

Fra Fysikkens Verden



Det europeiske røntgenanlegget ESRF oppgraderes
(Se artikkel)

Nr. 2 – 2016
78. årgang

Utgiver:
Norsk Fysisk Selskap

Redaktører:
Øyvind Grøn
Emil J. Samuelsen

Redaksjonssekretær:
Karl Måseide

Innhold

Kristian Fossheim:	Vorteksfysikk i kvantevæsker	37
Ragnvald Mathiesen:	Det europeiske røntgenanlegget	43
T. Henriksen og E. Sagstuen:	ESRF under oppgradering	48
Jan Folkvard Evensen:	Fysikk fra medisinsk diagnostikk til samfunnssikkerhet	48
Rolf Widerøe: «Ringenes Herre»	54	
Frå Redaktørane	34	
Nytt fra NFS	34	
Styret i NFS		
Årsmøtet 2016		
Lysåret 2015 – et tilbakeblikk		
FFV Gratulerer.	36	
Tycho Jægers pris i Elektrooptikk til Helge Fonnum		
Magnus Haakestad, Espen Lippert		
Frå fysikkens historie	59	
«Dataalderen tok til for 100 år sidan»		
Ein viktig faktor 2		
Bokomtale	62	
Carlo Rovelli: Seven brief lessons on physics		
Trim i FFV	63	

Frå Redaktørane

Fysikk er eit mangesidig fag. Dette nummeret av FFV inneheld historisk fysikk, samfunnsrelatert fysikk, storskalafysikk, kvantefysikk og noko attåt.

Om Rolf Widerøe fortel Folkvard Evensen at han var ein pionér på 30-talet i utviklinga av partikkelakselleratorar, og at han iblant blir nemnd som ein aktuell nobelpriskandidat. Det er i år 100 år sidan Czochralski-metoden for krystallframstilling blei utvikla, spesielt viktig for våre dagars silisiumgroing for data- og solcelle-teknologien. Medisinsk diagnostikk og materialgjennomlysing tok til med oppdaginga av røntgenstråling i 1895, og er med åra blitt utvikla til uunnverlege metodar, ikkje berre i medisinsk og teknologisk samanheng, men også som rutinemetodar for passasjerkontroll ved alle verdas flyplassar. Henriksen og Sagosen fortel om dette i den første av fleire varsle artiklar om emnet.

Vårt land er som kjent medlem i fleire internasjonale forskingsprogram. Størst er CERN-deltakinga i Genève, og nest størst er medlemskapen i Det europeiske synkrotronstråleanlegget ESRF i Grenoble, faktisk med fleire involverte norske brukarar der enn ved CERN. Anlegget er no i gang med ein svær oppgradering, noko som Mathiesens artikkel fortel om.

Kvantefysikk er representert ved Fossheim sin omtale av superfluide kvervlar i flytande ^4He , der det også er referert til eit arbeid av ein norsk forskar. Ein kort artikkel fortel historisk-anekdotisk om "Faktor-2"-førekommstar i supraleiingssamanhang. Fysikk byr på endå fleire faktor-2-tilfelle. Eg minnest eit kåseri eg hørte av Samuel Goudsmit ved ein konferanse på 1960-tallet om "oppdaginga" av elektronspinnnet, som han gjorde saman med George Uhlenbeck i 1925, der ein uventa "faktor-2" dukka opp.

Emil J. Samuelsen

∞

Nytt fra NFS

Styret i NFS

har følgende medlemmer fra 2016:

President:

Åshild Fredriksen, professor, UiT.

Visepresident:

Michael Kachelriess (ny), professor, NTNU.

Medlemmer:

Jan Petter Hansen, professor, UiB,
kondenserte fasers fysikk og atomfysikk.

Magnus Borstad Lilledahl, førsteaman., NTNU,
biofysikk (ny).

Wojciech Miloch, førsteamanuensis, UiO,
atmosfære-, rom- og plasmafysikk (ny).

Håvard Helstrup, professor, HiB,
subatomær- og astrofysikk.

Jon Samseth, professor, HiOA,
industri- og energifysikk.

Morten Trudeng, lektor, Asker vgs,
Norsk Fysikklererlag.

Olav Gaute Hellesø, professor, UiT,
akustikk/optikk (ny).

Varamedlem, fast:

Arne Auen Grimenes, førsteamanuensis, NMBU.

Jeg ønsker de nye styremedlemmene velkommen, og takker de avtroppende for innsatsen og gode bidrag i perioden som gikk. Jeg vil spesielt takke visepresident Are Raklev for det gode samarbeidet og støtten i perioden 2014–2015.

Årsmøtet i NFS 2016 vil bli avholdt 9. august under Norsk Fysikklererforenings årskonferanse på Schæffergården i København, 7–10. august.

Se fysikklerer.blogspot.no for mer informasjon.

Årsmøtet i NFS skulle i år normalt ha vært arrangert som *Det lille fysikermøtet* uten valg og prisutdelinger. Men under dette årsmøtet vil det både bli gjennomført valg og delt ut Undervisningsprisen og Martin Landrøs pris for fremragende masteroppgave.

Åshild Fredriksen

∞

Lysåret 2015 – et tilbakeblikk

Så er Lysåret overstått, med en mengde større arrangementer verden over. I Norge har vi feiret litt mer beskjedent, i hovedsak med forelesninger, fotokonkurranse, og med spesialutgave av FFV (Nr. 1/2015), også med spesialartikler i resten av 2015-årgangen. En Facebook-side⁽¹⁾ og bloggen lysåret.no⁽²⁾ så også dagens lys i løpet av året.

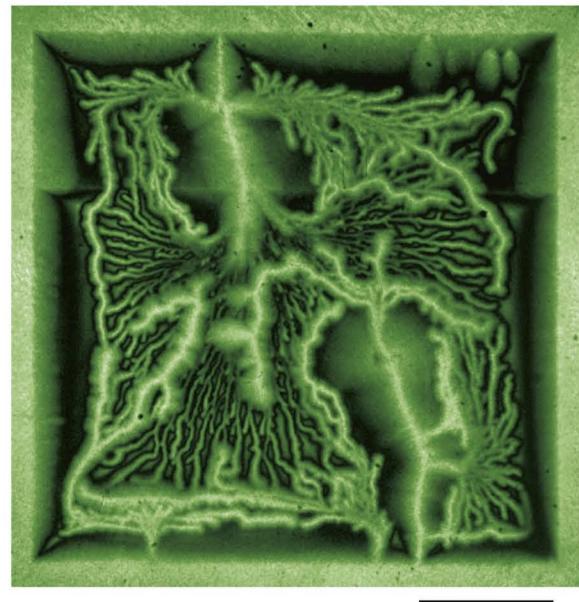
En forelesningsserie på Naturfagbiblioteket ved Universitetet i Oslo kom i stand med et bidrag fra Fysisk institutt på 50 000 kr. Seks foredragsholdere fra ulike fagområder snakket om tema som lyset og verdensbildet, fotosyntesen, solceller, sollyset, sol og helse og nordlyset. Foredragene ble fremragende fremført, og kan sees på Youtube,⁽³⁾. De har så langt nådd ut til ca. 1000 interesserte.

Institutt for fysikk og teknologi ved Universitetet i Bergen bevilget 20 000 kr til en fotokonkurranse med tema ”lys”, som fikk over 50 bidrag. *Henning S. Pettersen* vant 1. premien på 10 000 kr, med et bilde fra en T-banestasjon i Oslo (figur 1). *Michael Baziljevich* vant 2. premie med et foto av magnetfelt som har trengt inn i en høytemperatur-superledende tynnfilm (figur 2), og *Jarle H. Moe* fikk 3. premie med et bilde av et lynnedslag (figur 3). Nærmere omtale finnes på [lysåret.no](#)-bloggen.

Ved NTNU ble *Nordic Physics Days* arrangert, med innslag inspirert av Lysåret. Nobelprisvinner 2012, *Serge Haroche*, nevnes spesielt med sitt åpningsforedrag ”*Controlling photons in a box and raising Schrödinger cats of light: when thought experiments become real*”.



Figur 1. Førstepremie-bildet: ”T-banestasjon i Oslo”, tatt av *Henning S. Pettersen*. Bildet er tatt på Nydalen T-banestasjon, der en lysinstallasjon med forskjellige farger skaper en fin stemning i rulletrappa. Kameraet ble lagt i rulletrappa med litt lang lukkertid.



Figur 2. Andrepromie-bildet, tatt av *Michael Baziljevich*. Bildet viser hvordan et magnetfelt har trengt inn i en høytemperatur-superledende tynnfilm (YBCO) når denne er blitt utsatt for et raskt økende magnetfelt. Det lynlignende mønsteret skyldes en termo-magnetisk ustabilitet som dramatisk forandrer feltets inn-trenging i prøven.

Institutt for fysikk og teknologi, UiT Norges Arktiske Universitet, bevilget 30 000 kr som bidrag til feiring av Lysåret. Det ble følgelig arrangert en rekke foredrag under Åpen Dag på Teknologibygget, om ”Nordlyset – mer enn vi ser”, om hvordan vi observerer planeten vår, om solceller i Norden, og om ”Stjernekraft – fremtidens energikilde”.

”Fra fysikkens verden” viet Nr. 1/2015 til Lysåret, der ”Optisk overvåking av vann” og ”Efektive solceller for hydrogen fra vann” var blant temaene. Også senere utgaver av FFV i 2015 hadde artikler inspirert av Lysåret, f.eks. ”Lysleende fibrar: Det som skapte Internett”, og ”Belysnings-teknologiens rivende utvikling”.

Også andre aktører bidro til feiringen av Lysåret. Vi nevner spesielt utstillingen på Lindesnes Fyr, der ca. 60 000 besøkende var innom i løpet av det halve året den var åpen. Norsk forening for fotobiologi og fotomedisin (NOFFOF) hadde en foredragsserie på Litteraturhuset i Oslo under Forskningsdagene 2015, med 7 foredrag om lys relatert til biologi og medisin. Høyskolen Stord Haugesund (Stord) deltok aktivt i ”*Skylight – a Global Science Opera*”, en globalt arrangert operaforestilling som ble gjennomført i 35 land samtidig. Også bladet ”Naturen” (2/2016) trykket en lengre artikkel om Lysåret. Til sist bør også nevnes de



Figur 3. Tredjepremie-bildet, tatt av Jarle H. Moe, av det han selv beskriver som "Det mest spektakulære lysfenomenet på jorden". Her sett over Askøybroen.

ulike høyskolene, organisasjonene og firmaene som driver med lys og lysarkitektur, som hadde flere spektakulære arrangementer der Lysåret var markert, blant annet en festival holdt av Solund Lys, Oslo Lux-utstilling og symposium, samt en lysfestival ved Akerselva, arrangert av Norske Lysdesignere.

Referanser

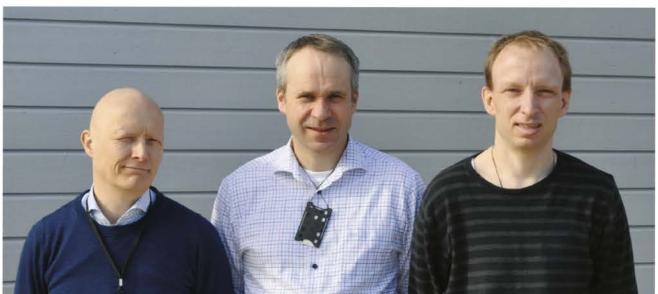
1. Internett: <https://www.facebook.com/lysaaret/>
2. Internett: <http://xn-lysret-kua.no/>
3. Internett: https://www.youtube.com/playlist?list=PL6zSfYNSRHalgZk_OtRnjEPUTxlnCNGmO

Åshild Fredriksen

∞

FFV Gratulerer

Tycho Jægers pris i Elektrooptikk til Helge Fonnum, Magnus Haakestad og Espen Lippert



Helge Fonnum, Magnus Haakestad og Espen Lippert

Tycho Jægers pris i Elektrooptikk gis for et norsk arbeid på fagområdet elektrooptikk eller et arbeid der elektrooptiske metoder er anvendt. Den skal gis som belønning for et arbeid som er utført av en eller flere personer innenfor de fem siste årene før utdelingen. Arbeidet skal være av høy faglig kvalitet. Både grunnleggende og anvendt forskning kan tilgodesees. Prisen er på 100 000 kr og deles ut hvert annet år på Elektrooptikk-møtet.

Tycho Jægers pris i Elektrooptikk ble delt ut første gang på Elektrooptikk-møtet på Voss 13–15 april 2016, og ble tildelt Helge Fonnum, Magnus Haakestad og Espen Lippert fra Forsvarets forskningsinstitutt (FFI), for fremragende forskning på lasere med infrarøde bølgelengder fra 2 til 8 μm .

Prismottakerne har utviklet en laser basert på en krystall av yttrium-litium-fluorid dopet med holmium og kjølt med flytende nitrogen. Laseren har bølgelengde 2,05 μm , god strålekvalitet og rekordstor pulsenergi på 550 mJ, og puls lengde på 14 ns. Videre har forskerne utviklet nye optisk-parametriske oscillatorer og forsterkere som gir laserlys med lengre bølgelengder.

Lasere med bølgelengder litt over 1 μm er en velutviklet teknologi, og både høy pulsenergi og høy gjennomsnittseffekt er tilgjengelig kommersielt. Lasere for lengre bølgelengder må baseres på materialer som er vanskeligere å arbeide med og/eller krever optisk frekvensomforming. Disse teknologiene er langt mindre "modne", og det er på dette feltet prismottakerne har bidratt. Kjøling med flytende nitrogen (-196 °C) gjør at lasermediet får bedre egenskaper både termisk og optisk, og den oppnådde pulsenergien er rekordhøy for holmium-baserte lasere.

For å komme til lengre bølgelengder har forskerne utviklet optiske frekvensomformere (parametriske oscillatorer og forsterkere) som drives av holmium-laseren, og de har oppnådd 200 mJ i bølgelengdeområdet 3–5 μm og 45 mJ ved ca. 8 μm . Dette er rekordhøye energier for pulser med bølgelengdene. Strålekvaliteten er god også etter frekvensomformerne, noe som er viktig for anwendelser i forsvar og fjernmåling.

Resultatene er publisert i internasjonale tidskrifter og på internasjonale konferanser.

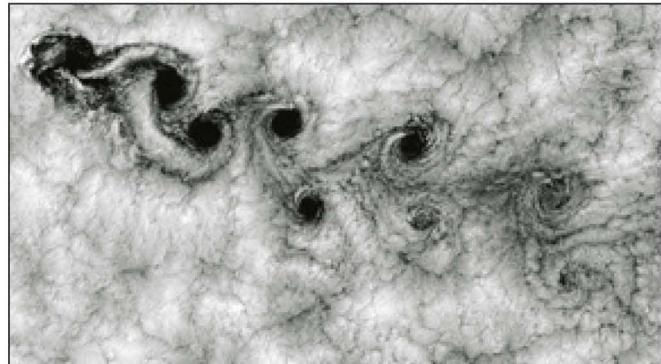
Aasmund Sudbø

∞

Vorteksfysikk i kvantevæsker

Kristian Fossheim *

Det blir gitt ei oversikt over historia til superfluide væskers fysikk. Fenomenet ”kvantisering av sirkulasjon” er viktig i denne samanhengen og blir omtala. Med helium II som eksempel blir det forklart korleis vår forståing av superfluiditet har utvikla seg. Artikkelen blir avslutta med ei oppsummering av kvantiseringssreglar for superflider og superleiarar.



Figur 1. Turbulens, som ei rekke kvervlar på stor skala, skapt i luftstraum forbi ei av Juan Fernandez-øyane utanfor Chile (frå Wikipedia).

Kvervlar og turbulens i klassiske væsker og gassar

Einkvar som har teke seg tid til å observere vatn som strøymar forbi steinar i ein bekk eller ei elv, vil ha lagt merke til to typar strøymingsmønster: Når straumen er roleg, glir vatnet over og forbi steinar utan noko spesielt mønster, det vi kallar laminær straum. Men i sterkare straum oppstår det eit mønster av alternerande, roterande straumar, kvervlar. Dette er fenomenet turbulens som kan vise seg på omrent alle tenkjelege storleksskalaer, til dømes når væske eller gass strøymar forbi ei hindring. Ein variant av dette er kvervelstraumar som blir genererte frå spissen av flyvengjer, eit alvorleg fåremoment for etterfølgjande fly inn og ut av flyplassar. Endå meir kjent er kvervelstraumar i tornadoar som kan ”terrorisere” vide områder og knuse heile bygningar, noko som ofte skjer i Midt-Vesten i USA.

Ifølgje rådande teori etter Kolmogorov, blir kvervlane brotne opp til mindre og mindre skala. Dette kan vi også sjå i figur 1. Først etter nedbryting til ein skala som er mange storleiksordnar mindre enn opphaveleg skala, etter at kvervelmønsteret ikkje lenger har nokon føretrekt retning i rommet, blir kvervlane dissiperte ved viskositet, og blir borte. Så langt er dette klassisk fysikk.

Men kverelfenomen er også viktig i system der kvantefenomenet opptrer. Slike fenomen er stadig like aktuelle, og er blitt studerte meir og meir gjennom

nom dei siste 50–60 åra, i både superfluid væske og i faststoff superleiarar. Her trengst det ei heilt anna tilnærming. Vi vil sjå nærmare på fysikk og kvantiseringssreglar, og brukar nemninga ”vorteks” om kvantekvervlar som oppstår.

