

Fra Fysikkens Verden

NR. 2 – 2020
82. ÅRGANG

UTGITT AV NORSK FYSISK SELSKAP

68 år med fysikkforskning med JEEP-reaktorene på Kjeller



Les også om:

■ Kjernekrefter

■ Elektrisk supraleiing

Nr. 2 – 2020

82. årgang

Utgiver:

Norsk Fysisk Selskap

Redaktører:

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

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

Redaksjonssekretær:

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

Redaksjonskomité:

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

Layout og sats:

Maria Hammerstrøm

Trykkeri:

Oslo Sats, repro og montasje A/S

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
Internettadresse: www.norskfysisk.no

Abonnere:

Fra Fysikkens Verden kommer ut 4 ganger årlig.
Abonnement tegnes på postadressen ovenfor
eller på følgende e-postadresse:

E-post: nfs.styret@gmail.com

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

Retningslinjer for bidragsyttere

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

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

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

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

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

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

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

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

Innhold

Frå redaktørane *Emil J. Samuelsen* 27

Fysikknytt

Den sterke kjernekraften *Øyvind G. Grøn* 28

Artikler

68 år med fysikkforskning med JEEP-reaktorene på Kjeller *Arne T. Skjeltorp* 30

Elektrisk supraleiing ved romtemperatur *Emil J. Samuelsen* 35

Småstoff

Bokanmeldelse: *Fysikk – enkelt forklart* av Anja Røyne *Øyvind G. Grøn* 38

Personomtaler

In memoriam: Thormod E. Henriksen *Eli Olaug Hole og Einar Sagstuen* 40

In memoriam: Philip Warren Anderson *Asle Sudbø* 42

FRÅ REDAKTØRANE

Det kan vere lærerikt å kikke i medlemsblada til dei fysiske selskapa i grannelanda Danmark og Sverige. Ein vil oppdage at format og stofftilgang synest å vere større enn for vårt blad. Somme vil seie at fysikkfaget i dei to landa har større plass og rikare historie enn hos oss, men det har truleg også samband med ressursbruka. Bak det danske bladet *Kvant* står det fleire organisasjonar, og dei har ein redaksjon med heile tolv personar. Det svenske *Fysikaktuellt* er organet for eit fysikarsamfunn med medlemstall nokså likt tallet for Norsk fysisk selskap, men bladet synest å ha betre økonomi m a gjennom annonsar i bladet, og det har fleire aktive skribentar enn *FFV*.

Hovudinnslaget i dette nummeret er omtalen av forskinga ved reaktorane på Kjeller som eit a propos til at reaktorane både på Kjeller og i Halden er vedtatt nedlagde. Artiklar om supraleiing ved romtemperatur, og om kva krefter som herskar i atomkjernar burde interessere. Bokmeldingar høyrer også med i *FFV*. Vidare har bladet omtalar om to høgt verdsette veteranar som er gått bort.

Tallet på nye doktorgradar ved universiteta når kvart år nye høgder, men omtale av dei er dessverre blitt sjeldan i bladet vårt. Både institutta og rett-leiarane bør gjere noko med det.



Øyvind G. Grøn



◀ Emil J. Samuelsen

Den sterke kjernekraften

Det påpekes at den sterke kjernekraften ikke er en av de fire fundamentale naturkreftene. Videre omtales nye undersøkelser der den sterke kjernekraften mellom nukleoner er undersøkt med utgangspunkt i data oppnådd ved å sende energirike elektroner mot atomkjerne. Forskerne fant at nukleonene er intakte selv på små avstander, der man tidligere trodde det var nødvendig å ta i betraktning et kvark-gluon plasma.

