuelt elektriske varming for komfort, sensing av kjemiske endringar, og kanskje også 'innbygging' av ekstern elektronisk mobil- og GPS-kontakt og liknande. Det finst rikeleg litteratur om slike diverse bruksområde for PEDOT i framtida [5]. ■

Referansar

1. L.B. Groenendaal og medarbeidarar. «(Poly 3,4-ethylenedioxythiophene) and its derivatives: Past, present and future». *Advanced Materials* (2000) nr. 12 s. 481–494.
2. M.N. Gueye og medarbeidarar. «Progress in understanding structure and transport properties of PEDOT-based materials: A critical review». *Progress in Materials Science* 108 (2020) 100616, s. 1–40.
3. K.E. Aasmundtveit og medarbeidarar. «Structure of thin films of poly(3,4-ethylenedioxythiophene)». *Synthetic Metals* 101 (1999) s. 561–564.
4. E.J. Samuelsen. «Termoelektrisk effekt: Straum frå varme og kjøling med straum». *Fra Fysikkens Verden* 78 (2016) s. 12–21.
5. G.B. Tseghai og medarbeidarar. «PEDOT:PSS-Based Conductive Textiles and Their Applications». *Sensors* 20 (2020) 1881 s. 1–18; doi:10.3390/s20071881.

Kelvin i det nye SI-systemet

Det nye SI-systemet er blitt grundig presentert i *FFV* [1]. Her er et lite supplement. Temperaturenheten Kelvin ble ikke omtalt.

I det nye systemet er Kelvin definert slik at Boltzmanns konstant har eksakt verdien

$$k = 1,380649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K.}$$

Dette betyr at en grad Kelvin er temperaturforandring $\Delta T = 1 \text{ K}$ som svarer til en energiendring $k\Delta T = 1,380649 \cdot 10^{-23} \text{ J}$.

Referanse

1. Aasmund Sudbø. «SI – det nye internasjonale einingssystemet». *FFV* nr. 1. (2018) s. 14–19.

Øyvind G. Grøn

CO₂-fangst og lagring i geologiske formasjoner

I 2007 annonserte Jens Stoltenberg det som ble omtalt som en månelanding: Vi skulle fange CO₂ i stor skala på Mongstad. Men like før startskuddet skulle gå av ble det avlyst. Nå har regjeringen annonsert et nytt forsøk. Men det mange ikke vet er at vi allerede driver med både fangst og lagring av CO₂ i Norge, og har gjort det i mange år allerede.

Anne Schad Bergsaker USIT, UiO

Vårt samfunn står overfor en enorm utfordring i form av global oppvarming. Vi er nødt til å redusere utslipp av klimagasser som CO₂ om vi skal ha noe håp om å begrense den gjennomsnittlige temperaturøkningen til 2 grader. Et stort steg i riktig retning vil være å gå over til fornybar energi istedenfor å brenne kull, olje og gass. Men selv om vi nå stopper fremtidig oljeleting, kommer de aller fleste oljeproduiserende land i verden til å utvinne den olja, gassen eller kullet som de allerede har funnet. Vi trenger en måte å gjøre brenning av hydrokarboner renere mens vi venter på at vår globale energiproduksjon skal komme seg gjennom tidenes vårrengjøring. En del av løsningen, som har blitt trukket frem av Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [1], er fangst og lagring av CO₂, altså å fange opp CO₂ der den produseres og pumpe den ned i geologiske formasjoner under bakken eller havbunnen.