Litt historie

Då edelgassen helium for første gong vart kondensert til væske i Kamerlingh Onnes sitt laboratorium i Leiden i 1908, la det grunnlag for eit spennande hundrear i fysikken, med stadig nye oppdaginger ved temperaturar nedover mot det absolutte nullpunktet, $T_0 = -273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ikkje berre skulle heliumvæska vise seg å vere uhyre interessant i seg sjølv, men tilgangen til helium som kjølevæske mogeleggjorde oppdaginger og teknologisk utvikling som vi i dag har vanskeleg for å tenke oss utan, og samtidig det å nærme seg nullpunktet meir og meir. Men det absolutte nullpunktet er i prinsippet like uoppnåelig fysisk som uendeleg høg temperatur. At dette er ein realitet og ikkje ein floskel, er i dei seinare ti-åra blitt godt dokumentert ved eksperiment heilt ned i området nanokelvin (10^{-9} K) til picokelvin (10^{-12} K) i superfluid atomkondensat av alkaliometall.

Dei superfluide eigenskapane til helium II ved temperaturar under $T_\lambda = 2,172\text{ K}$ vart i 1937 oppdaga samtidig i Cambridge, av dei kanadiske

* Institutt for fysikk, NTNU, Trondheim.

forskarane J.F. Allen og A.D. Misener, og i Moskva av den russiske fysikaren Pjotr Kapitsa. Begge grupper oppdaga at superfluid helium II hadde null viskositet: Transport av superfluid gjennom trange rør viste seg å vere uavhengig av trykket! Ein forbløffande effekt, sjølv sagt, og ein klår parallel til superleiing. Oppdagingsane vart publiserte i to uavhengige artiklar i *Nature* den 8. januar 1938. I *Nature*-artikkelen brukte Kapitsa for første gong nemninga "superfluid": *it is perhaps sufficient to suggest, by analogy with superconductors, that the helium below the λ -point enters a special state which might be called a "superfluid".*

Kapitsa arbeidde hos Rutherford i Cambridge i mange år, og bygde opp det berømte Mond-laboratoriet. Men ved eitt av sine besøk i Sovjet i 1934, fekk han forbod mot å forlate landet. At dette var politisk motivert er ikkje dokumentert, men at det skjedde etter ordre frå høgste hald, er det vel liten tvil om. Men Kapitsa fekk kjøpe mykje av utstyret han hadde brukt i Cambridge, og bygde opp sitt eige institutt i Moskva.

40 år etter artikkelen i *Nature* delte Pjotr Kapitsa Nobelprisen i fysikk for 1978 med Penzias og Wilson! Grunngjevinga var ganske generell, truleg for å unngå konflikt med Allen og Misener.

Kapitsa var ein svært mektig mann i sovjetisk forsking. Stalin var personleg interessert i han, og var så nøgd med arbeidet hans at han støtta han då han kom i konflikt med den frykta KGB-sjefen Beria. Ikkje mange ville ha overlevd noko slikt. Eit anna døme er at Kapitsa personleg i brev til Stalin trua med å forlate stillinga si om ikkje den strålende teoretikaren Lev Landau vart sett fri fra fengsel. Landau vart sett fri i 1939, etter eitt års opphold i NKVD-fengselet Lubjanka. Han "takka for hjelpa" med å setje fram ein nyskapande teori for superflytande helium i 1941.

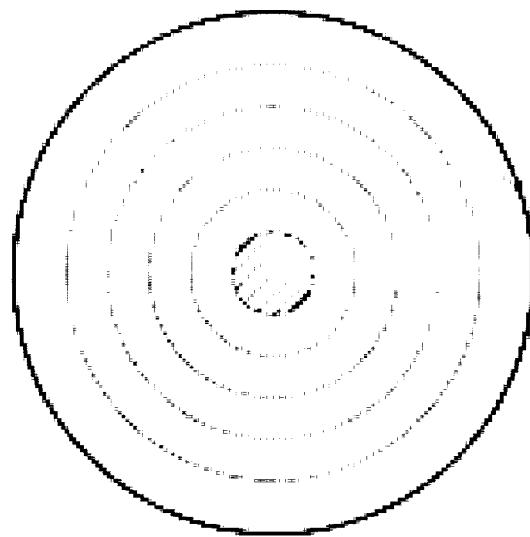
Konfliktar knytt til viktige oppdaginger er ikkje uvanleg. I tilfellet superleiarar gjeld "dramaet" Abrikosovs teori for eksistensen av kvantevorteksar, publisert i 1957. Landau hadde då i fire år nekta han å publisere resultata, heilt til Feynman sitt arbeid⁽¹⁾ om helium II vart kjent i Moskva. Landau aksepterte straks Feynmans arbeid. Men Abrikosov kunne nå triumferande fortelje Landau at "Dette er jo det same som eg alt har gjort i superleiar!"⁽²⁾ Kvifor trudde du ikkje på mitt arbeid, men godtok Feynman sitt? Paralleliteten mellom dei to fysiske systema vart nå endå tydelegare. L. Tisza formulerte i 1938 den såkalla to-væskemodellen for superleiar,⁽³⁾ og Landau brukte ein liknande modell

for superfluid helium i 1941.⁽⁴⁾ I superleiarar kom seinare Abrikosov til å innføre nemninga "type II superleiar" i 1957, for den klassen som har mest til felles med superfluide væsker.

Sjølv om superfluiditet ikkje har tiltrekt seg same breie interesse som superleiing, er fysikken ikkje mindre fascinerande. På teorisida har kvantefysikken i superfluid, her inkludert superleiar, tre store aktørar: Onsager, Feynman og Abrikosov. Og vår landsmann Lars Onsager var den aller første som foreslo, ja fastslo, i ein diskusjonsmerknad ved eit møte i Firenze i 1949, at under rotasjon av superfluid helium II er den hydrodynamiske sirkulasjonen Γ , svarande til dreieimpulsen i mekanikken, kvantisert i heiltalige einingar av $\kappa = h/m$, der h er planckkonstanten og m er massen til heliumatomet.⁽⁵⁾

Kvantisering av sirkulasjon – Onsager og Feynman

Figur 2 illustrerer Onsagers modell for kvantisering av sirkulasjon:^(5,6) Ein sylinderisk behaldar med helium II roterer med vinkelfart Ω . Det sentrale området, skravert, ligg i ro. Dei konsentriske ringane utanfor har trinnvis aukande sirkulasjon $\Gamma = \kappa, 2\kappa, 3\kappa \dots$ Onsager fastslo vidare at dreieimpulsen per partikkel er eit heiltal av \hbar . Onsager annonserte her eit nytt og heilt overraskande kvantefenomen i fysikkens historie, noko som vekte be-



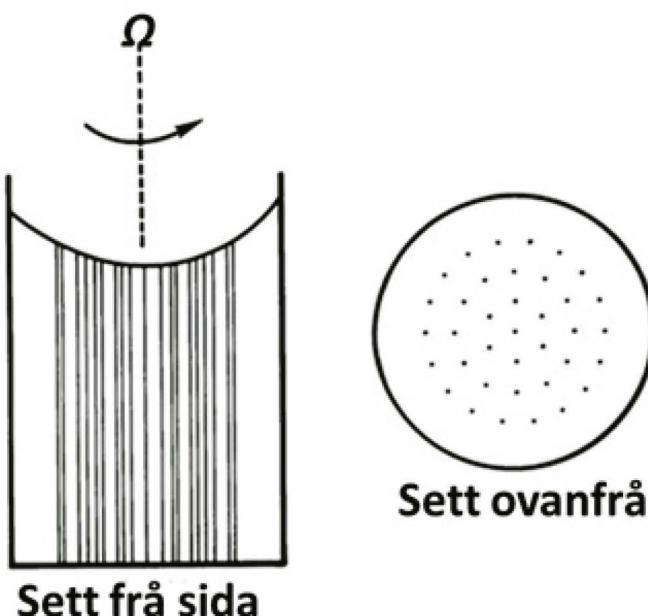
Figur 2. Onsagers modell for kvantisert sirkulasjon om sentrum i roterande helium II. Den sentrale delen, skravert, roterer ikkje, og kunne dermed like godt vere ein fast kjerne langs aksen. Ringane kan då ha suksessivt aukande antal sirkulasjonskvanta, h/m (frå Ref. 6).

tydeleg oppsikt. Det var før tilsvarende fenomen var oppdaget i superleiarar. Onsager var alt berømt, mellom anna for den formidable løysinga av den 2-dimensjonale Ising-modellen, så hans ord hadde stor vekt.

London arbeidde vidare med Onsagers modell med utgangspunkt i Bose-Einsteinmodellen⁽⁷⁾ og fann at situasjonen i figur 2 blir realisert ved rotasjonsfrekvens over ein kritisk verdi $\Omega = \hbar/2mR^2$, der R er radius i sylinderen. Den skraverte kjernen ligg i ro, og har tydelegvis same effekt som om helium var erstatta av ein streng eller eit rør, langs aksen. Dette sikrar at behaldaren er "multiply connected" noko som må vere oppfylt for at kvantisering av den totale sirkulasjonen rundt sentrum kan skje (sjå avsnittet "Kvantisering").

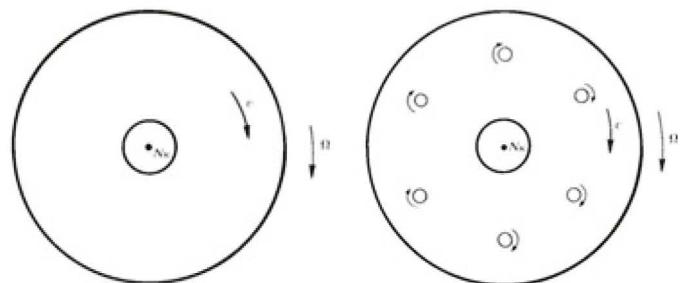
Omhyggelege målingar har stadt festa kvantisering av sirkulasjon, hovudsakeleg i samsvar med denne modellen. Superfluidet vart halde i ein roterande sylinder med ein streng langs aksen, det som på fagspråket kallast ein "annulær ring".

Men då Feynman kom på banen i 1954–55, presenterte han eit heilt nytt bilete av kvantisert sirkulasjon i superfluid.⁽¹⁾ Først nå kom den verkelege vorteksfysikken. Feynman foreslo kvantisert sirkulasjon i form av svært tynne filament med roterande helium II, med ein normal kjerne på 0,1 nm i diameter, etter kvantefysisk analyse. Han gav ein enkel formel for tettleiken av vorteksar: $n_0 = \frac{2\Omega}{\kappa} \sim 2 \cdot 10^3 \Omega$ vorteksliner/cm² (Feynmans regel). Eksperimenta viste eit resultat som vist i figur 3.



Figur 3. Helium II i roterande spenn. Hall og Vinen 1956, og Hall 1960 (frå Ref. 6).

Det var nettopp slike tynne vorteksfilament Abrikosov hadde funne teoretisk for det som sidan vart kalla "type II superleiar", og som vart referert til i sitatet ovanfor.⁽²⁾ Feynman viste og at energien per lengde av ein vorteks er proporsjonal med κ^2 . Dermed vil ein vorteks med kvantisering 2κ ha ein energi per lengde som er proporsjonal med $4\kappa^2$, altså fire gonger så stor som om den var broten opp i fire elementære vorteksar med sirkulasjon κ .



Figur 4. Roterande annulær ring med låg rotasjonsfrekvens, Ω til venstre og høg frekvens til høgre. Kvantisert sirkulasjon i begge. N_κ er talet på sirkulasjonskvant i væska, og ekvivalent med ein vorteks av styrke N_κ i sentrum. (Frå Ref. 6).

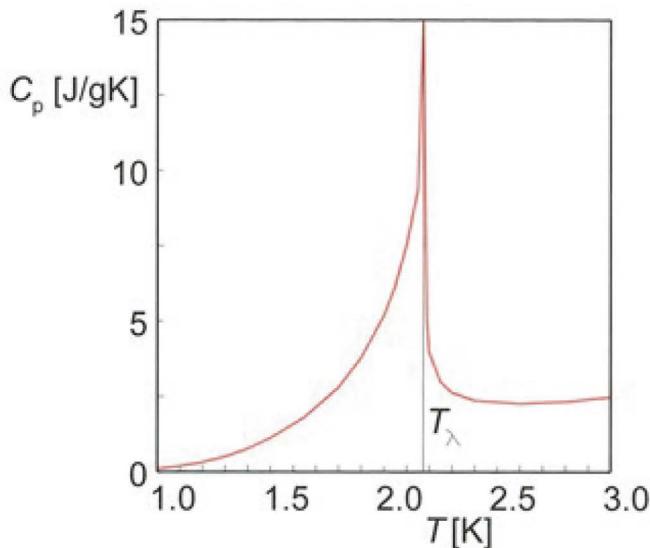
og energi κ^2 . Dette favoriserer elementære vorteksar heller enn vorteksar med fleire sirkulasjonskvant. I praksis er det heller ikkje oppdagat anna enn elementære vorteksar i helium II. Forma på væskeoverflata samsvarar med klassisk bilde. Men der er eit klart skilje mellom Onsagers sirkulasjonskvantisering, vist i figur 2, og Feynmans vorteksfilament, vist i figur 3.

Merkelege eksperimentelle fakta i helium II

Fenomen ein kan studere i helium II

Faseovergangen frå helium I til II ved $T_\lambda = 2,172$ K viser ein stor topp i varmekapasitet, sjå figur 5. I ettertida er det forklart at denne "anomalien", som er typisk for kontinuerlege faseovergangar, og ofta kalla "andre ordens faseovergang", her skuldast termiske eksitasjonar av kortlevde vorteksringar som får sitt maksimale tal ved faseovergangspunktet.

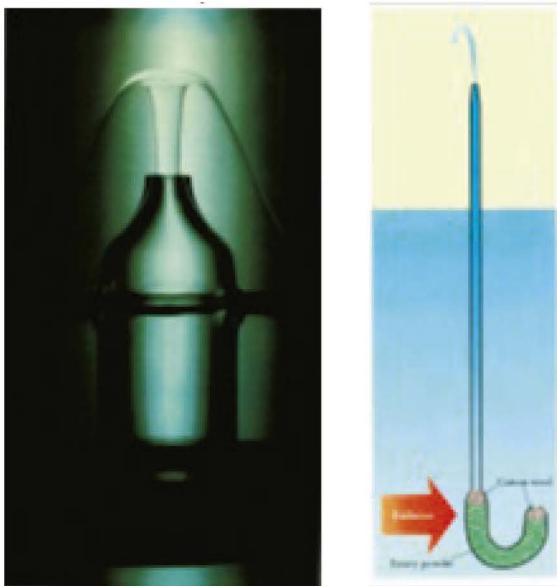
Null viskositet. Helium II strøymer gjennom trange rør utan viskositet, analogt med null elektrisk motstand i ein superleiar. Den normale komponenten av helium II fester seg til veggene, mens den superflytande fasen strøymer heilt fritt gjennom. L. Tisza forklarte dette med to-væske-modellen (sjå neste avsnitt).⁽³⁾



Figur 5. Varmekapasitet i helium ved 2,172 K liknar på den greske bokstaven λ , og kallast difor ofte lambda-overgangen (frå Ref. 8).

Stille koking. Straks temperaturen er senka under 2,172 K sluttar all koking frå det indre av væska. Heile væskevolumet blir brått heilt roleg. All koking skjer frå toppen av væska! Dette heng saman med at helium II under T_λ er ein perfekt varmeleiar. Temperaturen er då den same overalt, også i veggene. Difor vert det ikkje skapt bobler, og ingen turbulens. Frå overflata blir atom "skotne" ut (fordampa) ved roton-kollisjon (sjå om roton nedanfor), analogt med fotoelektrisk effekt.

Fonteneeffekten, vist i figur 6. Foto til venstre, skisse til høgre. Eit ope, vertikalt rør er fylt med



Figur 6. Fonteneeffekten. Til venstre eit foto frå laboratoriet. Til høgre illustrasjon av metoden (frå Ref. 8).

fint pulver nederst og plassert i helium II. Når røret med pulver blir tilført varme frå ei lyskjelde, vil ein stråle av heliumvæske strøyme ut frå toppen av røret. Forklaringa er at varmen genererer roton og foton frå superfluidet og eksanderer. Dette løfter væskeoverflata øvst i røret, og væske strøymer ut, samtidig som pulveret tilløft nytt superfluid å strøyme inn nedst. Fontenen vil difor halde fram å strøyme kontinuerleg.

Sjølvtomming. Eit beger med helium II som blir løfta ut av væska, vil etter kvart tømme seg sjølv(!) ved at væska dannar ein rein, tynn film og kryp oppetter veggene inne i behaldaren og ned på utsida, der ho dryp ned. Om begeret er delvis nedsenka i helium II, vil væska renne ut inntil nivåa er like inni og utanfor. Omvendt, om væskenivået er lågast inni, vil superfluid renne inn og likestille nåvåa ute og inne.

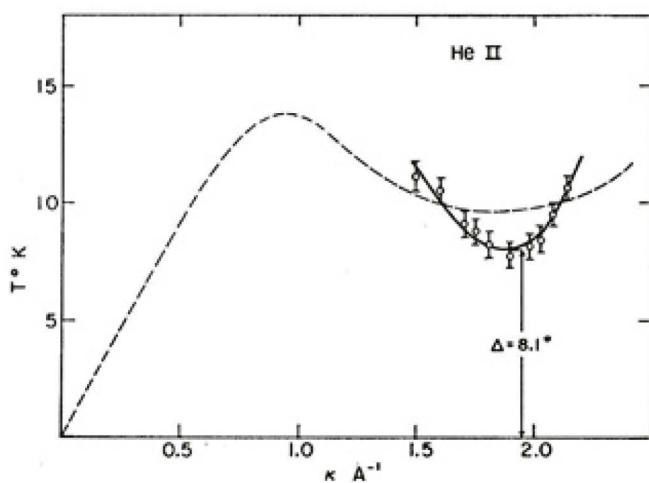
Kvantevorteksar. Det er hovudtema i denne artikkelen. I ein sylinderisk behaldar med helium II som roterer langsamt, vil berre den såkalla normale komponenten av væska følgje med i rotasjonen, mens den superfluide komponenten vil ligge i ro. Men om ein aukar rotasjonsfrekvensen over ein viss kritisk verdi, blir sirkulasjonen om sentrum kvantisert. Nå vil også den superfluide komponenten rotere med, og alle atom i behaldaren vil ha same dreieimpuls \hbar . Alle atom "marsjerer i tak" (*lockstep motion*). Ved endå høgre rotasjon oppstår kvantevorteksar, som vist i figur 4.