Øyvind G. Grøn OsloMet – storbyuniversitetet

Forskningen ble utført av fysikere ved MIT. Resultatene ble presentert i MIT News 26. februar 2020 [1]. Nyhetsartikkelen innledes med setningen (oversatt til norsk): «Mesteparten av den vanlige materien holdes sammen av et subatomært usynlig 'lim' kjent som den sterke kjernekraften – én av de fire fundamentale naturkreftene, sammen med gravitasjon, elektromagnetisme og svak kraft.» Dette har nå spredd seg til et stort antall nyhetsmedier, og det er dessverre feil. Den sterke kjernekraften er ikke en av de fire fundamentale naturkreftene. Den fjerde fundamentale kraften ved siden av gravitasjon, elektromagnetisme og svak kraft, er fargekraften mellom partikler med fargeladning – kvarker og gluoner.

Den sterke kjernekraften har et tilsvarende forhold til fargekraften som van der Waal-kraften har til elektriske kraft. På samme måte som van der Waal-kraften er en «restkraft» (engelsk *residual force*) fra den elektriske kraften, selv om den virker mellom elektrisk nøytrale molekyler, er den sterke kjernekraften en «restkraft» fra fargekraften, selv om den virker mellom fargenøytrale nukleoner. Det er derfor en hjelp for forståelsen av den sterke kjernekraften om man har klarhet i hvordan van der Waal-kraften oppstår.

Van der Waalske-krefter

Van der Waalske-krefter er navnet på tiltrekkende elektromagnetiske krefter som virker mellom elektrisk nøytrale molekyler på grunn av ujevn ladningsfordeling i molekyler. Disse kreftene er mye svakere enn kjemiske bindinger som skyldes utveksling av elektroner mellom ulike atomer, men har likevel praktisk betydning. De er for eksempel ansvarlig for fenomenet overflatespenning i vann.

Tenk deg to molekyler nær hverandre. De er elektrisk nøytrale, men har et elektrisk dipolmoment, det vil si at ladningen er ujevnt fordelt i

molekylene. Da vil den delen som har overskudd av positiv ladning i det ene molekylet trekke på den delen har overskudd av negativ ladning i det andre. Dermed vil molekylene orientere seg slik at delene med motsatt ladning kommer nærmest hverandre og delene med lik ladning kommer lengre vekk fra hverandre. Dermed blir tiltrekningen mellom de motsatt ladde delene større enn frastøtningen mellom delene med ladning av samme fortegn, og det blir en tiltrekning mellom molekylene. Det er van der Waal-kraften. Den har kort rekkevidde, bare omtrent 10^{-10} meter.

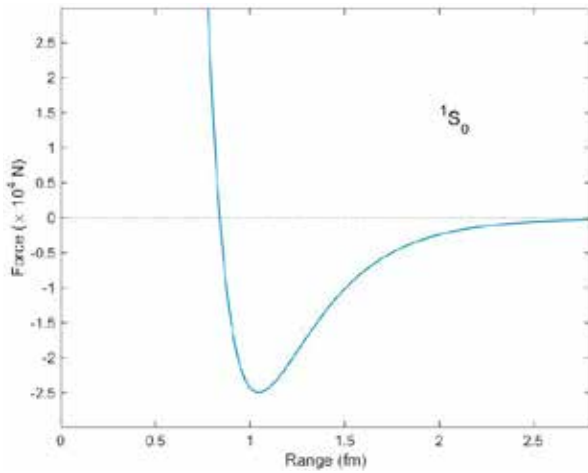
Den sterke kjernekraften

Fargekraften omtales på engelsk ofte som «strong interaction», mens den sterke kjernekraften kalles «strong nuclear interaction». Dette er en sterk tiltrekkende kraft som holder atomkjernene sammen til tross for den elektriske frastøtningen mellom protonene i en atomkjerne. Den har en rekkevidde på bare 1 fm (femtometer: 10^{-15} meter).