Fangst

Det finnes mange ulike metoder for å fange CO₂, og en fant ut hvordan en kunne gjøre det allerede på 1930-tallet. Naturgass inneholder vanligvis litt CO₂, slik at når man utvinner gassen får man med CO₂ på kjøpet. Siden CO₂ ikke brenner, men sliter veldig på rørledninger, vil man helst ha så lite CO₂ i naturgassen som mulig. Derfor har man lenge hatt interesse av å skille CO₂ fra andre gasser. Den eldste metoden går ut på å blande denne cocktailen av naturgass og CO₂ med aminer. Aminer er en gruppe organiske stoffer som kan syntetiseres fra ammoniakk. Når man blander naturgass-CO₂-blandingen med aminer, vil CO₂ feste seg til aminene. Den nye CO₂-amin-blandingen synker, og skilles fra resten av gassen. Hvis man så varmer opp blandingen, vil CO₂ og amin skille seg igjen, og vi sitter igjen med tilnærmet

ren CO₂, mens aminene kan resirkuleres og brukes til å fange ny CO₂. Tilsvarende metode kan brukes i gass- og kullkraftverk.

Dette er den eldste metoden vi har og omtales gjerne som *post-combustion*, fordi CO₂ fjernes etter forbrenning. En annen metode kalles *pre-combustion*, og innebærer at brennstoffet konverteres fra hydrokarboner til en blanding av hydrogen-gass og CO₂, ved hjelp av høyt trykk, temperatur og vanndamp. Da kan CO₂ skilles ut før man begynner selve forbrenningen og energiproduksjonen.

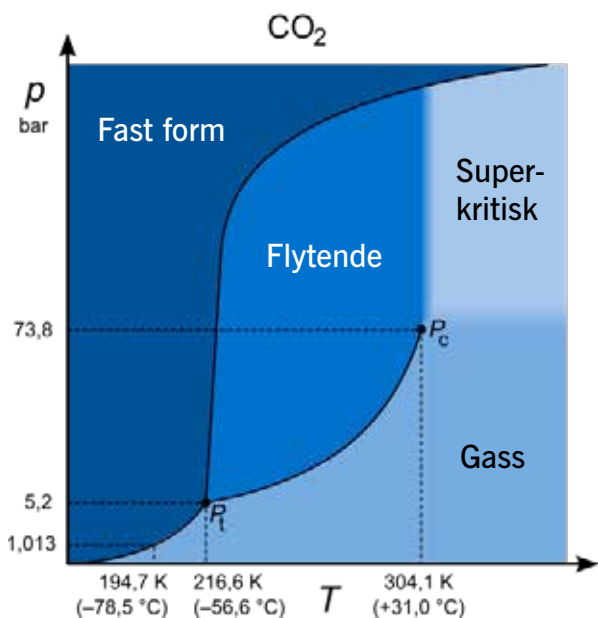
Det finnes en rekke andre metoder som også fungerer. Det jobbes for eksempel mye med å utvikle membraner som kan skille CO₂ fra andre gasser direkte [2]. Et alternativ er også å brenne gass eller kull i ren oksygen, fremfor i vanlig luft, slik at eksosen man produserer blir ren CO₂. Det er også mulig å fange CO₂ direkte fra lufta ved å blåse luft gjennom filtre som fanger opp CO₂ og slipper andre gasser igjennom, eller ved å sende luft gjennom kjemiske løsninger bestående av hydroksider (inneholder OH⁻-ioner) som binder CO₂. Deretter kan man enten lagre CO₂ eller gjøre den direkte om til stein i form av karbonat som CaCO₃, som ved CarbFix-prosjektet på Island [3]. Dessverre er dette foreløpig en veldig dyr og energikrevende måte å fange CO₂ på, men det kan bli en viktig metode for å redusere CO₂-nivået i atmosfæren på etter hvert som teknologien modnes [4].