Kva er eigentleg eit superfluid?

Frå L. Tiszas forslag til to-væskemodellen i 1938:⁽³⁾ "Atoma som høyrer til det lågaste energinivået, tar ikkje del i dissipasjonen. Viskositeten til systemet kjem frå dei eksiterte atoma." Modellen er då ei væske av to komponentar: ein superfluid komponent med null entropi og null viskositet, og ein normal komponent av atom i eksiterte tilstandar som har viskositet og transporterer varme. I denne modellen har helium II berre ein superflytande komponent ved $T = 0$ K, og berre ein normalkomponent ved $T = T_\lambda$. Begge endrar seg kontinuerleg mellom dei to ytterpunktta. Modellen hadde stor suksess, og blir gjerne nytta i samband med magnetisk skjerming i superleiarar. Men eksperiment viser at berre ein mindre del, kring 1/7, er i superfluid tilstand ved dei lågaste temperaturane.

Landau la i 1941 eit djupare teoretisk fundament då han foreslo ein svært overraskande disper-

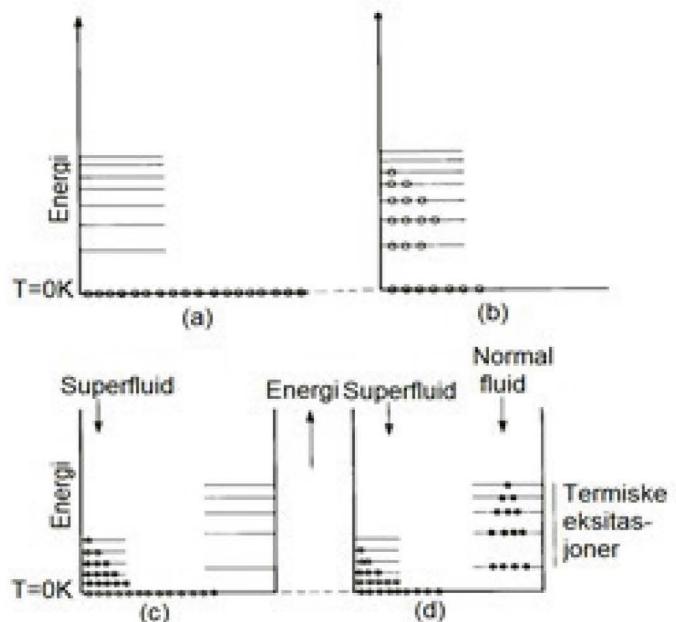
sjonsrelasjon for helium II, vist i figur 7, som oppsummerer dei kollektive eksitasjonane i væska.⁽⁴⁾ Han gjer her tidleg bruk av omgrepene ”kvasipartikkel”. Den lineære delen for små bølgjevektorar er som for andre væsker og gassar. Men for lengre bølgjevektorar går den til slutt ned att og gjennom eit minimum. Landau brukte namnet roton på dei eksitasjonane som måtte finnast her, utan at det vart gitt eit biletet av strukturen til eit roton. Men ettertida har vist at dei finst som lokale eksitasjonar med liten fysisk utstrekning. I dag vil ein seie



Figur 7. Den stiplede kurva viser Landau sitt forslag til dispersjonsrelasjon, eksitasjonsenergi som funksjon av bølgjevektor for helium II. Heiltrekt kurve med symbol er resultat frå nøytronspreiingsexperiment i 1956 (frå Ref. 9).

at roton representerer korrelasjonar mellom vekselverkande atom. Det nærliggande forslaget om at det kan vere små kvantevorteksar blir avvist. Landau sin rotonfysikk er blitt ettertrykkeleg bekrefta ved nøytronspreiing.⁽⁹⁾ Landau sin teori gjekk rett inn i to-væskemodellen til Tisza. I læreboka til Landau og Lifshitz i fluidmekanikk finst ein fin diskusjon av subtile trekk ved to-væskemodellen. Dei understrekar at ein ikkje må sjå på den som to væsker i blanding, men som ei væske som har begge eigenskapane det er snakk om. I dette biletet er fonon og roton rett og slett å forstå som det som er den normale komponenten. Likevel fungerer det ofte godt fenomenologisk å behandle dei to typene eksitasjonskvanta som ein eigen separat del av væska, som normalkomponenten. Figur 7 viser eit presist biletet av korleis Landau såg eksitasjonsspekteret. Figuren viser også dei første bekreftande observasjonane frå 1956,⁽⁹⁾ der ein av forskarane var nordmannen Kaare Otnes, Lillestrøm. (Otnes fylte 92 år i år.)

Den superfluide komponenten av He II blir kalla kondensat. ^4He -atomet har heiltalige kjernespinn og er såleis ein Bose-Einsteinpartikkel: For B-E-partiklar gjeld at der ikkje er restriksjonar for kor mange av dei som kan vere i same kvantetilstand. Om der er mange samtidig i grunntilstanden, har ein å gjere med eit B-E-kondensat. Det er kondensattilstanden som er det mest fundamentale aspektet ved helium II, og som gjer alle dei ”rare” eigenskapane mogelege. Ved 0 K er det estimert at omtrent 13 % av atoma er i ein tilstand av null energi og impuls.⁽⁶⁾ Figur 8 viser tydeleg korleis ein kan tenke seg energispekteret i superfluid helium. F. London foreslo i 1938 at superfluid faseovergang i helium skuldast Bose-Einstein-kondensasjon, ein væskemodell som i ideell form er utan vekselverknad mellom atoma.



Figur 8. (a) og (b) viser energispekteret i ein ideell Bose-Einstein-modell (BE). (a) viser energispekteret i kondensatet ved $T = 0 \text{ K}$. I BE-modellen er alle partiklar i grunntilstand ved $T = 0 \text{ K}$. (b) viser BE ved $0 < T < T_\lambda$. Ei blanding av eksitere partiklar og partiklar i grunntilstand i kondensatet. (c) viser reell situasjon i superfluid, der eksitasjonar finst også ved $T = 0 \text{ K}$. Endeleg viser (d) det totale biletet i helium II ved $0 < T < T_\lambda$ (frå Ref. 8).

Kvantisering av sirkulasjon og fluks

Der er analogi mellom kvantefenomena superleiring og superfluiditet. I superleiarar er det *magnetisk fluks* Φ som er kvantisert, i kvantiseringseininger

$h/2e$. Fluksen er definert som linjeintegralet av vektorpotensialet \mathbf{A} :

$$\Phi = \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} = n(h/2e)$$

For superfluid spelar sirkulasjon, Γ , ei tilsvarende rolle som den magnetiske fluksen. Sirkulasjonen av vorteksar er definert som linjeintegral av fartsvektoren \mathbf{v} for fluidet om vorteksen. Kvantiseringa kjem fram ved å krevje at vinkelimpulsen L er kvantisert på same måten som elektronbanar (radius \mathbf{r}) i Bohrs atommodell:

$$L = m v r = n(h/2\pi)$$

som gir

$$v = n h / (2\pi m r).$$

For sirkulasjonen får ein då

$$\Gamma = \oint \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l} = n h / (2\pi m r) \int_0^{2\pi r} dl = n \frac{h}{m} = n\kappa.$$

Sirkulasjonen Γ i superfluid er altså kvantisert i einingar av $\kappa = h/m$.

Sluttord

Vi har sett at sjølv om superfluid og superleiar står fram som svært ulike mangepartikkkel-kvantesystem, har dei det til felles at kvar av dei har bølgjefunksjon som strekkjer seg gjennom eit heilt kondensat, og tillet eksistensen av makroskopiske kvanteobjekt: kvantekvervlar, eller kvantevorteksar, bokstaveleg tala ”tornadoar” av kvervlande atom i eit superfluid, og av cooperpar i ein superleiar. I eit superfluid er det sirkulasjonen (svarande til dreieimpuls i mekanikken) som er kvantisert. I ein superleiar er det magnetisk fluks. I dei seinare tiåra har vi sett ei sterkt fornya interesse for desse fenomena. Først kom oppdaginga av to superfluide fasar i ${}^3\text{He}$ i millikelvinområdet på 1970-talet, så frå 1995 kom superfluid kondensat av alkalimetall ved enda mykje lågare temperaturar.

I denne artikkelen har vi diskutert særleg den historisk viktige superfluide fasen til ${}^4\text{He}$, oftest referert til som helium II, og parallelført dette med superleiar. (Les gjerne også ein artikkel av Vinen som ligg på Internett:

<http://cds.cern.ch/record/808382/files/p363.pdf>.

Ei parallelføring av vorteksfysikken i superfluid og superleiar er sjeldan å finne i litteraturen. Sjølv har eg ikkje funne ei slik framstilling. Det har vore hovudmotivasjonen for å skrive denne artikkelen.

Referansar

1. R.P. Feynman: *Application of quantum mechanics to liquid helium*. Progress in Low Temperature Physics, 1, 17–53 (1955)
2. A.A. Abrikosov (sitat i boka av denne forfattaren): *Superconductivity: Discoveries and Discoverers*. Springer-Verlag (2013)
3. L. Tisza: *Transport phenomena in Helium II*. Nature, 141, 913 (1938)
4. L.D. Landau: *The theory of superfluidity of helium II* J. Phys. USSR, 5, 71 (1941),
og *On the theory of superfluidity of helium II* II. 11, 91 (1947)
5. L. Onsager: *Discussion remark*. Nuovo Cimento Suppl. 6, 249–50 (1949)
6. R.J. Donnelly: *Quantized Vortices in Helium II*. Cambridge University Press, (1991)
7. F. London: *Superfluids II*. John Wiley and Sons, New York, (1954)
8. R.J. Donnelly: *The Discovery of Superfluidity*. Physics Today, July 1995, 30 (1995)
9. H. Palevsky, K. Otnes, K.E. Larsson: *Excitations of Rotons in Helium II by Cold Neutrons*. Physical Review, 112, 11–18 (1956)
10. D.R. Tilley and J. Tilley: *Superfluidity and Superconductivity*. Adam Hilger Ltd, Bristol, (1986)

∞

**Husk å melde
adresseforandring
til sekretæren
i NFS!**

Det europeiske superrøntgenanlegget ESRF under oppgradering

Ragnvald Mathiesen *

Røntgenstråling er svært viktig i naturvitenskapelig forskning og benyttes i et rikt utvalg av eksperimentelle metoder innenfor mange ulike fagdisipliner. De kraftigste og mest allsidige røntgenkildene vi rår over er partikkelakseleratorer som er dedikert til strålingsproduksjon, såkalte synkrotroner eller fri-elektronlasere. ESRF er et av de mest fremtredende anleggene for produksjon av røntgenstråling til eksperimentell forskning, og benyttes av om lag 6500 eksterne forskere per år, inkludert flere norske forskningsgrupper. Nå setter ESRF i gang en oppgradering av partikkelakseleratoren som vil gi muligheter for helt nye eksperimenter i det neste tiåret.

Innledning

Det felleseuropiske synkrotronstråleanlegget, ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*), kom i drift i 1994.⁽¹⁾ Anlegget har etablert seg som det fremste og mest produktive synkrotronstråleanlegget på verdensbasis. ESRF finansieres av 13 europeiske medlemsland og 8 assosierte medlemmer. Norge har vært medlem av ESRF helt fra stiftelsen, gjennom et nordisk konsortium med Danmark, Finland og Sverige, kalt *Nordsync*, som eier 5 % av ESRF. Den norske andelen av Nordsync er 25 %. ESRF er lokalisert i Grenoble, i den sørøstlige delen av Frankrike.

Etter 15 år i regulær drift, satte ESRF i 2009 i gang et oppgraderingsprogram som totalt strekker seg over 13–14 år. Programmet har som formål å sikre anleggets fremtid som et "flaggskip" for utvikling av nye synkrotronrøntgenbaserte eksperimentelle metoder, og sørge for at det europeiske synkrotronbrukermiljøet også i fremti-

den har tilgang til *state-of-the-art*-fasiliteter for eksperimentell forskning ved hjelp av høyenergetisk røntgenstråling. Nå blir første fase av oppgraderingen avsluttet, og en ny spennende epoke står for tur idet ESRF lanserer trinn to, som omfatter en ombygging av selve strålingskilden.



Figur 1. ESRF-anlegget. Den sentrale ringen huser lagringsringen og de opprinnelige strålelinjelaboratoriene. Omkretsen av lagringsringen er ca. 1 km. Ny bygningsmasse kan sees på utsiden av ringen. I øvre høyre region vises også reaktoren til *Institute Laue-Langevin* der det produseres nøytroner for forskningsøyemed.

Synkrotronstråling for materialforskning

Begrepet synkrotronstråling betegner elektromagnetisk stråling produsert ved akselerasjon av superhurtige elektroner eller positroner, langs sirkelbuer eller sinusformede avbøyningsbaner. Moderne

* Institutt for fysikk, NTNU, Trondheim, og nordisk representant i ESRFs vitenskapskomité.

synkrotronstråleanlegg er dedikerte til å produsere stråling for forskningsøyemed, med fotonenergier som kan strekke seg fra 10 eV opp til 700 keV (UV til hard røntgenstråling). Synkrotronbasert forskning har et meget bredt nedslagsfelt med etablerte brukermiljø fra en rekke faglige disipliner som kondenserte mediers fysikk, overflatefysikk, nanovitenskap, kjemi, materialteknologi, medisin, biovitenskap, m.fl. Det finnes om lag 40 operative synkrotronanlegg på verdensbasis,⁽²⁾ og i tillegg et talls operative og planlagte fri-elektronlasere som vil tjene til lignende formål.^(2,3) ESRF alene besøkes årlig av 6500 eksterne brukere. Disse gjennomfører rundt 1500 eksperimenter som resulterer i 1900 vitenskapelige artikler per år, hvorav 15 % i såkalte "high-impact" tidsskrifter.

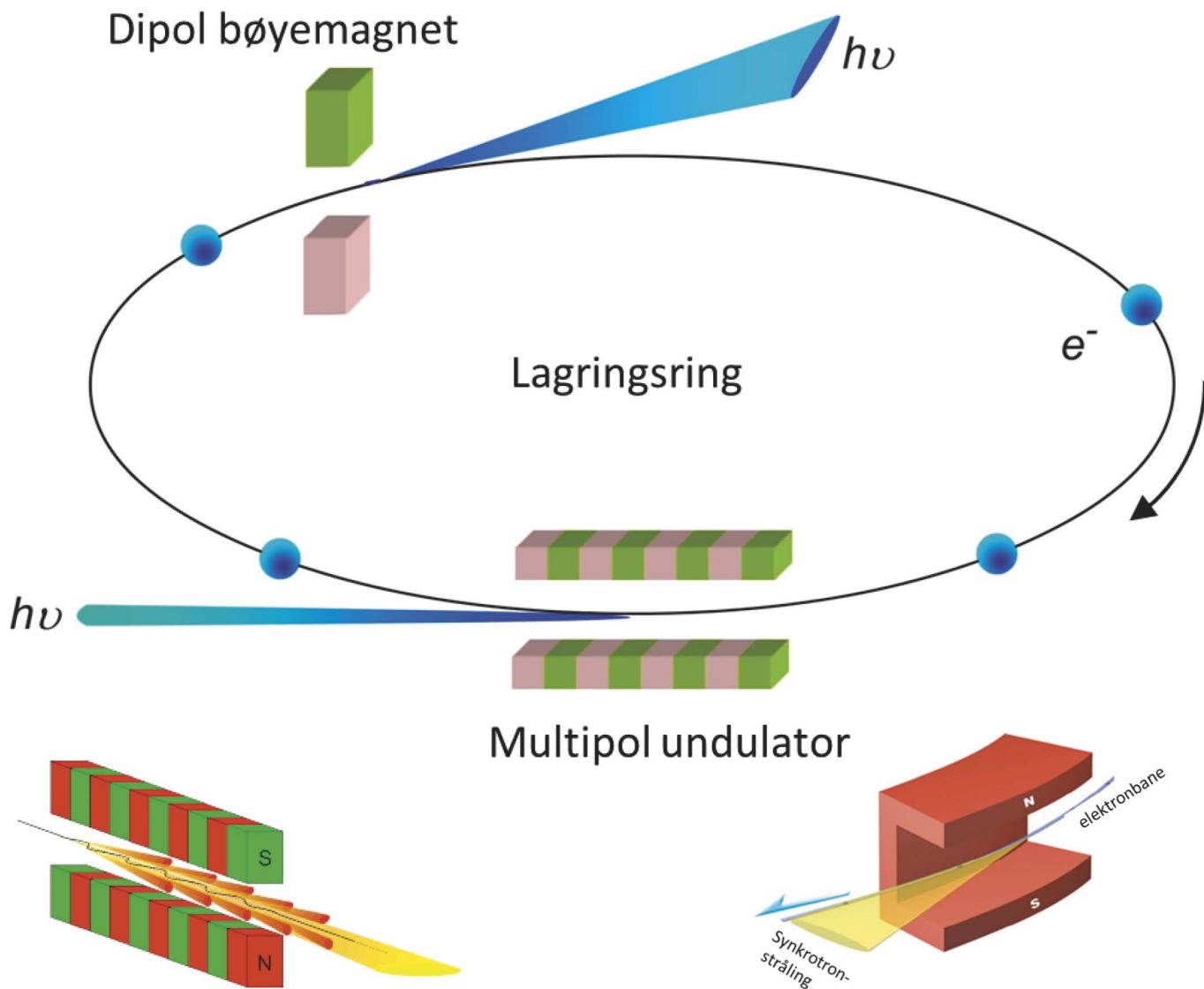
Som eksempel på resultatet av ESRF-forskningen nevner vi at to nobelpriser er gitt for arbeider hvor ESRF-målinger har inngått i datagrunnlaget. A. Yonath og V. Ramakrishnan delte kjemiprisen i 2009 for studier av struktur og funksjon til ribosomet, som er cellenes "proteinfabrikk". I 2012 delte B. Koblika og R. Lefkowitz kjemiprisen for arbeid med studier av proteinkoblede reseptorer som er aktive i styringen av transport gjennom cellemembraner. Selv om nobelprisene har gått til studier innen biomolekylær vitenskap, er bruken av synkrotronbaserte eksperimentelle metoder fremtredende innen andre disipliner. I fysikk og materiavitenskap brukes synkrotronmetoder til studier av strukturer i kondenserte medier og hvordan disse responderer dynamisk og statisk til eksterne felt, som f.eks. temperatur, kjemiske grader, elektromagnetiske eller mekaniske felt. Studiene tar opp forhold som foreligger på lengdeskalaer fra det atomære til det mikroskopiske, og fenomener som forplanter seg på tidsskalaer fra 10^{-12} s til minutter og timer. Data fra ESRF gir grunnlag for én artikkel i ledende tidsskrifter som *Science* eller *Nature* om lag annenhver uke. For flere detaljer om forskningen ved ESRF viser vi til referanse (1).