La oss se hvordan den sterke kjernekraften mellom fargenøytrale nukleoner oppstår fra fargekraften mellom gluoner og kvarker på tilsvarende måte som van der Waal-kraften mellom nøytrale molekyler oppstår fra den elektriske kraften. Nukleonene består av gluoner og kvarker som har fargeladning. Det virker en uhyre sterk fargekraft mellom fargeladningene. Dette er analogt til at det virker elektriske krefter mellom ladninger. Nukleonene er fargenøytrale på tilsvarende måte som at molekylene er elektrisk nøytrale. Men på samme måte som at den elektriske ladningen er ujevnt fordelt i molekylene, er fargeladningen ujevnt fordelt i nukleonene. Dermed oppstår en «restkraft» – den sterke kjernekraften – fra fargekraften. Den virker mellom de fargenøytrale nukleonene og har kort rekkevidde tilsvarende van der Waal-kraften mellom nøytrale molekyler som også har kort rekkevidde. Dette betyr at den sterke kjernekraften ikke er en av de fire fundamentale naturkreftene, men en kraft avledet fra fargekraften mellom gluoner og kvarker.

Figur 1 viser hvordan den sterke kjernekraften mellom et proton og et nøytron avhenger av avstanden mellom sentrene av nukleonene. Grafen er beregnet fra et potensial kalt Reidpotensialet som ble innført i 1968 på grunnlag av de egenskapene man da kjente til for den sterke kjernekraften fra spredningseksperimenter. Det er en fenomenologisk beskrivelse av den sterke kjernekraften.

Vi ser at kraften er sterk og tiltrekkende for avstander mellom omtrent 0,8 fm og 1,5 fm. I



Figur 1. Den sterke kjernekräften, beregnet fra Reidpotensialet, som funksjon av avstanden mellom sentrene til et proton og et nøytron med spinn i samme retning.

en avstand på 1 fm er den sterke kjernekräften mellom to protoner omtrent 137 ganger sterkere enn den elektriske frastøtningen mellom dem. Avstandene 0,8 fm og 1,5 fm definerer størrelsen av atomkjernene. For mindre avstander enn 0,8 fm blir den sterke kjernekräften frastøtende, og for større avstander enn 1,5 fm blir den forsvakt til å motvirke den elektriske frastøtningen mellom protonene i atomkjernene.

Fargekraften er en ganske komplisert kraft som blant annet avhenger av nukleonenes spinn. Den er sterkere for to nukleoner med spinn i samme retning enn i motsatt retning.

Dette har betydning for hva som skjer hvis man sender energirike elektroner mot en atomkjerne. To protoner med samme spinn har en tendens til å være fast bundet sammen av den sterke kjernekräften, og det kommer derfor ofte proton-proton-par ut fra et spredningsforsøk der elektroner med høy energi sendes mot en atomkjerne. Andelen av proton-proton-par som kommer ut fra et spredningsforsøk forteller om spinnavhengigheten av kjernekräften.

Det har ennå ikke lyktes å utlede alle egenskapene til den sterke kjernekräften fra kvante-kromodynamikk – teorien for fargekraften mellom kvarker og gluoner. Men en viktig egenskap ved fargekraften er klarlagt. Den tiltrekkende fargekraften er så sterk for avstander under 0,7 fm, dvs. inni protoner og nøytroner, at man ikke kan rive kvarkene løs fra hverandre. Det kreves så stor energi for å gjøre dette at i stedet for å frigjøre kvarkene fra hverandre, dannes nye partikler. Fenomenet omtales på engelsk som «confinement». Dette er imidlertid en egenskap ved fargekraften, ikke ved den sterke kjernekräften.

Man har spekulert på om det under ekstreme forhold med enormt trykk og tetthet for eksempel

innerst i kjernen av en nøytronstjerne, vil kunne skje en overgang til en tilstand hvor grensen mellom to nukleoner blir borte, og det dannes et plasma av frie kvarker som utveksler gluoner, et «kvark-gluon-plasma».

Nye spredningsforsøk

Det er gjort nye spredningsforsøk med Large Accelerator Spectrometer ved Jefferson Laboratory i Newport, Virginia i USA med det mål å kartlegge egenskapene til den sterke kjernekräften mellom nukleoner for små avstander mellom dem. Det dreier seg om å undersøke kjernekräften i den delen av grafen i Figur 1 som er til høyre for bunnpunktet ved en avstand på 1 fm der kraften er sterkest. Det betyr at jo større energi elektronene skytes inn med, i jo mindre avstand kan man observere egenskapene til den sterke kjernekräften.