Transport og superkritisk CO₂

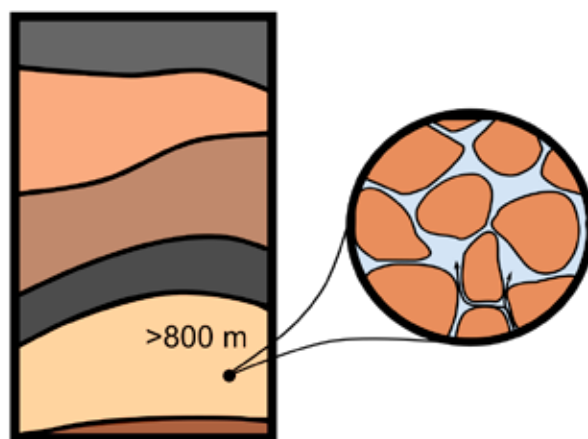
Når CO₂ først har blitt fanget, kan den transporteres enten i rørledninger eller tankskip til et egnet lagringssted. Men før CO₂ lagres må den komprimeres. CO₂ har en fase som kalles superkritisk fase, der CO₂ er nesten like tett som når det er flytende, men det strømmer nesten like lett som når det er gass. Ved trykk på minst 73 bar og temperatur på minst 31°C er CO₂ i superkritisk fase (se figur 1). Tilfeldigvis er det gjerne akkurat slike forhold under bakken også, så lenge man er dypere enn 800 meter under overflaten. Det betyr at CO₂ helt naturlig vil være i superkritisk fase der den pumperes ned.

Lagring

Man må velge egnede steder for lagring, for det er ikke alle formasjoner av porøs stein som vil være trygge steder å lagre CO₂. Det er ingen grunn til å



Figur 1. Trykk-temperaturdiagram for CO₂. (Figur: Wikipedia Commons)



Figur 2. Kriterier for et egnet lagringssted for CO₂. Minst 800 meter under bakken, med en takbergart over, høy porøsitet og god gjennomstrømming.

bruke masse energi og ressurser på å fange, komprimere, transportere og pumpe CO₂ inn i stein langt under bakken, dersom den bare unnslipper og kommer opp til overflaten igjen. Derfor regnes et område for egnet dersom maksimalt 1 % av den injiserte CO₂ unnslipper igjen i løpet av de neste tusen år.

Lagring av CO₂ i geologiske formasjoner utnytter i hovedsak fire ulike mekanismer for å holde fast på CO₂, som er illustrert i figur 2. I starten av lagringsprosessen er det to fysiske lagringsmekanismer, mens over tid får vi hjelp av to kjemiske mekanismer i tillegg. Og jo lenger CO₂ holdes på plass i en geologisk formasjon, jo tryggere ligger den også.

For å lagre CO₂ trygt i geologiske formasjoner er det fire hovedkriterier som må tilfredsstilles. For det første må formasjonen ligge dypt nok under bakken til at CO₂ naturlig er i superkritisk fase. Dette krever at vi må minst 800 meter under bakken.

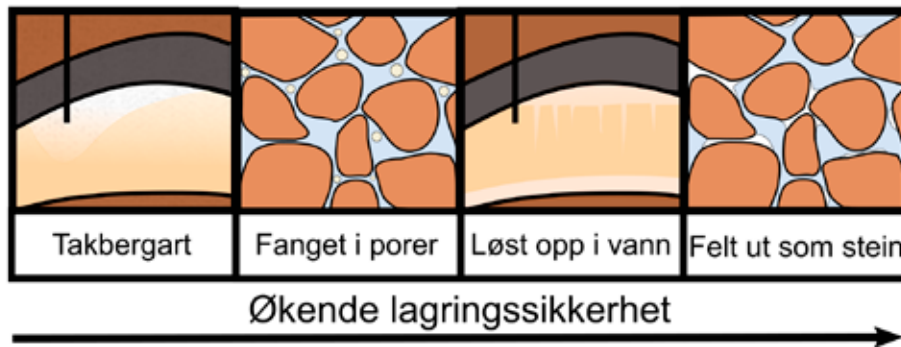
Det andre er at den geologiske formasjonen er porøs, så det er mye plass til CO₂ der. Den bør også være stor nok til at et stort volum kan lagres der over tid. Ofte velger man sandstein eller kalkstein, med porøsitet opp mot på 10–30 %. I porene sitter det fra før gjerne enten olje og gass, eller det er saltvann. Man bruker ikke ferskvannsressurser til dette, ettersom vi ikke vil kaste bort mulige drikkevannskilder på lagring av CO₂.