Utviklingen av synkrotronstrålekilder

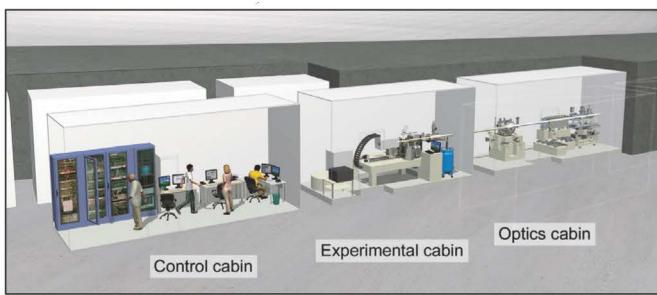
Utviklingen av synkrotronstrålekilder blir gjerne delt inn i tre generasjoner. Generasjonskillene består i at man ved første generasjon betegner anlegg som ble bygget i perioden fra midten av 50-tallet frem til midten på 70-tallet, og ble operert primært som partikkelakseleratorer, men hvor det

også ble lagt til rette for å kunne bruke det elektromagnetiske spekteret akseleratoren produserte som en eksperimentell strålingskilde. Når partiklene når sin endelige operasjonsenergi, kan de styres til omløp i en såkalt lagringsring. Under omløpet akselereres partiklene bl.a. langs sirkelbuer, og emitterer dermed stråling. For første generasjon synkrotroner var strålingen et biprodukt ved anlegg hvor partikkelstrålen var hovedformålet, og således var ofte betingelsene for strålestabilitet ikke optimale. Andregenerasjonsanlegg ble bygget i perioden fra siste halvdel av 70-tallet frem til 1990, og viser til synkrotroner hvor lagringsringen var dedikert til produksjon av stråling.

Selvے lagringsringen består av et høyvakuumkammer som måler noen få cm² i tverrsnitt. I dette kammeret skytes det inn skurer av elektroner eller positroner som på forhånd har blitt akselerert opp til relativistiske hastigheter. Elektronskurene styres til omløp inne i lagringsringen ved hjelp av kraftige magneter, og tilføres energi en eller flere ganger per omløp ved hjelp av radiofrekvenskaviteter for å kompensere for den energien som går tapt i form av stråling. I realiteten er lagringsringen sammensatt av bøyde og rette seksjoner, og en annen karakteristikk ved andre generasjons synkrotronanlegg er at de ble utformet for strålingsproduksjon i de bøyde seksjonene. I disse seksjonene endres elektronbanen ved bruk av såkalte bøyemagneter, og som et resultat av avbøyingsakselerasjonen, emitteres det stråling, se figur 2. Det er essensielt for produksjon av synkrotronstråling at partikkelbevegelsen er relativistisk med hastigheter tett opp mot lyshastigheten. Mens en ikke-relativistisk partikkel vil emmittere isotrop under akselerasjon, vil en relativistisk partikkel emmittere strålingen i en konus om bevegelsesretningen. Åpningsvinkelen på denne konusen er omvendt proporsjonal med lorentzfaktoren $\gamma = (1 - v_e^2 c^{-2})^{-1/2}$, hvor v_e er elektronhastigheten i lagringsringen og c er lyshastigheten. En høy lorentzfaktor gjør dermed at store deler av den emitterte strålingen kan benyttes til forsøk i laboratorier, eller såkalte strålelinjer, som bygges ut langs tangenter til partikkelbanen (se figur 3). En annen konsekvens av at elektronbevegelsene er relativistiske, er at strålingen emitteres over en stor kontinuerlig båndbredde. Dette gjør det mulig å velge ut den fotonenergien som passer best for hvert eksperiment, uten å måtte gjøre for store kompromisser med hensyn på strålingsintensiteten. Disse to faktorene står i skarp kontrast til røntgenstråler produsert med konvensjonelle røntgenkilder, som



Figur 2. Øverst: Skjematisk skisse av lagringsring med en bøyemagnet og en undulatorkilde. Nederst: Illustrasjon av strålingsemisjonen fra svingperiodene i undulatoren til venstre, og fra en bøyemagnet til høyre. Se tekst for nærmere forklaring.



Figur 3. Skjematisk fremstilling av en typisk strålelinje. Mer forklaring i hovedteksten.

røntgenrør eller mikrofokuskilder. Her vil strålingen ha betydelig større divergens, og være sammensatt av et relativt svakt kontinuerlig spekter og skarpe intense maksima i diskrete energier som korresponderer til karakteristisk emisjon fra anodematerialet.

Parallelt med overgangen til andregenerasjons synkrotroner begynte man å forske på om synkrotronkildene kunne gjøres enda bedre ved å introdusere andre magnetiske strukturer, såkalte undulatorer, for strålingsproduksjon i de rette seksjonene av lagringsringen. En undulator består av en tettpakket rekke av permanente magnetiske dipoler med alternerende polaritet. Om dipolene orienteres langs den vertikale aksen i den rette seksjonen, vil den resulterende lorentzkraften få elektronene til å oscillere sinusoidalt i horisontalplanet, og under oscillasjonen emitteres igjen stråling, se figur 2. Siden det er mulig å foreta mange periodiske avbøyninger langs det rette segmentet, vil slike magnetiske strukturer gi langt sterkere kilder enn i bøyemagnetene. I utgangspunktet kan undulatorene justeres slik at de opererer på elek-

tronene på to måter. Ved store amplitudeutsving vil svingeperiodene hver for seg operere som inkoherente strålingskilder, som gir en total kildeforsterking med en faktor $2N$ i forhold til bøyemagneter, hvor N er antall perioder i undulatoren. Når undulatoren opereres slik, kalles den en wiggler. Dersom amplitudeutsvinget holdes tilstrekkelig lite, vil svingeperiodene operere som koherente kilder og dermed interferere. I dette tilfellet vil spekteret derfor bestå av relativt skarpe karakteristiske harmoniske komponenter, og kildestyrken økes med en faktor proporsjonalt med N^2 i forhold til bøyemagneter, hvor N nå er antall koherente perioder i undulatoren. Ved å variere avstanden mellom de magnetiske dipolene, kan man variere energien på de harmoniske komponentene i undulatorstrålingen. På enkelte andregenerasjonsanlegg ble det derfor også etterhvert bygd strålelinjer ut fra de rette seksjonene, og disse ble fort veldig attraktive blant brukerne.

ESRF og nyere synkrotronanlegg

Tredjegenerasjons synkrotroner viser til anlegg hvor den magnetiske strukturen i lagringsringen er optimert for strålingsproduksjon i de rette seksjonene. ESRF var det første anlegget av dette slaget. Ved ESRF er operasjonsenergien for elektronene i lagringsringen 6 GeV, som gir en Lorentz faktor på 11840, eller en omløpshastighet på 0.9999998 av lysfarten i vakuum, c . Synkrotroner som er bygget etter ESRF er alle basert på tredjegenerasjonsprinsipper, og ved flere av disse anleggene er det ikke lenger vanlig å bruke strålingen fra bøyemagnetene.

Ved ESRF valgte man i sin tid å legge ut bøyemagnetene som mulige kilder for eksterne partnere, såkalte *Collaborating Research Groups* (CRG). Den Sveitsisk-Norske strålelinja ved ESRF er en slik CRG-linje hvor enkelte institusjoner og forskningsråd fra Sveits og Norge har samfinansiert oppbygging og drift av en bøyemagnetlinje. CRG-gruppene styrer selv disse laboratoriene og disponerer 2/3 av stråletida, mens ESRF disponerer den gjenværende tredjedelen til sitt brukerprogram.

ESRF har nå vært i drift i over 20 år, som er lenge for slike anlegg. Siden er det kommet til en rekke nye anlegg. I Europa har man nå tredjegenerasjonsanlegg med operasjonsenergi 2,5–3,5 GeV i Storbritannia, Sveits, Tyskland, Frankrike og Spania, og i Tyskland har det nylig blitt bygget en nasjonal 6 GeV ring.⁽²⁾ I juni 2016 vil også Norden få sin egen regionale tredje-

generasjons synkrotron i det MaX IV, ved Lund i Sverige, blir operativ.⁽⁴⁾ Alle de nye anleggene er åpne også for internasjonale forskergrupper.

I tillegg har man begynt arbeider med å bygge såkalte fri-elektronlasere (FEL) for produksjon av røntgenstråling både ved PSI i Sveits (Swiss-FEL) og ved Hasylab i Hamburg (XFEL).^(2,3) En fri-elektronlaser kan noe forenklet betraktes som en lineærakselerator som munner ut i en serie lange undulatorer. Slike anlegg vil kunne produsere meget intense røntgenstråler med en veldig høy grad av koherens, og med redusert utstrekning på elektronpakkene som gir strålingspulser i femtosekundområdet (10^{-15} s). Siden FEL er lineære akseleratorer som ikke kan lagre høyenergipartiklene, vil strålingsproduksjonen bli veldig kostbar, og antall strålingslaboratorier sterkt begrenset sammenlignet med synkrotronanlegg.

Oppgradering

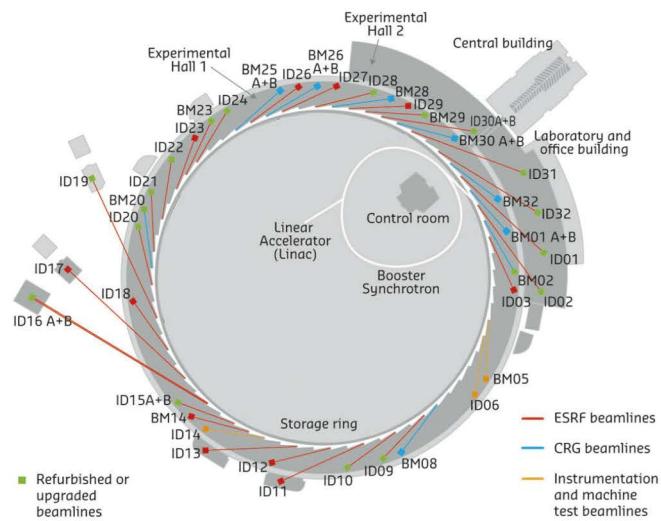
Laboratorier og lagringsring

ESRF har opparbeidet seg en ledende rolle på synkrotronfeltet både med hensyn til kvalitet og kvantitet, og for å kunne opprettholde denne statussen vedtok medlemslandene i 2008 å finansiere et storstilt oppgraderingsprogram. Programmet er delt opp i to trinn, og det første trinnet som har pågått i perioden 2009–2015, har inneholdt en omfattende bygging av nye strålelinjelaboratorier og tilknyttede servicelaboratorier. Totalt har 19 av de 30 undulatorstrålelinjene ESRF opererer gjennomgått en total ombygging. Denne omfatter nye ~ 8000 m² med laboratorier som tilfredsstiller kravspesifikasjoner til temperatur- og mekanisk stabilitet for å kunne operere strålelinjer med opp til 150–200 m avstand fra kilde til prøve, og med stråletverrsnittstabilitet ned mot 10 nm ved prøveposisjonen, se figur 1 og figur 4.

I trinn 1 har man også utviklet nye konsepter for bruk av røntgenoptikk, anskaffet nye detektorer, oppgraderte kontrollsystemer og styringsprogramvare, m.m. Alt dette bidrar til helt nye forskningsbetingelser som både gir en langt mer effektiv bruk av kildene, og åpner for helt nye muligheter.

Den neste fasen i oppgraderingsprogrammet er tredelt, hvor den første delen gjelder oppgradering av selve strålingskilden, mens den andre og tredje delen vil omfatte bygging av fire nye strålelinjer, utvikling av ny vitenskapelig instrumentering, spesielt detektorer, og utbedret lagring og behandling

av data. Konseptuell utforming og tekniske spesifikasjoner for den nye kilden er allerede ferdigstilt, og en er man i gang med bestilling av nye magneter og andre komponenter som trengs til arbeidet. Konstruksjon og installering vil foregå fra oktober 2018 til juni 2020, og i dette tidsrommet vil anlegget være ute av drift.



Figur 4. Oversikt over ESRF-strålelinjer og tilhørende faciliteter. Undulatorlinjer er betegnet med forstavelsen ID (*insertion device*), mens bøyemagnetlinjer har forstavelsen BM. Linjene angitt med en grønn prikk i endepunktet er blitt oppgradert i trinn 1. Eksperimenthall 2, og laboratore- og kontorlokalene opp til venstre i bildet, er også oppført under trinn 1. Inne i selve lagringsringen vises øvrige deler av akseleratorsystemet – en lineær akselerator (LINAC), og en liten synkrotronring der elektronene akselereres opp til 6 GeV (Booster).

Strålekvalitet

I partikkelseleratorer brukes størrelsen *emittans* for å beskrive partikkelenstrålen, og dermed også kilden for synkrotronstrålingen. Emittansen er et mål for partikkelenstrålens spredning i posisjon og hastighet, og for fotonstrålingen lar dette seg konvertere til transversal kildestørrelse og divergens. Emittansen gir et mål på selve kilden som ikke kan endres med nedstrøms optikk. I synkrotronterminologien vil en lav emittans bety at den emitterte strålingen kan samles i et lite tverrsnitt med høy intensitet, f.eks. i prøveposisjonen. En lav emittans vil også gi en høyere grad av transversal koherens, som er et mål for andelen av røntgenstrålingen som er i fase i det den treffer prøven. Helt siden midten av 90-tallet er det blant ekspertisen i akseleratorfysikk ved synkrotronanlegg blitt diskutert ulike prinsipper for å kunne redusere emittansen.

Spesielt gjelder dette den horisontale emittansen. Vertikalt er man allerede nær det absolutte minimum gitt ved diffraksjonsgrensa, mens det horisontalt fortsatt er 3–4 størrelsesordener å gå på. For synkrotronstråling kan man grovt sett si at diffraksjonsgrensa er nådd idet emittansen til partikkelenstrålen er $\leq \lambda/2\pi$, hvor λ er bølgelengden til røntgenstrålen. Det har vært lansert en rekke ulike forslag til design av den såkalte ultimate, Diffraksjonsbegrensede lagringsringer, men forslogene har alle vært så kostbare og omfattende, enten i konstruksjon eller drift, at konseptene har forblitt på forslagsstadiet. Etter hvert kom man til konklusjonen at nye lavemittans røntgenkilder ville begrense seg til neste generasjons lineære akseleratorer, dvs. såkalte fri-elektronrøntgenlasere.

Imidlertid skulle våre skandinaviske naboer komme til å endre på dette. I utformingen av den nye synkrotronen i Lund, MaxIV,⁽⁴⁾ foreslo den svenske akseleratorfysikeren Mats Eriksson en ny kostnadseffektiv planløsning til en lavemittansring. Det vesentligste bidraget til høy horisontal emittans ved dagens synkrotronanlegg kommer fra bøyemagnetene, som sprer ut partikkelenstrålen i horisontalplanet under avbøyingen. Ved å bytte ut dagens bøyemagnetstrukturer, såkalte dobbelbøyde akromater, med flere mindre bøyelementer i såkalte multipelbøyde akromater, kan den horisontale emittansen reduseres. Det er mange komplikasjoner rundt slike endringer. En bøyekromat inneholder ikke bare bøyemagnetene, men også andre sterke multipolmagneter for å styre og samle partikkelenstrålen. I en ny design må alle disse elementene endres og optimeres uten å endre utformingen av selve lagringsringen, og uten at det gir negative konsekvenser andre steder langs ringen, eller nedstrøms i strålelinjelaboratoriene. MaxIV har imidlertid klart å finne gode løsninger på de tekniske utfordringene som oppstod i forbindelse med operasjon av en helt ny type lagringsring. Med en del tilpasninger kan MaxIVs planløsning også benyttes ved allerede eksisterende anlegg, uten at ombyggingskostnadene blir for høye, og flere synkrotronanlegg har nå igangsatt prosesser lignende den som pågår ved ESRF for å bygge om lagringsringen til en lavemittanskilde.

Ved ESRF har man som målsetning å redusere den horisontale emittansen med en faktor 30–50, samtidig som man fortsetter å operere CRG-linjer i de bøyde seksjonene. Dette krever en videreutviklet løsning i forhold til den ved MaxIV, siden multibøyemagnetakromatene ikke er særlig egnet

som strålekilder. Det vil også etter hvert bli installert nye undulatorer som er optimert i forhold til den reduserte horisontale emittansen. Totalt vil oppgraderingen gi en økning av fluks i prøveposisjon med en faktor 100, og en økning av den koherente fluksen med en faktor 1000. Siden emittansreduksjonen gir mindre kildestørrelse, vil også røntgenoptikken nedover langs strålelinja bli mer effektiv, noe som vil gi ytterligere gevinst der det opereres med mikro- og nanofokuserte stråler.

Kildeoppgraderingen ved ESRF vil være med på å sikre at ESRF fortsatt kan ha en fremtredende rolle som synkrotronanlegg inn i det neste tiåret. Økningen i fluks vil gi mange nye muligheter, spesielt innenfor tidsoppløste studier, og for studier basert på mikro- eller nanofokuserte stråler. Øknin-

gen av den koherente fluksen vil gi helt nye muligheter innen tidsoppløst røntgenavbildning, tidskorrelasjonsstudier og avbildningsteknikker basert på koherent røntgenspredning.

Referanser

1. ESRFs hjemmeside: <http://www.esrf.eu/>
2. Synkrotron- og FEL-kilder: <http://www.lightsources.org/regions>
3. Emil J. Samuelsen og Dag W. Breiby: *Røntgenlaser*. Fra Fysikkens Verden, 71, Nr. 2, 42-47 (2009)
4. MaXIVs hjemmeside: <https://www.maxlab.lu.se/maxiv>

∞

Fysikk fra medisinsk diagnostikk til samfunnssikkerhet

*Thormod Henriksen og Einar Sagstuen **

De fleste av oss vil før eller senere stifte bekjentskap med moderne diagnostikkmetoder som CT, MR og PET, og kanskje undres noe når vi passerer ulike typer sikkerhetskontroller på en flyplass eller tollstasjon. Grunnlaget for alle disse verdifulle teknikkene er god fysikk. Vi skal i denne og noen følgende artikler i FFV, beskrive fysikken i disse metodene og gi noen eksempler som viser hvor mye vi i dag kan se av skjulte ting i og på kroppen, og innenfor tette veggger.

Røntgenbilder

Samme dag som W.C. Røntgen gjorde sine historiske forsøk i Würzburg (8. november 1895)⁽¹⁾ ble det klart at en kunne bruke det som vi nå kaller

røntgenstråling til å få informasjon om ting ”inne i kroppen”. Et røntgenrør og en film var i prinsippet alt en trengte. Opplosningen var ikke noe særlig å skryte av, men en kunne lett se beinbrudd og fremmedlegemer.

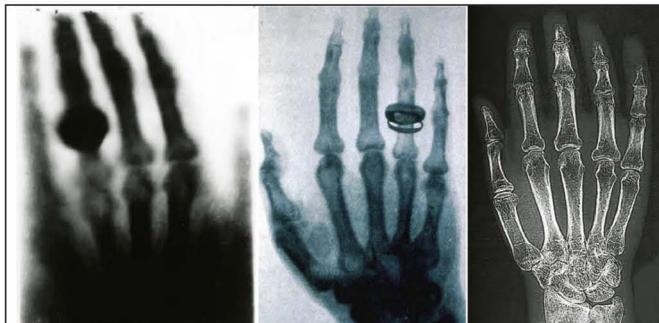
I 1901 fikk Wilhelm Conrad Røntgen den aller første Nobelprisen i fysikk.

Hva er et røntgenbilde?

Den elektromagnetiske strålingen fra røntgenrør er et sammensatt spektrum av fotoner med energier opp til et vel definert maksimum. Røntgenstråling dannes når elektroner, som er akselerert i et spenningsgap, treffer en antikatode (anode) av et tungmetall, for eksempel wolfram.^(2,3) Elektronene bremses i metallet, og energien går over i varme og litt elektromagnetisk stråling på grunn av coulombavbøyning av elektronene. Dette kalles av og til for ”bremsestråling”. Den maksimale energi fotonene kan oppnå er bestemt av spenningsforskjellen mel-

* Fysisk institutt, Universitetet i Oslo.

lom elektrodene. For diagnostikk er maksimum i området fra ca. 20 kV og opp til omrent 120 kV. Den ”bløteste” strålingen (den med lavest energi) brukes til mammografi, mens når en tar lungebilder på store personer brukes stråling med relativt høy energi. Røntgenstrålingen absorberes delvis i kroppen, mens en del går tvers gjennom. Det er den delen som går gjennom kroppen som bidrar til å lage et bilde på en film. Det tradisjonelle røntgenbildet er således et skyggebilde der skyggene lages av de deler i kroppen som absorberer strålingsenergien. Jo mer energiabsorbsjon, jo tettere skygger. Ifølge teoriene for absorpsjonsprosessene er kontrastene bestemt av elektrontettheten i stoffet. I figur 1 ser vi tre røntgenbilder som samtidig viser litt av utviklingen. Det var Albert von Kölliker som foreslo at en skulle kalle strålingen for ”Røntgen-strahlen”, mens Røntgen selv kalte den for ”X-strahlen”.



Figur 1. Røntgenbilder av hender. Til venstre det aller første røntgenbildet tatt 22. des. 1895, av hånden til fru Røntgen. Bildet i midten er tatt av hånden til von Köllinger 23. jan. 1896 og viser en klart forbedret oppløsning. Det siste er et moderne røntgenbilde der en bruker et digitalt filter for å redusere støy så en kan se flere detaljer.

Samtidig med Røntgen var det også andre forskere som syslet med katodestråler. Vi nevner spesielt supergeniet Nicola Tesla som faktisk laget røntgenbilder på samme tid som Røntgen. Tesla er ikke bare kjent for magnetfeltenheten ”tesla” (T) og bilen med samme navn, men han var en sjeldent begavelse.⁽⁴⁾ Tesla kalte sine bilder for ”shadow-graphs”, og mest kjent er hans bilde av en støvel med en fot inni, som er vist i figur 2.

Absorpsjon av røntgenstråler

Røntgenstråler absorberes i materie, og strålingsintensiteten, I , avtar med dybden, x , inn i materialelet etter en eksponentialfunksjon:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

der μ er en absorpsjonskoeffisient som karakteriseres av ulike absorpsjonsprosesser. For vanlig røntgenstråling er det i hovedsak to prosesser som bidrar til μ , fotoelektrisk effekt og compton-spredning. I begge disse prosessene vekselvirker røntgenfotonene med elektroner i det absorberende materialet.



Figur 2. Teslas berømte ”shadowgraf” tatt i 1896 av en støvel med en fot inni. Bildet er hentet fra ref. (4).

Den fotoelektriske effekten er viktigst for røntgenstråling med energi opp til ca. 100 keV. Sannsynligheten for fotoelektrisk effekt varierer med fotonenergien som E^{-3} , men – og det er viktig – den varierer også med stoffets atomnummer, Z , som Z^4 (Z angir antall elektroner rundt atomkjernen). For et røntgenbilde i dette energiområdet er elektrontettheten i mediet det viktigste for energiabsorpsjonen, fordi Z -avhengigheten går i 4. potens. Eksempelvis har beinvev et midlere, effektivt atomnummer på ca. 13,8, mens vev og vann har atomnummer ca. 7,4 og luft har ca. 7,7. Silikon har atomnummer på ca. 10,4. En del av røntgenstrålene absorberes, og det slipper mindre stråling gjennom, som i sin tur kan sverte en film eller bli absorbert av andre typer detektorer. Vi får store forskjeller i absorpsjon mellom vev og bein på grunn av den store forskjellen i det effektive atomnummer.

Har vi energier under ca. 30 keV, vil det bare være fotoelektrisk effekt som bidrar til røntgenbildet, og da kan en også se små forskjeller i elektrontetthet som det er mellom normalt og sykt vev i et bryst. Et eksempel er vist i

figur 3. Vi forstår også umiddelbart den utfordringen som silikonimplantater utgjør for mammografi. En forsøker å omgå dette ved hjelp av andre teknologier i tillegg til røntgen, men det er absolutt noe å tenke over.



Figur 3. Det er liten forskjell i elektrontetthet i friskt og sykt vev. Men ved å bruke bløt røntgenstråling (< 30 kV) er det mulig å se ørsmå forskjeller i elektrontetthet slik som i dette mammogrammet.

Det er mulig å øke elektrontettheten ved hjelp av kontraststoffer, det vil i denne sammenheng si stoffer med stor elektrontetthet. Da kan en få frem tydeligere forskjeller i elektrontetthet, og ved selektiv lokalisering av slike stoffer kan en få mer og sikrere informasjon. Kontraststoffer er slike med høyt atomnummer: jod (atomnummer 53), barium (atomnummer 56) og thorium (atomnummer 90) er brukt. De kom i bruk allerede i perioden 1906–1912.

I 1929 gjorde den 25 år gamle Werner Forssmann et meget dristig eksperiment på seg selv. Han førte et kateter gjennom en blodåre i armen inn i hjertet. Han introduserte dermed en ny metode for å studere hjertet, og kunne studere detaljer med

røntgendiagnostikk og kontraststoffer. Han fikk Nobelprisen i medisin i 1956.

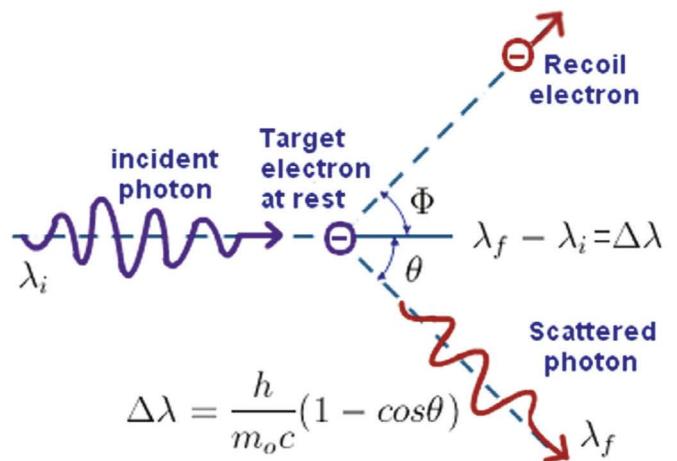
En annen metode til å forbedre røntgenbilder på var i sin tid å bruke et fluoriserende stoff som dekket filmen. Røntgenstrålene ble absorbert i dette materialet og ga lys som i sin tur svertet filmen. I dag er den filmbaserte røntgendiagnostikken i stor utstrekning blitt erstattet med digital detektor-teknologi.

I mange år opp mot 1950-tallet, ble røntgenstråling brukt til å studere pasienter med lunge-tuberkulose. Men en skulle helst være trenet spesialist for å kunne trekke informasjon ut av disse bildene, de simpelthen ”ropte” etter nye metoder. Disse framskrittene kom via det som kalles ”plani-grafi” og til ”computed tomography”, CT, som vi skal diskutere i en senere artikkel.

Comptonspredning

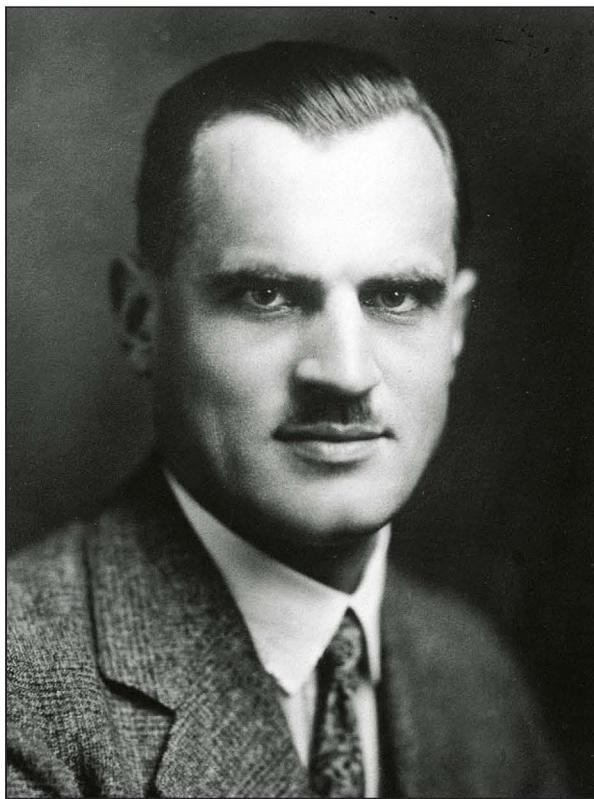
Den andre absorpsjonsprosessen vi nevnte er comptonspredning.⁽⁵⁾ Dette er en absorpsjonsprosess som er viktig for fotoner med energi fra 60 keV og opp til området rundt 10 MeV, der den tredje fundamentalprosessen (pardannelsen, som vi ikke skal omtale her) overtar.

Hva er så comptonspredning? Dette er vist forenklet i figur 4. Navnet ”comptonspredning” kommer fra Arthur H. Compton som i 1927 fikk Nobelprisen i fysikk for beskrivelsen av denne prosessen.⁽⁵⁾



Figur 4. Comptonspredning vist skjematiske. Et innsendt foton treffer et fritt eller løst bundet elektron som ”sparkes” ut med en kinetisk energi som det raskt taper til mediet omkring. Prosessen gir også et nytt foton med lavere energi som spres i retning θ i forhold til det innkomne fotonet.

Arthur Compton (figur 5) hørte til en begavet familie der hans bror, Karl, var president for MIT. Under krigen arbeidet Compton sammen med Fermi, Szilard og Wigner med den første atomreaktoren som i sin tur førte til de store reaktorene i Hanford der de produserte plutonium. Men nobelprisen fikk han altså for de arbeidene han gjorde med comptonspredning i 1922.



Figur 5. Arthur Holly Compton (1892–1962) hørte til en begavet familie der hans bror Karl var president for MIT. Arthur Compton fikk Nobelpriisen i fysikk for de arbeidene han gjorde med comptonspredning i 1922.⁽⁵⁾.

En interessant sidebemerkning er at Comptons arbeide så tidlig som i 1922 i tillegg ga overbevisende holdepunkter for at i slike eksperimenter synes lys å oppføre seg som en strøm av partikler hvis energi er proporsjonal med frekvensen.

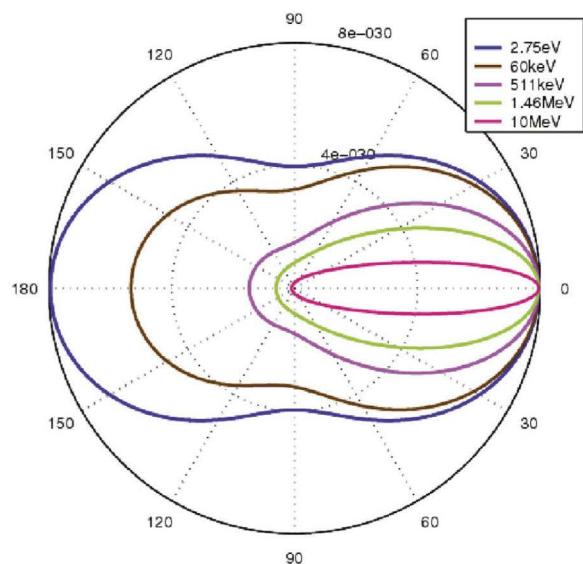
En kan regne litt på comptonspredning ved å anta at røntgenkvantet vekselvirker med et løst bundet elektron. Elektronet med masse m_e løsrives, og et foton med redusert energi går videre i en annen retning med energi E_f . Hvis det antas at en kan se på dette som et elastisk støt, er både energi og bevegelsesmengde intakt. (Energien til et kvant er $h\nu$, og bevegelsesmengden er $h\nu/c$ der c er lysfarten). Endringen i fotonbølgelengden er som angitt på figur 4, og derav følger at energien til det fo-

tonet som blir spredt varierer med spredningsvinkelen etter formelen

$$E_f = \frac{E_i}{1 + \frac{E_i}{mc^2}(1 - \cos \theta)} \quad (2)$$

En spredningsvinkel på 180° betyr at strålingen kommer tilbake. Ved å bruke likning (2), vil fotoner med energi på 50 keV komme tilbake med en energi på 41,8 keV. For fotoner med energi 200 keV har den tilbakespredte strålingen en energi på 112 keV, osv.

Det er adskillig vanskeligere å komme frem til et uttrykk for hvor mye av den spredte strålingen som kommer direkte tilbake (blir spredt 180°). Oskar Klein og Yoshio Nishina utledet et uttrykk for dette i 1928 basert på kvantelektrodynamikk.⁽⁶⁾ Vi skal ikke gjengi dette her, men vi ser i figur 6 diagrammatisk hvordan spredningen varierer med energien til det innsendte fotonet. Det sees klart at for 60 keV røntgenstråling er det betydelig med tilbakespredt stråling. Når energien til det innsendte fotonet øker til 500 keV blir det adskillig mer av den fremoverrettede spredte strålingen, og når energien kommer opp i 10 MeV (som bl.a. brukes i terapi) er det aller meste rettet direkte fremover.



Figur 6. Denne figuren viser et resultat av Klein-Nishina-formelen for comptonstråling. Merk at det er betydelig tilbakespredt stråling.

Tilbakespredt comptonstråling og sikkerhet

Tilbakespredt comptonstråling bryter på mange måter med det vi tidligere assosierer med røntgen-

stråling. Dette kan vi illustrere ved hjelp av noen tegninger som er mer enn 100 år gamle, og med obserasjoner av nyere dato. I figur 7 er vist en tegning som sto i *Life Magazine* i 1896. Tegningen, som var morsom for 100 år siden, er med utnyttelsen av tilbakesprett comptonstråling nå kommet betydelig nærmere virkeligheten.



Figur 7. Tegningen av "mannen med ljåen" gjorde narr av den misoppfatning at en kunne ta røntgenbilder med tilbakesprett røntgenstråling.

Når vi går gjennom sikkerhetskontrollene på de fleste flyplasser må vi gjennom en metalldetektor. Beltespenner, nøkler og mynter må taes ut på forhånd, men metalldetektoren vil se om du fortsatt har noe metall på deg. Det de ikke kan se er om du har kniv, stilett eller andre ting laget av plast/kompositter, eller om du har narkotika eller sprengstoff på deg.