I tillegg til å ha god plass må porene henge sammen, slik at CO₂ kan strømme fra en pore til en annen. Dette kalles permeabilitet. Høy permeabilitet betyr at CO₂ lett kan strømme fra pore til pore. Vi er avhengig av dette for at CO₂ skal kunne

flyte fra injiseringspunktet og ut i selve steinen hvor vi ønsker å lagre den.

Det er ikke nok å bare ha god plass eller god gjennomstrømming mellom kornene i steinen, for om ikke det er noe som hindrer CO₂ i å strømme tilbake opp til overflaten igjen, så er det liten grunn til å pumpe den ned i bakken. CO₂, også i superkritisk fase, er lettere enn vann og vil dermed strømme oppover når vi pumper det ned i en geologisk formasjon full av saltvann. Vi trenger en tett bergart, kalt en takbergart, som ligger i lag over den porøse geologiske formasjonen. Dette er vist helt til venstre i figur 3. Med en slik takbergart vil vi kunne hindre CO₂ fra å strømme oppover mot overflaten igjen. Dette laget bør gjerne ha form litt som et tak, med en topp på midten og så skråne ned på alle sider. CO₂ kan da pumpes inn ganske dypt nede på denne helningen, men vil kunne sige oppover langs undersiden av skråtaket. Dette virker kanskje risikabelt, men så lenge man kjenner godt til formen på de ulike lagene under bakken, og overvåker hvor CO₂ driver, har en god kontroll på hva som skjer. Den store fordelene med å la CO₂ få sige sakte oppover langs undersiden av dette skråtaket er at det åpner for en annen fysisk lagringsmekanisme, som kalles residual fangst (residual trapping på engelsk).

Siden reservoaret er fylt med saltvann før vi pumper inn CO₂, vil alle steinkornene være dekket av vann. Selv om vi pumper inn CO₂ vil det fortsatt sitte en tynn hinne av vann mellom steinen og CO₂. Spesielt i smale ganger mellom større porer vil det være rent saltvann. Molekylene i vannet drar på hverandre og prøver å holde saltvannsmolekylene



Figur 3. Fysiske og kjemiske mekanismer for å holde på CO₂ i et reservoar.

samlet. Dette gir opphav til overflatespenning. I grensen mellom CO₂ og saltvann vil det også være overflatespenning. Midt i en stor pore vil ikke dette ha så mye å si, men i trange overganger mellom porer vil saltvannet kunne oppføre seg litt som en felle. En stor boble av CO₂ vil kunne presse seg forbi denne saltvannsfellen mellom kornene fordi den er stor nok til å presse vekk nok saltvann til å få en åpning over til neste pore. En liten boble derimot vil ikke komme seg forbi, men vil bli holdt fast av saltvannet. En stor boble kan også ende opp med å bli delt opp i mindre bobler idet den er på vei fra en pore til en annen. På denne måten blir mindre bobler av CO₂ holdt fast og hindret i å flytte på seg videre. Dette er også hvordan olje og gass ofte har blitt holdt på plass under bakken, før eventuell utvinning. Når CO₂ er fanget på denne måten, kommer den ingen vei. Heretter begynner de kjemiske mekanismene å spille en rolle.

Etter noe tid vil superkritisk CO₂ begynne å løse seg opp i vannet. Da dannes karbonsyre, som er en ganske svak syre som har den egenskapen at den er tyngre enn vann. Dermed vil karbonsyren synke. Dette fører til at nytt saltvann stiger opp og kan bidra til at ny CO₂ også kan løse seg opp og bli til karbonsyre. Herfra vil ikke CO₂ lenger prøve å strømme opp mot overflaten, men ligge fanget som karbonsyre.

Den siste mekanismen som bidrar til å sikre at CO₂ blir sittende fast, er at karbonet felles ut fra

saltvannet og danner karbonat med for eksempel kalsium Ca og magnesium Mg, altså fast CaCO₃ og MgCO₃. Nå sitter CO₂ helt fast i bakken, og vil ikke kunne unnsnippe. Alle disse fire mekanismene for å holde på CO₂ er vist i figur 3. Illustrasjonen lengst til høyre i figuren viser CO₂ tryggest låst under bakken.

Sikkerhet over tid

Det siste man må gjøre når CO₂ er pumpet inn i et geologisk reservoar er å overvåke, så man har kontroll på hvor CO₂ flyter, og at det ikke skjer noe som kan føre til lekkasjer. Vi har allerede ganske store lagre av naturgass og CO₂ liggende rundt omkring på kloden, som har ligget der i mange millioner år. Dersom vi ikke hadde begynt med gasskraft, ville det nok ligget der fortsatt. Det tyder på at CO₂ vil kunne lagres trygt under bakken lenge nok til at det blir til stein selv. Det tar lang tid, altså tusener eller millioner av år fra man pumper CO₂ inn i et reservoar til det blir til stein, men det tar ikke tusenvis av år å oppnå sikker lagring, så lenge reservoaret i seg selv har de karakteristikkene vi trenger.

Fangst og lagring av CO₂ i dag

CO₂ blir allerede fanget fra naturgass der gassen inneholder nevneverdige mengder CO₂ ved utvinning. To steder i Norge blir denne CO₂ også lagret. Ikke bare blir den det nå, men på Sleipner-feltet har Statoil fanget og lagret CO₂ i Utsiraformasjonen siden 1996. Det andre stedet er Snøhvit-feltet, der CO₂-lagring har pågått siden 2007. Nå har det også akkurat blitt vedtatt at det såkalte «Northern Lights»-prosjektet skal støttes i neste statsbudsjett. Der skal CO₂ fanges fra sementfabrikken til NorCem i Brevik og på avfallsanlegget til Fortum på Klemetsrud i Oslo, fremfor å slippes rett ut i atmosfæren. Derfra skal CO₂ sendes til Vestlandet der Shell, Equinor og Total skal samarbeide om å lagre CO₂ i Aurora-formasjonen i Troll-feltet utenfor Bergen.

Dette siste prosjektet illustrerer den store muligheten som fangst og lagring av CO₂ kan tilby. En ting er at CO₂-fangst kan renske opp i deler av energiproduksjonen vår, ved å redusere

Figur 3. CO₂ skal blant annet fanges på sementfabrikken til NorCem i Brevik. (Bilde: Vetle Houg)



utslipp fra forbrenning av hydrokarboner. Dette er industri som forhåpentligvis vil bli byttet ut med fornybar energi uansett, og da vil CO₂-fangst være overflødig her. Men CO₂-fangst kan også gi oss muligheten til å rense opp i andre deler av vår industri, som for eksempel deler av byggebransjen. Dessuten vil CO₂-fangst i kombinasjon med forbrenning av biomasse kunne tilby karbonnegativ teknologi, der vi tar opp mer CO₂ fra atmosfæren enn vi slipper ut. Hvis vi skal stole på dagens prognoser angående CO₂-konsentrasjon og økende global gjennomsnittstemperatur, vil vi ikke bare trenge karbonnøytral teknologi, men også karbonnegativ teknologi, slik at vi kan prøve å rette opp i noen av de feilene vi allerede har gjort.

Totalt i verden slipper vi nå ut over 35 milliarder tonn CO₂ hvert år. Bare i Norge alene slipper vi

ut over 43 millioner tonn, altså nesten 9 tonn hver. Til sammenligning lagres det ca. 1 million tonn på Sleipner-feltet hvert år, og på Norcem er målet å fange ca. 400 000 tonn i året. Altså trenger vi veldig mange flere slike prosjekter før det virkelig monner. ■

Referanser

1. B. Metz, B., O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos og L. Meyer (red.). *IPCC* (2005), side 431. Cambridge University Press, Storbritannia.
2. SINTEF. «CO₂ capture with membranes.» Nettside: www.sintef.no/en/co2-capture-with-membranes/
3. Carbfix. Nettside: www.carbfix.com
4. IEA. «Direct Air Capture.» Nettside: www.iea.org/reports/direct-air-capture

NYE DOKTORER



Nikolai Fomin

Nikolai Fomin forsvarte sin PhD-avhandling «Search for Pair Production of Bottom-Squarks in Final States with Hadronically Decaying Tau-leptons, b-jets and missing transverse momentum with the ATLAS Detector at the Large Hadron Collider», ved Institutt for Fysikk og Teknologi ved Universitetet i Bergen den 16. oktober 2020.