For 15–20 år siden begynte en imidlertid for alvor å utforske mulighetene som kan gis med comptonstråling spredt 180°, altså tilbake mot røntgenapparatet. En kan bruke røntgenpulser med energi på ca. 50 keV og en strålebunt med størrelse på ca. 25 mm² som sveiper over et objekt (en person) og så detektere tilbakesprett stråling. Teknologien er basert både på Z- og energiavhengigheten til comptonspredningsprosessen, og det benyttes flere ulike tilnærningsmetoder for å få tilstrekkelig kontrast i bildet. Digitale bildebehandlingsteknikker er vesentlige i dette, og det lages i dag bilder som kan gi betydelig informasjon.

Den første helkroppskanneren kom i 1992 og ble videreført til kommersiell bruk. I 2003 stilte lederen for forskningen i TSA (*Transportation Security Administration*, USA) opp frivillig til å gå gjennom en skanner, og vi fikk bildet i figur 8 som har gått verden over. En kan tydelig se om det skjules gjenstander på kroppen, som plastkniver, narkotika og andre gjenstander som ikke kan observeres med metalldetektorer.



Figur 8. Dette bildet fra 2003 av Susan Hallowell i TSA, viser hva som er mulig å se med tilbakesprett røntgenstråling. I dag kan en få bedre bilder. Det har ført til at instrumentene nå "sladder" kroppen som en hvit tegning. Men de virkelige bildene kan lagres og sees på i tilfelle terrorhandlinger.

Forskjellen på et røntgenbilde og et tilbakesprett comptonbilde

Når røntgenfotoner sendes inn i kroppen blir de absorbert etter eksponentialformelen, likning (1), der den fotoelektriske absorpsjonen er viktigst for fotoner opp til 100 keV. Også de fleste fotoner

som absorberes via comptonprosessen blir borte fra strålebunten, det blir dannet fotoner med redusert energi som spres i andre retninger. Noen av disse fotonene kan også gå tilbake mot røntgenkilden.

Et vanlig røntgenbilde er dannet av de fotoner som ikke absorberes, og vi får et skyggebilde av elektronettettheten i stoffet. Både fotoelektrisk effekt og comptonprosessen bidrar til dette bildet. Et tilbakesprett røntgenbilde dannes fra den strålingen som kommer tilbake. Her er det bare comptonfotoner som bidrar, og alle de fotonene som absorberes ved fotoelektrisk effekt har ingen betydning.

Comptonfotonene, som i sin tur danner det tilbakesprettede bildet, dannes der comptonprosessen finner sted. Slike comptonfotoner dannes følgelig gjennom hele kroppen på den som blir bestrålt. Men fotoner som dannes på overflaten der primærstrålen treffer, vil lettere komme tilbake enn fotoner som kommer fra et sted inne i kroppen. Fotoner som dannes inne i kroppen har store muligheter for å bli absorbert før de kommer tilbake til detektoren. Derfor vil bildene som dannes, best gjengi elektronettettheten på overflaten av kroppen.

Utvikling

Flyplass-scannere ble installert på en rekke steder i USA i perioden 2006 til 2011, og nå finner vi slike instrumenter på de fleste store flyplasser i verden. Teknikken er videreutviklet, og skannerne er blitt fabelaktig gode. De kan nærmest ”kle av” folk slik at TSA (*Transportation Security Administration*) i USA satte restriksjoner på slike scannere ved flyplassene i 2013. En fikk bruke dem, men måtte erstatte bildet av den aktuelle personen med et hvitt eller grått bilde av selve kroppen. Fortsatt kan en se de gjenstandene som er på overflaten. I figur 9 er vist et bilde av en scanner.

Store gjenstander

Compton backscatterskannere er også utviklet for å se eller studere større gjenstander, som for eksempel lastebiler, personbiler eller mindre båter. Da brukes gjerne vesentlig høyere energi på røntgenstrålingen, 250–450 keV. Vi ser av figur 6 at når energien går opp blir mer av strålingen spredt fremover. Det arbeides med forskjellige teknologier og modeller, og det er forbausende hvor mye informasjon en kan få – til og med om landminer. Et eksempel på slike anvendelser er vist i figur 10. Menneskesmugling er

et høyaktuelt tema. Andre tilsvarende eksempler er avsløring av narkotika- og våpensmugling.



Figur 9. Bruk av to comptonskannere kan vise bilder av begge sider av kroppen samtidig.



Figur 10. Bildet viser et eksempel på bruk av Comptontilbakespredningsteknologi i forbindelse med menneskesmugling.

Konklusjon

Et vanlig røntgenbilde er basert på den strålingen som går direkte gjennom kroppen. Det viser et skyggebilde der skyggen dannes av elektronettettheten i kroppen.

Et tilbakespredningsbilde er basert på tilbakesprett Comptonstråling. Dette gjengir også på tilsvarende måte elektronettettheten. Når inngangsenergien er lav, vil de ytre gjenstander avtegnes, men en kan få frem omtrent samme informasjon ved å øke energien på innsendt stråling.

Dose per helkropsavbildning har vært diskutert og målt. Myndighetene har satt grenseverdier for den maksimale dosen som kan absorberes per undersøkelse, og eksperimentelle målinger og numeriske simuleringer har vist at den er svært liten ($< 0,1 \mu\text{Sv}$) og godt under den satte grenseverdien. Sammenliknet med den normale bakgrunnsstrålingen (2–3 mSv) vil ikke en begrenset bruk av slike skannere representere noen helseskade. En flypassasjer vil få en høyere tilleggsdose fra øk-

ningen i kosmisk bakgrunnsstråling under flyturen, enn personen får ved å passere gjennom en skanner på flyplassen.

Referanser

1. W.K. Röntgen: *Über Eine Neue Art von Strahlen*. Sitzungsberichten der Würzburger Physikal.-medic. Gesellschaft, (1895 (-96))
2. T. Henriksen: *Radiation and Health*. Fritt tilgjengelig på <http://www.mn.uio.no/fysikk/tjenester/kunnskap/straling/radiation-and-health-2015.pdf> (2015)
3. E.K. Henriksen: *Fra Crookes rør til computertomograf –Røntgendiagnostikk før og nå*. Fra Fysikkens Verden, 57, 99-104 (1995)

4. M. Cheney og R. Utah: *Tesla, Master of Lightening*. Barnes and Noble, New York. ISBN-13: 978-0-7607-1005-0. (1999)
5. A.H. Compton: *A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements*. Phys. Rev. 21, 483 (1923)
6. O. Klein og Y. Nishina: *Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac*. Z. Phys. 52, 853 og 869 (1929)

∞

Rolf Widerøe: ”Ringenes herre”

Jan Folkvard Evensen *

Rolf Widerøe var ingeniøren som fant opp prinsippet for betatronen og proton-synkrotronen. Han var den første som fikk en lineærakselerator til å fungere, basert på konseptet til den svenske fysiker G.A. Ising. Moderne strålebehandling kunne ikke la seg gjøre uten Widerøes ideer. Drevet av sin vitenskapelige ærgjerrighet innledet han samarbeid med Luftwaffe under krigen. Det kostet han anseelse i hjemlandet og drev han i landflyktighet. Etter krigen flyttet han til Sveits og arbeidet for Brown Boveri & Cie med å konstruere akseleratorer for materialtesting, kreftbehandling og grunnforskning i fysikk. Han tok ut over 200 patenter, fikk flere æresdoktorater og en rekke internasjonale priser. Widerøe gjenvant til en viss grad sin anseelse i Norge midt på 1990-tallet, ikke minst takket være professor Tor Brustad ved Radiumhospitalet.



Figur 1. Rolf Widerøe (1902–1996)

* Kreftklinikken, Oslo universitetssykehus, Radiumhospitalet.

Innledning

Rolf Widerøe (figur 1) ble født i Oslo 11. juli 1902. Han vokste opp i en søskjenflokk på 6, 3 jenter og 3 gutter. Hans to brødre, Viggo (f. 1904) og Arild (f. 1908), var flyentusiaster og startet Widerøes Flyveselskap i 1934. Arild omkom i en flyulykke over Bunnefjorden 1. august 1937. Under andre verdenskrig var Viggo medlem av Torsvik-gruppen i Ålesund. Torsvik-gruppen hjalp til med å få norske og britiske soldater over til Storbritannia. Aktiviteten ble oppdaget av Gestapo, og gruppen gikk i opplosning. Fem medlemmer ble henrettet og tre ble dømt til tukthusstraff i Tyskland, blant dem var Viggo Widerøe. Han ble sittende fire år i tukthusfangenskap i Tyskland.

Allerede som gymnasiast på Halling skole i Oslo, var Rolf Widerøe opptatt av E. Rutherford eksperimenter som gikk ut på å spalte atomkjerner ved bombardement med ladete partikler fra en radioaktiv kilde. Det var bl.a. med bakgrunn i denne type eksperimenter at Rutherford lanserte en ny atommodell i 1911, med sentralt plassert kjerne og elektroner i baner rundt. For å trenge inn i atomkjernen må man ha høye energier. Det var i denne sammenheng Widerøe ble interessert i høyenergiakseleratorer. Han så også tidlig nytten av disse i kreftbehandling.

Utdannelse og doktorgrad

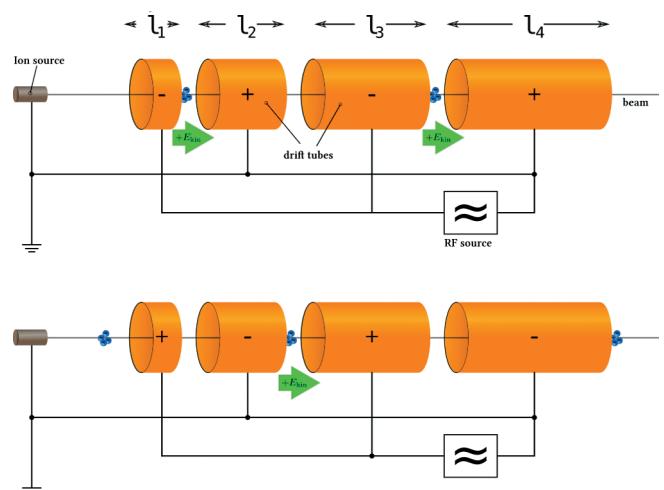
Etter artium i 1920 dro Rolf Widerøe til Karlsruhe i Tyskland og ble immatrikulert ved *Die Technische Hochschule*. Han ville bli diplomingenør. Sterkstrøm var hovedinteressen. Ved siden av studiene lekte han hele tiden med ideen om å lage høyenergetisk stråling. Allerede som 20-åring spurte han seg: Kunne ikke samme prinsipp som gjelder for en vanlig transformator også brukes til å akselerere elektroner? En transformator består av to adskilte spoler (primær- og sekundærspolen) som er viklet rundt en sammenhengende jernring. Ved å variere spenningen i primærspolen genereres en spenning i sekundærspolen. Forholdet mellom spenningene er tilnærmet lik forholdet mellom vindingstallene i de respektive spolene.

Widerøes idé var å erstatte sekundærspolen med en immateriell ledet, i praksis en evakuert torus (lufttom ”smultring”). En skisse av dette laget han så tidlig som i 1923.⁽¹⁾ Det han selv kalte en stråletransformator, etter hvert induksjonsakselerator, fikk senere navnet ”betatron”. Dette fordi den

akselererer elektroner, også kalt β -partikler.

Da Rolf Widerøe var ferdig med diplomoppgaven og eksamen, reiste han tilbake til Oslo i 1924. Etter praksis og avtjent verneplikt, reiste han tilbake til Tyskland. Tanken var å ta en doktorgrad på ideen om induksjonsakseleratoren. I Karlsruhe fikk han avslag. Der mente de ideen hans ikke var realiserbar. I Aachen, hos professor Walter Roogwski, fikk han innpass. Her fikk han også tilgang til de spesiallagede rørene han trengte ved at laboratoriet hadde et godt glassblåserverksted. Han lyktes imidlertid ikke med å få induksjonsakseleratoren til å virke.

Widerøe rettet så oppmerksomheten mot et konsept introdusert av den svenske fysikeren G.A. Ising noen år tidligere. Konseptet var basert på det som ble kalt multippel akselerasjon, gjentatte akselerasjoner etter hverandre. Problemet bestod i å få repeterte akselerasjoner på rett sted til rett tid. Widerøe løste problemet ved å finne opp prinsippet for resonant akselerasjon. Det går i korthet ut på å kople en rekke med rør av ledende materiale til en alternerende spenning (figur 2). En positiv ladning vil da akselereres mot et negativt ladet rør. Feltet inne i en leder er 0. Partikkelen vil derfor bevege seg med konstant hastighet inne i røret. Når partikkelen når enden av røret skifter polariteten til positiv. Partikkelen vil da skyves fra røret og akselereres mot neste rør som da er negativt ladet, osv. Rørenes lengde må avstemmes til vekselspenningens frekvens, derav navnet ”resonant akselerasjon”. Tiden det tar for partikkelen å passere et rør må svare til vekselspenningens halve periode. Når partikkelenes hastighet øker, må rørlengden økes tilsvarende. Høye energier krever derfor lange akseleratorer. Widerøe viste at dette



Figur 2. Skisse av Ising/Widerøes lineærakseleratorkonsept (Wikipedia).

prinsippet hadde noe for seg ved i 1927 å bygge verdens første lineærakselerator med multiakselerasjon av ioner i et elektrisk vekselfelt (figur 3). Kaliuminum ble ført gjennom et driftør som var tilknyttet en vekselspenning på ca. 25 kV, maksimum 1 MHz. De ble derved akselerert to ganger i vekselfellet og oppnådde en energi på 50 keV.

Widerøes doktoravhandling ble todelt. I første del redegjør han for resonant akselerasjon og lineærakseleratoren han fikk til å fungere, og i annen del om prinsippet for induksjonsakseleratoren. Han viste at ideen var holdbar, men nådde ikke målet med den teknologi han hadde tilgjengelig.

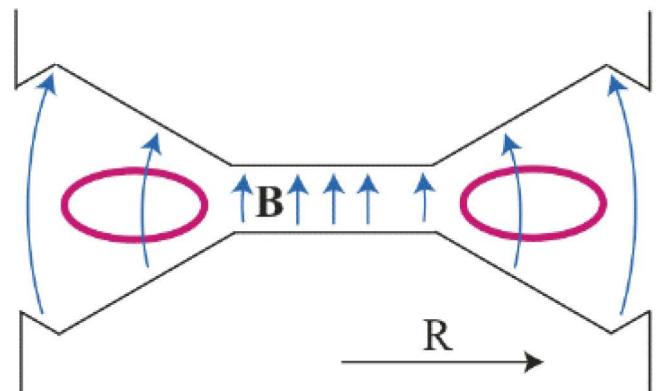


Figur 3. Modell av verdens første lineærakselerator. Modellen er en tro kopi av originalapparatet. Den ble bygget på Radiumhospitalet i 1985 under ledelse av Rolf Widerøe.

Gjennombruddet

Widerøes pionerarbeid var lenge upåaktet. I løpet av 1940 lyktes det imidlertid Donald W. Kerst å akselerere elektroner til en energi av 2,3 MeV på basis av betatronprinsippet som var nedfelt i Widerøes doktoravhandling. Betatronen er simpelthen en transformator hvor en sky av elektroner, inne i en evakuert torus, inntar rollen til sekundærspolen. Primærspolen er et varierende magnetfelt i hullet i "smultringen". I tillegg til å akselerere elektronene trengs et magnetfelt for å holde dem i bane, med konstant radius inne i torusen, etter hvert som elektronenes hastighet øker. Torusen er derfor anbrakt mellom polene på en spesielt utformet magnet som nettopp sørger for dette (figur 4). Forholdet mellom variasjonen av de to magnetfeltene kan uttrykkes matematisk i det som kalles Widerøes betingelse, eller betatronlikningen.

Etter at det hadde lyktes D.W. Kerst å akselerere elektroner på basis av betatronprinsippet



Figur 4. Tversnitt av betatron torus (rosa) anbrakt mellom polene til en for formålet spesielt utformet magnet.

som var nedfelt i Widerøes doktoravhandling, tok Widerøe i 1943 selv fatt på å konstruere en betatron i Hamburg (se nedenfor). Resultatet ble at Europas første fungerende betatron ble bygd, med energi på ca. 15 MeV.

Widerøe var således opphavsmannen til etterkrigstidens to mest betydningsfulle behandlingsapparater. Radiumhospitalet fikk som et av Europas første sykehus en betatron i 1953. Radiumhospitalet har i alt hatt tre betatroner. Den første var en BBC Betatron (31 MV), Den ble faset ut i 1971. Den siste var en BBC Asklepiton 35 (35 MV) som ble tatt i bruk i 1963, og ble faset ut i 1985. Figur 5 viser en torus fra en av Radiumhospitalets betatroner. Lineærakseleratoren har nå erstattet betatronen og er "arbeidshesten" i enhver stråleterapiavdeling. I en slik akselerator "surfer" elektronene på mikrobølger,⁽²⁾ Figur 6 viser "gantry" i en moderne lineærakselerator med et vandrebølgerør hvor elektronene akselereres. Et-



Figur 5. Torus fra en av Radiumhospitalets betatroner.



Figur 6. "Gantry" på en lineærakselerator med vandrebølgerør for akselerasjon av elektroner. Elektronene kan enten tas ut direkte eller bremses i et target for dannelse av røntgenstråling ("bremsstrahlung")

ter å ha blitt avböyd 270° (akromatisk avbøyning) kan elektronstrålen rettes mot en spredningsfolie eller mot et target, avhengig av om man vil bestråle med elektroner eller fotoner (bremsestråling).

Oppholdet i Tyskland 1943–45

Widerøes "ulykke" var oppholdet i Tyskland i perioden 1943 til 1945. Høsten 1943 ble han oppsøkt av en mann ved navn Theodor Hollnack. Med seg hadde han to menn med hver sin doktorgrad i fysikk, SS-offiserer på spesialoppdrag for Luftwaffe. Man hadde fått det for seg at ved å rette Widerøes "strålekanon" mot alliertes fly så kunne man drepe flyveren. De trengte imidlertid Widerøes bistand, og denne takket ja til å bistå.