Partikkelfysikken studerer elementærpartikler og vekselvirkninger mellom dem. Standardmodellen, den grunnleggende modellen i partikkelfysikken, beskriver alle observerte elementærpartikler og de tre grunnleggende kreftene som påvirker dem (gravitasjon er ikke inkludert i standardmodellen). Teorien i sin nåværende form ble formulert på 1970-tallet og har vært testet og bekreftet mange ganger av forskjellige eksperimenter. I 2012 ble Higgs-bosonet – den siste partikkelen forutsagt av Standardmodellen – observert i to av eksperimentene ved Large Hadron Collider (LHC) på CERN.

Til tross for suksessene er ikke standardmodellen perfekt. Den beskriver ikke gravitasjonen i samme rammeverk som de andre grunnleggende kreftene. Den har heller ingen kandidater for partiklene som kan utgjøre den mørke materien. Dette får oss til å tro at det er ny fysikk å oppdage utover standardmodellen. Mange teorier har blitt foreslått. Den kanskje mest kjente er supersymmetri (SUSY).

I sitt doktorarbeid utforsket Nikolai Fomin datasettet som ble samlet inn av ATLAS-detektoren på LHC i perioden 2015–2018. Detektoren observerte proton-proton-kollisjoner med enstående luminositet og massesenterenergi på 13 TeV. Datasettet tilsvarer integrert luminositet på 139 fb⁻¹. Målet med utforskningen var å lete etter de (i hvert fall foreløpig) hypotetiske SUSY-partiklene – sbottomkvarker – i kollisjoner som produserer b-jetter og tau leptoner.

Utforskningen er tolket i modeller hvor sbottomkvarken henfaller til en bunnkvark og det nest letteste neutralino (en annen SUSY-partikkel) som igjen henfaller til et Higgs-boson og den letteste neutralino. Monte-Carlo-generatorer brukes til å modellere standardmodellen og blir videre korrigert med datadrevne metoder. Observert data er så sammenlignet med standardmodellens forutsigelse. Det ble ikke observert noe uoverensstemmelse, noe som gjør at sbottomkvarker med masser opp til 900 GeV/c² er ekskludert med konfidensnivå på 95 %.

Arbeidet ble utført ved Institutt for Fysikk og Teknologi, Universitetet i Bergen. Hovedveileder var Anna Lipniacka og biveileder var Bertrand Martin dit Latour.

Bokomtale:

Den lille boka om universet **Maria Hammerstrøm**

Kagge forlag, 2019
182 sider
Pris: 379 kr

Den lille boka om universet er riktignok liten, men den omhandler et stort tema. Den tar mål av seg å beskrive hele universet på en enkel og kortfattet måte. Først vårt eget solsystem, dernest stjerner, stjerneutvikling, galakser og galaksehoper, for så å fortelle om hele universets utvikling fra big bang til spørsmålet om hva som vil skje med universet i fremtiden.

Mange, både barn og voksne, lar seg fascinere av verdensrommet, alt fra planeter og stjerner til sorte hull. Denne boka henvender seg til dem som interesserer seg for verdensrommet, men som kanskje har liten faktisk kunnskap. I boka gir Maria Hammerstrøm en lettfattelig og oversiktlig fortelling for dem som er nysgjerrig på hva som finnes der ute.

Boka gir enkle beskrivelser og forklaringer på mange temaer, systematisk oppbygd fra det nære til de helt store spørsmålene i kosmologien. Hammerstrøm skriver om jorda og betingelser for at det er liv her. Videre forteller hun om det nære verdensrom med sola, planetene, månen, asteroider og kometer. I kapittelet om stjerner får vi innblikk i stjerners utvikling fra fødsel til død. Her beskrives blant annet supernovaer og nøytronstjerners betydning for dannelsen av tyngre grunnstoffer. Sorte hull og gravitasjonsbølger blir også omtalt. Det er observert et stort antall planeter rundt andre stjerner enn vår egen sol. Det store spørsmålet er selvsagt om det er liv på noen av disse, og om det er intelligent liv! Stjernene er samlet i galakser, og Hammerstrøm forklarer hvordan galaksene er organisert i hoper og superhoper. Men det mest spektakulære innen astronomi og astrofysikk er nok beskrivelsen av universets utvikling. Hvordan skal vi kunne forstå at selve rommet begynte å utvide seg overalt på engang og har blitt til det vi kjenner i dag? Her får vi en kort introduksjon til noen av de viktigste begivenhetene i universets historie, fra inflasjon, dannelsen av grunnstoffer, kosmisk bakgrunnsstråling til mørk materie og mørk energi. Boka avsluttes med et kapittel om astrofysikernes verktøykasse, altså om hvilke redskaper vi har for å kunne vite det vi vet.

Det er ikke lett å skrive enkelt om komplekse temaer. I denne boka er nettopp komplekse temaer



fortalt og forklart på en enkel måte. Hammerstrøm bruker et lettfattelig språk, og hun bruker overhode ikke matematiske beskrivelser. Men forenklete og kanskje litt upresise formuleringer kan også skape misforståelser. Jeg synes det i all hovedsak går bra her, selv om noen fysikere kanskje vil reagere på overforenklinger. Et eksempel kan være omtalen av gravitasjonsbølger som beskrives som en gravitasjonskraft som brer seg utover i rommet. Men jeg tror ikke lesere av denne boka ville bli mye klokere hvis det stod at gravitasjonsbølger er en konsekvens av Einsteins generelle relativitetsteori, at gravitasjon ikke er en kraft og at gravitasjonsbølger er fluktusjoner i tidrommet som brer seg utover med lysfarten.

Dette er en balansegang, og når noe skal forenkles, må en akseptere at ikke alt er like presist beskrevet. Det viktigste er at teksten gir beskrivelser som en kan forstå uten at det skapes unødige misforståelser, og ikke minst, skaper undring og lyst til å lese mer. Og det synes jeg Hammerstrøm i all hovedsak har klart.

Det er alltid noen småting som kanskje kunne vært rettet i korrekturen. Bare for å ta ett eksempel: Energirike solpartikler blir omtalt som energiske!

Det er utgitt en rekke populærvitenskapelige bøker av norske forskere de senere årene. Det er svært prisverdig. Og *Den lille boka om universet* føyer seg pent inn i denne samlingen av bøker rettet mot et bredt publikum.

Carl Angell



Tore Olsen

(1930–2020)

Tore Olsen døydde den 27. august, 90 år gamal. Han var ein føregangsmann innan eksperimentell lågtemperatur faststoff-fysikk ved Fysisk institutt ved Universitetet i Oslo frå slutten av 1950-talet. Han hadde eit produktivt opphald hos Robert Morse ved Brown University i USA akkurat etter gjennombrøtet i BCS-teorien for superleiing, der denne gruppa gjorde viktige målingar av energigapet.

Nokre år etter opphaldet ved Brown tok han doktorgrad på magnetoakustisk kartlegging av fermiflata og måling av det superleiande energigapet i tinn i 1963. Ved den magnetoakustiske metoden blir demping av ultralyd i 100 MHz-området målt i metallkrystall som er plassert i magnetfelt. Periodiske varisjonar av demping som funksjon av magnetfelt gjev mål for fermiflateradius. Laboratoriet han gjekk i bresjen for på Blindern fekk kjølemaskin for produksjon av flytande helium, med eigen driftsingeniør, og i samarbeid med Ole Herbjørnsen vart det etablert produksjon av superreint aluminium i absolutt verdsklasse, med reinleik på 99,9999 %. Det seier litt om denne reinleiken at leiingselektrona i aluminium ved flytande helium-temperatur fekk ei fri veglengde av storleik 1 mm. Dette gjorde Blindern til ein leiande stad for grunnleggande transportstudier i aluminium ved låge temperaturar, eit svært aktuelt tema på den tid. Studentar som tok hovudoppgåve i dette laboratoriet, kom til dekkja bord. To av hovudfagstudentane gjorde den første kartlegging av fermiflata i aluminium, samtidig med ei amerikansk gruppe, også her ved magnetoakustiske studier.