Dette var jo helt meningsløst, hvilket tidlig ble innsett av sentrale personer som Werner Heisenberg og Walter Gerlach. Sistnevnte var formann i Rådet for Luftwaffes forskningsstasjon og også en av de mest innflytelsesrike i Uranverein, Hitlers uranklubb.⁽³⁾ Begge var blant de 10 internerte på Farm Hall etter krigen.⁽⁴⁾ Widerøe fikk imidlertid fortsette med å konstruere sin betatron.

Hvorfor dro Widerøe til Tyskland i 1943? Han måtte vite at det var uakseptabelt å samarbeide med fienden. Selv begrunnet han det med å ville hjelpe sin bror til å få lettere soningsforhold, i beste fall frigivelse. Andre er av den oppfatning at han kanskje var naiv og mest opptatt av å få realisere sin kongstanke. I Tyskland fikk han i så måte "carte blanche". Til syvende og sist er det vanskelig å vite hva som virkelig drev han.

Landssviksaken

Etter at krigen var slutt ble det levert inn en anonym anmeldelse på Rolf Widerøe.⁽⁵⁾ Det fremgikk der at han hadde funnet opp gyroskopet på V2-rakettene, Tysklands fryktede våpen som bl.a. ble brukt mot London og Antwerpen. På bakgrunn av dette ble det utskrevet en ordre om fengsling. Widerøes pass ble beslaglagt og han ble satt på Illebu landssviksfengsel 24. mai 1945.

For å få klarhet i Widerøes virksomhet i Tyskland ble det nedsatt en sakkyndig komité med fire medlemmer, alle profilerte norske fysikere. Formann i komiteen var professor Egil A. Hyllerås, datidens fremste norske fysiker, som bl.a. samarbeidet med kapasiteter som Max Born og Hans Bethe. De tre andre i komiteen var Roald Tangen, Harald Wergeland og Gunnar Randers.

Komiteen konkluderte med at Widerøe var en middelmådig fysiker som ikke hadde prestert noe særlig av interesse. Konklusjonen på landssviksak 3418/45 var at Widerøe ikke hadde ytet fienden bistand og aldri hadde hatt noe med V2-bombene å gjøre. Han var heller ikke nazist. Han skulle sannsynligvis aldri ha vært arrestert. Han fikk likevel en bot på 5000 kr, og et forelegg på 120 000 kr for sitt samarbeid med tyskerne.⁽⁶⁾

Stemningen i Norge etter krigen gjorde det vanskelig for Widerøe å bli værende her. Han emigrerte til Sveits og fortsatte å arbeide for Brown Boweri & Cie. Under hele krigen var han formelt ansatt hos Brown Boweri i Norge.

CERN

Rolf Widerøe og Odd Dahl (1898–1994) var meget sentrale da CERN ble etablert i 1954. CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) er en europeisk organisasjon for forskning på partikkelfysikk, kjernefysikk og kjernekjemi. Hensikten var å reetablere europeisk forskning, samt å bedre relasjonene mellom europeiske land etter 2. verdenskrig. Rolf Widerøe var med i en ekspertgruppe som skulle stå for konstruksjonen av CERNs akselerator, en Proton-synkrotron (PS). Han hadde tatt patent på protonsykrotronen seks år tidligere. Dahl var administrator og koordinator for PS-prosjektet. Enda en nordmann var med, Kjell Johnsen (1921–2007), akseleratorekspert og professor i kjernefysikk. Akseleratoren sto ferdig i 1959. Åttende desember nådde man energitoppen, 28,3 GeV. For CERN har PS vært svært viktig og er

fremdeles i drift. PS er CERNs ”arbeidshest nr. 1”, og fungerer nå som injektor i kjeden av større akseleratorer som bl.a. ender opp i LHC (*Large Hadron Collider*). PS-teknologien er nå brukt i alle større akseleratorer.

Widerøe innså tidlig at det var mulig å oppnå høye tyngdepunktsenergier ved å la partikkelstråler kollidere med hverandre. Tyngdepunktsenergi i partikkelkollisjoner er den energi som kan omsettes til nye partikler. Dette tok han patent på i 1943, men kom aldri selv til å utvikle dette patentet til en praktisk fungerende ”collider”. Det gjorde imidlertid andre, noe som til sitt resulterte i at CERN den 4. juli 2012 kunne annonse at Higgs-partikkelen var funnet.⁽⁷⁾

Nobelpris?

Rolf Widerøe mottok mange æresbevisninger.⁽⁸⁾ Her skal bare nevnes to: ”*Robert R. Wilson Prize for Achievement in the Physics of Particle Accelerators*” for hans mange bidrag til akseleratorfysikk og teknologi, og ”*Røntgenprisen*” for sine bidrag til akseleratoranvendelse i stråleterapi. Hans interesse for, og innsikt i, stråleterapi kom tydelig til uttrykk ved et foredrag han holdt på Radiumhospitalet 12. november 1974: ”Strålebiologi og stråleterapi – Aktuelle problemer”. Her avdekket han betydelig innsikt i til-grunn-liggende mekanismer for effekt av stråling på biologiske systemer.⁽⁹⁾

Professor Robert Hofstadter ved Stanford University, selv nobelprisvinner i fysikk (1961), nominerte Widerøe til fysikkprisen i januar 1985. Men forslaget nådde ikke opp. Tidligere forsøk hadde også vært mislykket. Flere mener at Rolf Widerøe burde hatt en nobelpris, bl.a. professor Søren M. Bentzen.⁽⁶⁾ Han mener at Rolf Widerøe burde delt prisen med Ernest O. Lawrence som fikk prisen i 1939, ”*for the invention and development of the cyclotron and for results obtained with it, especially with regard to artificial radioactive elements*”. Lawrence bygget på Widerøes ideer og var i ettertid påpasselig med å erkjenne dette.

På 1990-tallet oppsøkte professor Tor Brustad ved Radiumhospitalet Riksarkivet for å se saks-dokumentene vedrørende Widerøe. Konklusjonen på Landssviksak nr. 3418/45 ble som nevnt ovenfor. Tanken var å hedre Rolf Widerøe på ”*1st Scandinavian Symposium in Radiation Oncology*” i Rosendal i mai 1997. Rolf Widerøe gikk imidlertid ut av tiden i oktober året før.

Anbefalt videre lesing: Referanse 6.

Referanser

1. O. Aspelund: *Rolf Widerøe har passert 80 år. Fra Fysikkens Verden*, 46, Nr. 1, 5-7 (1984)
2. J.F. Evensen: *Akseleratorfysikk*. Onkonytt, 1, 18-23 (2015)
3. J. Bernstein: *Hitlers Uranium Club*. Springer-Verlag N.Y., Inc. (2001)
4. J.F. Evensen: *Operation Epsilon og Farm Hall*. Fra Fysikkens Verden, 74, Nr. 1, 31-33 (2012)
5. T. Brustad: *Rolf Widerøe: Why is the Originator of the Science of Particle Accelerators so Neglected, Particularly in his Home Country?* Acta Oncologica, 37, 603-614 (1998)
6. A. Sørheim: *Besatt av en drøm – Historien om Rolf Widerøe*. Forlaget Historie og Kultur AS, (2015)
7. CERN Courier: *4. July 2012: a day to remember*. CERN Courier August 23, (2012)
<http://cerncourier.com/cws/article/cern/50565>
8. J.S. Vaagen: *FFV Gratulerer. Robert R. Wilson Prize to Rolf Widerøe*. Fra Fysikkens Verden, 54, Nr. 2, 34-35 (1992)
9. R. Widerøe: *Strålebiologi og stråleterapi – Aktuelle problemer*. Fra Fysikkens Verden, 37, Nr. 2, 39-47 (1975)

∞

HUSK Å BETALE
KONTINGENTEN!

Frå fysikkens historie

"Dataalderen tok til for 100 år sidan"

Det som skulle bli hovudgrunnlaget for dataalderen hadde sitt utspring i Berlin for 100 år sidan. Ein kombinasjon av slumpetreff og nyfikenhet gav ettertida den dominerande framgangsmåten for å masseframstille silisiumbaserte databrikkar, nemleg Czochralskis metode for å lage store enkeltkrystallar av metall, halvleiarar og andre materiale. Dagens solceller og integrert dataelektronikk består av skiver av einkrystallinsk silisium kutta frå czochralskiframstilte utstøypingar.

Bakgrunn

Jan Czochralski (uttale *jann tsjåkralski*) vart fødd i 1885 i ein liten by, Exin, polsk Kcynia, i Pommern, som den gong var del av det tyske keisardømmet. Pommern vart innlemma i Polen i 1920.

I 1904 reiste Czochralski til Berlin, der han både arbeidde og studerte. Han tok fatt på studiet ved *Technische Hochschule Charlottenburg*, dagens *Technische Universität Berlin*, i 1905, og fullførte diplomingeniøreksperten i 1910, med spesialitet i metallkjemi. Frå 1908 var han samtidig medarbeidar ved Metall-Laboratorium ved AEG, *Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft*, der han seinare sjølv vart leiar for laboratoriet. Czochralski gjorde seg kjend med det viktige framsteget for materialforsking i åra 1913–1914 og utetter, då W.H. Bragg og W.L. Bragg utvikla røntgenkrystallografien (sjå artikkelen "Braggs lov i 100 år" i FFV 75, nr. 2, 54–58 (2013)). Denne innsikten var særstakkt nytig då han nærmast ved eit uhell i 1916 "oppdaga" *Czochralski-metoden* for framdyrkning av prøver av einkrystalliske materiale.

På den tida var Czochralski opptatt av å studere farten av krystallisering av metallsmelter. Czochralskimetoden er særstakkt viktig i materialforskinga den dag i dag. Spesielt har groing av store einkrystallar av halvleiarmateriale vore avgjerande for framveksten av moderne integrert elektronikk basert på silisium. Czochralski blir av mange rekna som den mest kjente vitkapsmannen frå Polen. *European Metal Research Society*, E-MRS, har instituert ein czochralskipris til ære for han (figur 1).



Figur 1. Portrett av Jan Czochralski på medaljen for Czochralski-prisen som blir utdelt av E-MRS, European Metal Research Society.

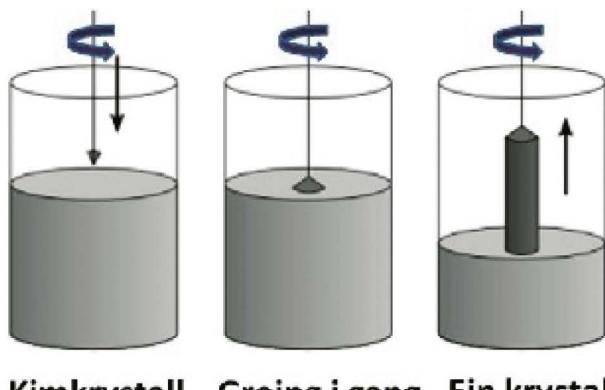
Det blir fortalt ein anekdote om korleis "oppdaginga" av Czochralski-metoden gjekk til. Han arbeidde visstnok i laboratoriet sitt med ei prøve av flytande tinn. Tinn er eit metall med lågt smeltepunkt, 232 °C. Czochralski skulle notere noko i journalen sin, som han vanlegvis gjorde med penn og blekk. I vanvare kom han til å dyppe pennespissen i det flytande tinnet i staden for i blekkhuset like ved, og då han løfta pennan opp, såg han at ein tråd av tinn hang i pennespissen. Han blei nyfiken og bestemte seg for å granske fenomenet nærmare, og fann mellom anna ut at metalltrådar som var laga ved hjelp av slik dyppe-metode, i stor grad var *einkrystallinske*, som betyr at dei hadde same krys-tallorientering over store delar av tråden. Her var røntgendiffraksjonen ein viktig reiskap.

Krystalltrekking etter czochralskimetoden

Czochralskimetoden går ut på å lage store einkrys-tallar frå smelta materiale ved å få materialet til å storkne sakte på ein liten kimkrystall som blir dregen langsamt ut av smelta.⁽¹⁾ Kimkrys-tallen blir også gitt ein langsam rotasjon, for å jamne ut prosessen over eventuelle temperatur- og konsentrations-variasjonar. Metoden blir nytta på metall og halvleiarar, men også på andre materiale, som metall-halogenid, oksid og silikat, mellom anna

med bruksområde i optikk og laserteknikk. Mange av dei har høge smeltepunkt. Også organiske krys-tallar blir laga med czochralskiteknikk.

Figur 2 viser ein skjematisk illustrasjon av krystalltrekkeprosessen. Smelta materiale blir halde ved temperatur like over smeltepunktet, og ein liten einkrystall (kimkrystall) med bestemt orientering heng fast i ein stiv pinne som kan roterast og løftast



Kimkrystall **Groing i gang** **Ein krystall**
i tråd senkt **på kimen,** **blir trekt opp**
ned **sakte løft** **av smelta**

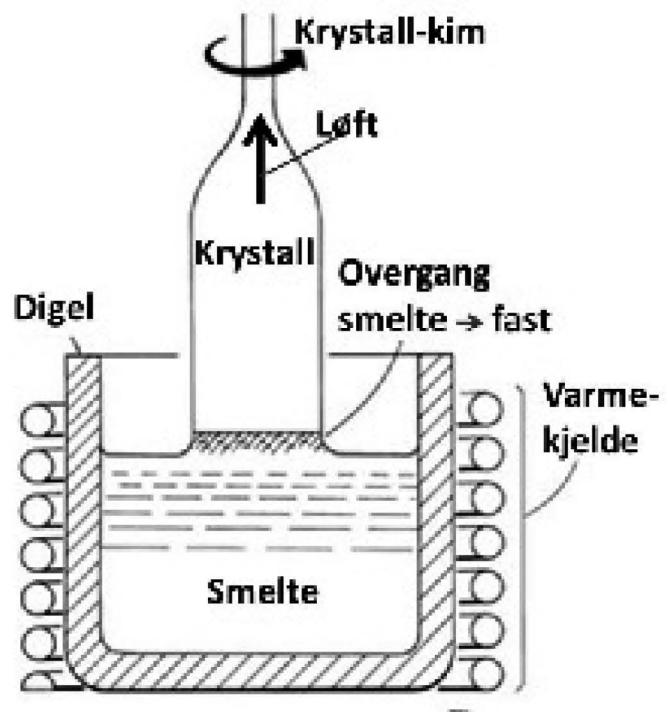
Figur 2. Sekvens, frå venstre mot høgre, av trekking av krys-tall av dopa materiale, t.d. silisium.

langsamt. Kimkrystallen blir senka ned til kontakt med smelteoverflata, og så løfta sakte opp mens flytande materiale i grensesona ”gror” seg fast til kimen og såleis får same orientering som kimen har. Dimensjonen på den ferdige krystallstøypen (”ingot”) blir bestemt av løfte- og rotasjonsfarten. Ein meir detaljert illustrasjon av prosessen, med overgangssona mellom smelte og krystall, er vist i figur 3.

Framstilling av einkrystallinsk silisium er kanskje den mest kjente bruken av czochralskimetoden i dag. Silisium har smeltepunkt 1414 °C, og det set spesielle krav til diglane som blir nytta. Dei ferdige einkrystallinske støypestykkja kan vere av betydelege dimensjonar. Standarddiameter er 30 cm, og støypane kan vere opp til eit par meter lange. Figur 4 viser eit eksempel.

Utgangsmaterialet er råsilisium, som mellom anna blir produsert frå kvartsitt av Elkem, som er verdsleialende på feltet, og særleg på solcelle-silisium. Vidarebehandlinga skjer i utlandet, m.a. ved REC Solar i Singapore.

Silisiumstøypane blir kutta opp i tynne skiver ("wafers" eller "vaflar") og gitt høveleg ytre form før dei blir vidareutvikla for integrert elektronikk og Silosceller. Doping kan skje alt i smelta tilstand, men



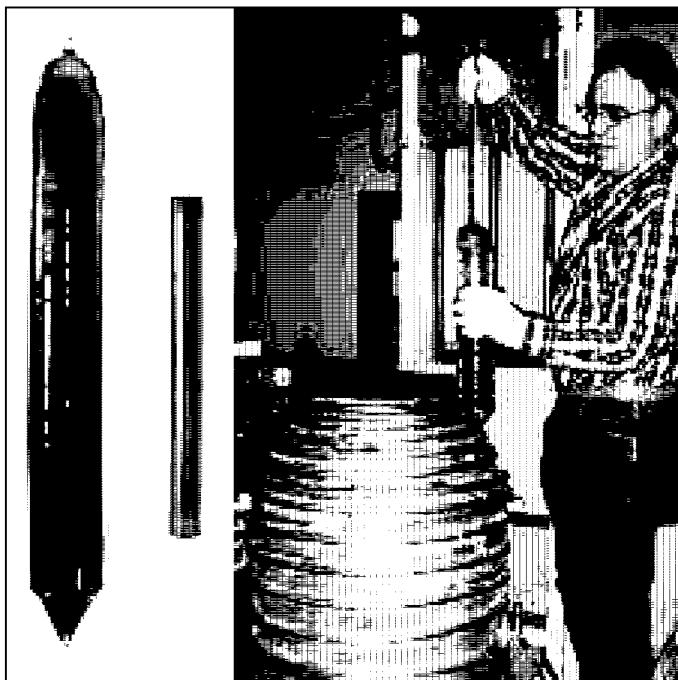
Figur 3. Krystalliseringa under trekkeprosessen. Groinga skjer i sonen mellom smelta og krystallen. Automatisert temperatur-, løfte- og rotasjons-kontroll bestemmer dimensjonen på støypestykket.



Figur 4. Ferdig silisiumstøvp med diameter 30 cm.

også ved behandling etter kuttinga. Også andre halvleiarmateriale kan framstilla med czochralski-metoden.