Tore Olsen fekk sitt første professorat ved Institutt for teknisk fysikk, NTH i 1966, men kom tilbake til professorat på Blindern etter eit par år. Han var dekan for Det naturvitskaplege fakultet i perioden 1975 til 1980, og innførte betydelege omleggingar av studiet. Men den aller viktigaste innsatsen i denne perioden gjorde han som leiar for Organisasjons- og administrasjonskomiteen ved Universitetet i Oslo. Innstillinga som kom i 1979 førde til eit nytt, demokratisk styringssystem, med val av representantar til dei styrande organ. Ein revolusjon i universitetsverda.

Tida var nå inne til å skifte frå naturvitskap til viktige roller i embetsverket. Frå 1981 til 1987 fekk han rolla som direktør for det nyoppretta Forskingspolitiske råd, som mellom anna arbeidde med spørsmål om nye hovudsatsingsområde for norsk forskning. Frå 1987 til pensjonsalderen 1999 var Tore Olsen ekspedisjonssjef i Utdannings- og forskingsdepartementet. I den perioden vart den store forskingsrådsstruktur-endinga innført, der fem ulike forskingsråd gjekk saman til Noregs forskingsråd NFR. Innan embetsverket vart Tore Olsen vurdert som ein ressurs på øverste hylle.

Dei av oss som var så heldige å ha Tore Olsen som rettleiar til hovudoppgåve i fysikk, hugsar han som ein god fysikar, ein mann med uslitleg godt sinnelag og humør, ein mann det var ei glede å samarbeide med.

Fred vere med hans minne.

Kristian Fossheim

RETURADRESSE:

FRA FYSIKKENS VERDEN
FYSISK INSTITUTT, UNIVERSITETET I OSLO
BOKS 1048 BLINDERN
0316 OSLO
NORGE

Styret i Norsk Fysisk Selskap

President

Professor Asle Sudbø, Institutt for fysikk, NTNU
E-post: asle.sudbo@ntnu.no

Visepresident

Professor Sunniva Siem, Fysisk instiutt, UiO, Kjerne- og energifysikk
E-post: sunniva.siem@fys.uio.no

Styremedlemmer

Forsker Annett Thøgersen, SINTEF Oslo, kondenserte fasers fysikk og atomfysikk
Førsteamanuensis Magnus Borstad Lilledahl, NTNU, biofysikk
Postdoktor Audun Theodorsen, UiT, atmosfære-, rom- og plasmafysikk
Professor Håvard Helstrup, HiB, subatomær fysikk og astrofysikk
Professor Jon Samseth, OsloMet, industri- og energifysikk
Professor Astrid Aksnes, NTNU, optikk
Lektor Kaja Nordby, Kongsbakken vgs., Norsk Fysikklærerforening

Vara

Førsteamanuensis Arne Auen Grimenes, Fakultet for realfag og teknologi, NMBU

Adresse

Norsk Fysisk Selskap
Institutt for fysikk, NTNU
7491 Trondheim
Internettadresse: www.norskfysisk.no

Sekretær: Haakon Thømt Simensen
E-post: nfs.styret@gmail.com
Bankgiro: 7878.06.03258
Org.nr.: 940 340 829

Bedriftsmedlemmer av NFS

Vi takker for støtten fra våre bedriftsmedlemmer:



UiT / NORGES ARKTISKE
UNIVERSITET



 NTNU 



UiO : Universitetet i Oslo

ISSN-0015-9247