I figur 5 har vi eksempel på czochralskiframstilt einkrystallstøypar av rubin, som er eit oksidmateriale som består av aluminiumoksidet korund, Al_2O_3 , med nokre hundredels prosent innblanda kromoksid. Korund har smeltepunkt 2044 °C. Det er krom som gir rubinet den karakteristiske raudfargen.



Figur 5. Rubinkrystallar framstilte med czochralskimetoden. Rubin er aluminiumoksidet korund, Al_2O_3 , med tilsetting av krom (Cr). Den første laseren med synleg lys var ein rubinlaser.

gen. Som vi ser av figuren, kan også rubinkrystallar bli rett store.

Naturleg rubin er ein kostbar smykkestein, mens den syntetiske er mest interessant i teknisk samanheng. Den aller første laseren med synleg lys var ein rubin-laser, verkleggjort av Ted Maiman i 1960. Laseren gir bølgjelengda 694,3 nm, altså i det rauda området av spektret.

Czochralski sin vidare karriere

I 1917 organiserte Czochralski forskingslaboratoriet *Metallbank und Metallurgische Gesellschaft* i Berlin, og var leiar av laboratoriet til 1927. Han har utgitt eit betydeleg læreverk i fagfeltet.⁽²⁾ Han var likeeins grunnleggar og president i *Deutsche Gesellschaft für Metallkunde*.

I 1928 blei Czochralski kalla til professor i metallurgi ved den Tekniske Høgskolen i Warszawa. Under verdskrigen fekk han i oppdrag å sørge for metallreservedelar til diverse maskineri, samtidig som han understøtta polsk undergrunnsrørslle. Men han blei fråtatt professoratet av kommuniststyret i 1945. Han flytta då til heimbyen Kcynia, der han dreiv sitt eige lille firma med kosmetikk og hushaldskjemikaliar dei siste åra, til han døydde og vart gravlagd der i 1953. Heimbyen har reist eit minnesmerke over han, og det polske parlamentet erklærte 2013 som Czochralski-året, 60 år et-

ter han døde. Czochralski-prisen med minnemedaljen (figur 1) blei innstifta av E-MRS i 2003.

Referasar

1. J. Czochralski: *Ein neues Verfahren zur Messung der Kristallisationsgeschwindigkeit der Metalle*. Zeitschrift für Physikalische Chemie **92**, 219–221 (1918)
2. J. Czochralski: *Moderne Metallkunde in Theorie und Praxis*. Bok, Springer-Verlag, Berlin (1924)
3. Vidare lesnad: Store norske leksikon: *Elektronikk – Integrerte kretser* (Nettutgave)

Emil J. Samuelsen

∞

Ein viktig faktor 2

Fritz London sette fram teorien om kvantisering av magnetisk fluks som trengjer gjennom eit hol i superleiara.⁽¹⁾ Han fann at fluksen er kvantisert i einingar av forholdet mellom to naturkonstantar, h/e , planckkonstanten dividert på elektrisk elementærladning. Lars Onsager foreslo i 1954, at dette kunne tolkast som ein indre eigenskap ved elektromagnetisk felt generelt. I fysikken er ingen teori rett før den er eksperimentelt verifisert. Og slike radikale idear måtte sjølv sagt etterprøvast.

I 1961 arbeidde to grupper, Doll og Nähbauer i Tyskland,⁽²⁾ og Deaver og Fairbank i USA,⁽³⁾ med å ettervise Londons teoretiske resultat. Begge gruppene la superleiande film på ein tynn tråd, den første på kvartstråd, den andre på kopartråd, og laga dermed ein innhol sylinder som magnetisk fluks kunne trenge gjennom og bli fanga i. Nå fann begge gruppene at London hadde hatt rett i ein ting, at fluksen var kvantisert. Men begge gruppene fann også at fluksen inne i den mikroskopiske sylinderen var kvantisert i einingar av $\Phi_0 = h/2e$, ikkje h/e som London hadde foreslått.

Den amerikanske gruppa spurde fleire teoretikarar om forklaring på faktoren 2. Berre Lars Onsager svara.⁽⁴⁾ Han viste til Londons artikkel som utgangspunkt, og vidare til uavhengige arbeid av Schafroth, Fröhlich, og Bardeen frå 1950 til -54.

På dette grunnlaget argumenterte han for at ladningsberarane i superleiarar er elektronpar. Då vil kvantiseringa vere $\Phi_0 = h/2e$, som begge gruppene hadde funne.

Det merkelege med dette var at både Coopers overbevisande teori for pardanning alt var publisert i 1956,⁽⁵⁾ og ennå meir, at den fullstendige BCS-teorien av Bardeen, Cooper og Schrieffer var publisert i 1957.⁽⁶⁾ "Heile verda" kjende desse arbeida. Men Onsager tok dei ikkje med i referanselista i den vesle artikkelen på ei side som han fekk publisere i *Physical Review Letters*.

Om ein finles Onsagers artikkel, finst der ei setning som gjer hans framstilling endå merkelegare: Han seier at dei arbeida som han refererte til, dannar grunnlaget for teoriar som forklarar mange av superleiareigenskapane, og at dette er allment akseptert. Det kan berre gjelde BCS-teorien. Sjølv sagt kjende han den. Likevel let han vere å gje referanse til BCS, eller nemne den med namn. P.W. Anderson, som ikkje er kven som helst, kalla seinare Onsagers framstilling "perverse".⁽⁷⁾

Det verserer mange anekdoter om Onsager der han vert framstår som litt spesiell. Men der er ei slags forklaring her: Som nemnt hadde Onsager foreslått at Londons kvantisering kunne bety at kvantisering av det elektromagnetiske feltet er ein indre eigenskap. Han nytta nå høvet til å annonsere at han må forlate den hypotesen. Elektronpar med to ladningar er bosonar, men det finst også bosonar med berre ei ladning (deuteronar), seier han, og vilkår knytt til elektromagnetisk felt må vere like for alle partiklar. Slik fekk han avlyst sin eigen idé.

Men nå til konklusjonen: Dei eksperimentelle gruppene hadde funne ein overmåte viktig faktor 2, reelt sett eit 2-tal som stadfester BCS-teorien for superleiarar, der eit heilt sentralt poeng er danning av elektronpar.

Det er freistande her å avslutte med ein anekdote som gjeld P.W. Anderson. Min tidlegare kollega ved Fysikk, NTH, Bjørn Slagsvold, har fortalt at han deltok i ein sommarskule i Les Houches i Frankrike, midt på 1960-talet. Der førelas P.W. Anderson. Ein tilhøyrar reiste spørsmål om han kanskje hadde ein faktor 2 feil i framstillinga på tavla. Anderson snudde seg og svara kontant: "*Concern for minus signs and factors of 2 is a sign of weakness!*" Well, surely not always so, dr. Anderson!

Referansar

1. F. London: *Superfluids*, Vol. I, s 152, Wiley (1950)
2. R. Doll and M. Næbauer: *Experimental Proof of Magnetic Flux Quantization in a Superconducting Ring*. *Phys. Rev. Lett.* **7**, 51 (1961)
3. B.S. Deaver and W.M. Fairbank: *Experimental Evidence for Quantized Flux in Superconducting Cylinders*. *Phys. Rev. Lett.* **7**, 43 (1961)
4. L. Onsager: *Magnetic Flux Through a Superconducting Ring*. *Phys. Rev. Lett.* **7**, 50 (1961)
5. L.N. Cooper: *Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas*. *Phys. Rev.* **104**, 1189 (1956)
6. J. Bardeen, L.N. Cooper and J.R. Schrieffer: *Theory of Superconductivity*. *Phys. Rev.* **108**, 1175 (1957)
7. David Lindley: *Superconductor Quantizes Magnetic Field*. *Physics* **8**, (2015)
<http://physics.aps.org/articles/v8/102>

Kristian Fossheim

∞

Bokomtale

Carlo Rovelli: *Seven brief lessons on physics*. Engelsk versjon. Penguin Random House, 2015 (83 sider). Kan kjøpes fra Amazon.uk for £ 6,99, eller som ebok/Kindle for £ 5,49.

Seven brief lessons on physics: en artig kortversjon av viktig fysikk

Den italienske fysikeren Carlo Rovelli har skrevet en liten bok om noen av fysikkens viktigste oppdagelser og lover. Boka er i underkant av A5-format, og har bare 83 sider tekst. Jeg leste om boka i *New Scientist*, der den fikk en strålende anmeldelse. Jeg ble nysgjerrig og bestilte den fra Amazon.uk

Carlo Rovelli er en italiensk teoretisk fysiker som har arbeidet blant annet med *loop quantum gravity*. Han har doktorgrad fra universitetet i Padova, 1986, og har hatt stillinger både i Italia og i USA. Han arbeider nå ved *Centre de Physique Théorique* ved universitetet Aix-Marseille.

Jeg skal kort omtale de syv leksjonene.

Leksjon 1, The Most Beautiful of Theories, handlar om Einsteins generelle relativitetsteori. For

Rovelli vekker denne teorien følelser på linje med andre mesterverk i verdenshistorien, som Mozarts Requiem, eller dekorasjonene i det Sixtinske kapell i Roma. Kapitlet gir en populær forklaring på universets krumning.

Leksjon 2, Quanta, begynner med å konstatere at det ikke finnes to teorier som kan være mer forskjellige enn generell relativitet og kvanteteori. Kapitlet forteller om hva fotoner er, "lyspakker". Rovelli forteller om Einsteins store skepsis til kvanteteorien, og om Bohrs innsats. Og litt om koplingene til filosofi osv. Jeg synes slutten blir litt for kort og for full av spørsmålstege.

Leksjon 3, The Architecture of the Cosmos, gir en historisk oversikt over menneskehets universmodeller gjennom tidene, helt tilbake til Aristoteles. Og om de store sprangene i vår forståelse, med Copernicus, og med Hubbles oppdagelse av det ekspanderende univers.

Leksjon 4, Particles, begynner med oppdagelsen av higgsbosonet. Sammensetningen av partikler i standardmodellen blir sammenlignet med et legobyggesett, et morsomt bilde. Slutten, om den videre søken etter nye teorier, er bra.

Leksjon 5, Grains of Space, handler om forsøkene på å finne teorier som kan forene kvantmekanikken og relativitetsteorien. Jeg synes overskriften og stoffet er litt vanskelig. Men så er da temaet også blant de mest innfløkte som det går an å tenke seg: to teorier som begge synes å være helt riktige, men er uforenlig med hverandre. På side 38 er det en vits om dette, om to menn som krangler knallhardt, og om en rabbi som forsøker å megle. Han sier til den ene: *You are right!* Og når den andre, og den andres kone, begge protesterer: *You are right, too!*

Leksjon 6, Probability, Time and the Heat of Black Holes, forteller om termodynamikken. Også her er litt historie, blant annet om Boltzmann som tok livet av seg i 1906, og aldri fikk oppleve hvor akseptert hans ideer kom til å bli. Et pedagogisk kapittel.

Leksjon 7, Ourselves, har en god innledning om menneskene, og vår rolle i å observere verden. Noen interessante betrakninger om determinisme, og spørsmålet om vi har en fri vilje. Noe svar på dette kan Rovelli selvsagt ikke gi. Men kapitlet gjør at leseren klør seg i hodet.

Alt i alt er dette en god og interessant liten bok.

Den passer neppe for den helt alminnelige leser som ikke har noen bakgrunn i realfag. Men den kan passe utmerket for begynnende studenter i samtlige av realfagene, og kanskje også for realfagselever i siste klasse på videregående skoler. For oss fysikere er denne kortversjonen av all viktig fysikk både morsom og interessant.

Hugo Parr
Nittedal

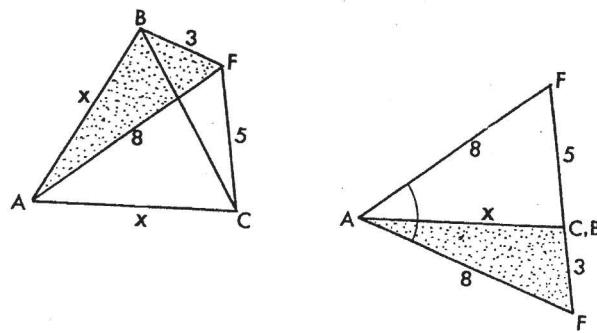
∞

Trim i FFV

Løsning på FFVT 1/16

Naboavstand

Oppgaven gikk ut på å bestemme naboavstanden x mellom tre gårder A, B, og C som ligger like langt fra hverandre. Det var oppgitt at gårdene ligger henholdsvis 3 km, 5 km og 8 km fra stedets fjernsynsmast F (se venstre figur).



La oss flytte $\triangle ABF$ slik at trekantsiden AB faller sammen med siden BC, slik som vist i høyre figur. Den nye trekanten som dannes må være en liksidedet trekant, siden to av sidene er 8 km, og deres mellomliggende vinkel er 60° . Fordi $5 + 3 = 8$ vil C ligge på den rette linjen mellom F og F. Vinklene ved F er da også 60° , og den utvidede pythagoreiske setning gir for den minste trekanten ACF (i km^2):

$$x^2 = 8^2 + 3^2 - 2 \cdot 8 \cdot 3 \cdot \cos 60^\circ = 64 + 9 - 24 = 49.$$

Altså er naboavstanden lik 7 km.

∞

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



NORGE P.P. PORTO BETALT



Retningslinjer for forfattere

FRA FYSIKKENS VERDEN utgis av Norsk Fysisk Selskap og sendes til alle medlemmer. Disse er vanligvis utdannet fra universiteter og høgskoler med fysikk i sine fagkretser. Andre kan også abonnere på bladet. Blant disse er elever og bibliotekar ved videregående skoler. Bladet gis ut fire ganger i året, i mars, juni, oktober og desember. Tidsfristene for stoff er 1. februar, 1. mai, 1. september og 1. november. Opplaget er f.t. 1400.

FORMÅLET MED FFV er å gi informasjon om aktuelle tema og hendinger innen fysikk, og å bygge bro mellom forskere, fysikkførere, studenter og andre interesserte. Ikke minst ønsker FFV å være til hjelp for elever og lærere i videregående skoler 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 vanlige fysikkstudenter. Artiklene i FFV skal primært gi informasjon til dem som er utenfor det aktuelle fagfeltet. Artikler som bare forstår av en liten faggruppe har ingen plass i bladet. Alt stoff blir vurdert redaksjonelt, og redaksjonen forbeholder seg rett til å foreta mindre endringer.

MANUSKRIPTER leveres i en form som forfatteren mener er direkte publiserbart. De skal leveres elektronisk, helst som e-post. Dersom formatet ikke er ren tekst (helst LATEX) eller i Microsoft Word, må det merkes med hvilket tekstbehandlingsprogram som er brukt. Under alle omstendigheter må redaksjonen kunne forandre teksten direkte.

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 tilleggstoff.

SMÅSTYKKER: Gratulasjoner, nekrologer, bokomtaler, skolestoff, møtereferater etc. mottas gjerne, men de må ikke være lengre enn 1–2 sider. Bokkronikker kan være noe lengre. Doktoromtaler begrenses til en halv side inkludert bilde.

ILLUSTRASJONER er en viktig del av en artikkel. Legg derfor mye omtanke i figurene. All tekst skal være på norsk. Figurene vil som regel bli trykt i en spaltebredd på 8,6 cm. De bør være på elektronisk form i et standard grafisk format og med god oppløsning. Vi kan unntaksvise motta figurer eller bilder som urastrerte kopier. Figurer og tabeller skal være referert i den løpende teksten, og ønsket plassering må markeres. Hvis forfatterne selv ikke har laget figurene, skal opprinnelsen oppgis. Forfatterne må selv innhente tillatelse til bruk av slike illustrasjoner. FORSIDEBILDER velges som regel i tilknytning til en av artikkelen. De må være teknisk gode og lette å forstå. KORREKTUR: Forfatterne får tilsendt korrektur som må returneres snarest. Det må ikke gjøres unødige endringer i korrekturen.

Norsk Fysisk Selskap

STYRE

President:

Professor Åshild Fredriksen
Inst. for fysikk og teknologi, UiT
e-post: ashild.fredriksen@uit.no

Visepresident:

Professor Michael Kachelriess
Institutt for fysikk, NTNU
e-post: michael.kachelriess@ntnu.no

Styremedlemmer:

Førsteamanuensis Wojciech Jacek Miloch
Fysisk institutt, UiO
Professor Olav Gaute hellesø
Institutt for fysikk og teknologi, UiT
Professor Jan Petter Hansen
Inst. for fysikk og teknologi, UiB
Professor Håvard Helstrup
Høgskolen i Bergen
Førsteamanuensis Magnus Lilledal
Institutt for fysikk, NTNU
Professor Jon Samseth
Høgskolen i Oslo og Akershus, Lillestrøm
Lektor Morten Trudeng
Asker videregående skole

Selskapets sekretær:

PhD-stipendiat Ole Meyer
Inst. for fysikk og teknologi, UiT,
Pb. 6050 Langnes, 9037 Tromsø,
e-post: nfs.styret@gmail.com
Bankgiro: 7878.06.03258

Fra Fysikkens Verden

Redaktører:

Professor Øyvind Grøn
Høgskolen i Oslo og Akershus, og
Fysisk institutt, UiO
e-post: oyvind.gron@hioa.no
Professor Emil J. Samuelson
Inst. for fysikk, NTNU
e-post: emil.samuelson@ntnu.no

Redaksjonssekretær:

Karl Måseide
Fysisk institutt, UiO
e-post: k.a.maseide@fys.uio.no

Redaksjonskomité:

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

Ekspedisjonens adresse:

Fra Fysikkens Verden
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo,
Boks 1048 Blindern, 0316 Oslo.
Tlf.: 22 85 64 28 / 22 85 56 68
Fax.: 22 85 64 22 / 22 85 56 71

Fra Fysikkens Verden kommer ut 4 g. årlig.
Abonnement tegnes hos selskapets sekretær.
Årsabonnement 200 kr. (Studenter 100 kr.)