Energiene og impulsene til produktene som kommer ut når elektroner treffer en atomkjerne, kan måles ved hjelp av svære detektorer. Når man også kjenner energien og impulsen til de innkommende elektronene, kan man beregne frigjøringsenergien til partikler holdt sammen av kjernekräften og spinnavhengigheten til kjernekräften som funksjon av avstanden.

Det er gjort mange slike forsøk opp gjennom årene. Men i en artikkel [2] publisert i *Nature* 27. februar 2020 rapporteres om nye undersøkelser i et høyere energiområde enn det man har oppnådd tidligere. Det betyr at egenskapene til kjernekräften er undersøkt for mindre avstander enn tidligere – så små avstander at man nærmer seg forventet overgang til kvark-gluon-plasma.

Forskerne fremhever at et av de viktigste resultatene av de nye eksperimentene er at kjernekräften selv for de minste undersøkte avstandene, har egenskaper som stemmer med beregninger for kjernekräften fra sfæriske nukleoner. De ser ingen tegn til at nukleonene løser seg opp i et kvark-gluon plasma og runder av artikkelen med: «Våre data gir sterk støtte til å beskrive den effektive kjernekräften som en kraft mellom punkt-like nukleoner i sammenheng med modeller av atomkjerner og tette astrofysiske systemer som nøytronstjerner». ■

Referanser

1. Jennifer Chu. «The force is strong in neutron stars». MIT News. Internettadresse: <http://news.mit.edu/2020/force-strong-neutron-stars-0226>
2. A. Schmidt og medarbeidere. «Probing the core of the strong nuclear interaction». *Nature* 578, 27. februar 2020.

68 år med fysikkforskning med JEEP-reaktorene på Kjeller

Den 29. juli 1951 ble den første kjernefysiske reaktoren JEEP I (Joint Establishment Experimental Pile) startet opp ved Institutt for atomenergi (IFA) på Kjeller. I 1951 var det bare Storbritannia og Frankrike av landene i Europa som hadde en reaktor. Denne hendelsen vakte stor oppmerksomhet langt utenfor landets grenser. Det viste for all verden at Norge var et høyteknologisk land.

Arne T. Skjeltnor Institutt for energiteknikk, Kjeller

JEEP-reaktorene

Realiseringen av JEEP I kom i stand ved et nederlandsk-norsk samarbeid som hadde sitt opphav helt tilbake til 30-tallet [1], og at noen «møtes», slik Jens Christian Hauge uttrykte det ved 50 års jubileet for reaktoren i 2001: «Det er dette tilfellet, det alle tings styrende tilfellet at noen møtes». De tre som møttes var fysikeren Gunnar Randers (figur 1), ingeniøren Odd Dahl og politikeren Jens Chr. Hauge. Randers og Dahl dro til USA i 1946 for å finne ut hva som skulle til for å bygge en reaktor da den første var bygget i USA. Hauge var minister i Gerhardsens andre regjering (1945–1955) og ordnet med finansieringen etter at de kom hjem.

Et enstemmig storting vedtok i 1946 byggingen av en reaktor, og den stod ferdig fem år etter. Nøytronstrålene fra JEEP I åpnet for forskning på nye problemer, og ga nye angrepsvinkler på gamle problemer (figur 2). Det åpne og frie forskningsmiljøet på Kjeller ble oppsøkt av studenter og forskere fra hele verden. Det var forskning innen reaktorfysikk, radioaktive isotoper, kjernefysikk og materialer som var aktuelt. JEEP I-reaktoren ble avstengt i juni 1967.

Figur 1. «The first condition to improve the world is to know what the world is made of.» Gunnar Randers, tale ved åpningen av JEEP I i 1951 [1].



En ny og forbedret reaktor, JEEP II, med mye større effekt og nøytronfluks og ble satt i gang for prøvedrift den 18. desember 1966 (figur 3 og 4). Den åpnet for utvidet forskning på et internasjonalt nivå. I 1981 fikk IFA et nytt navn, Institutt for energiteknikk (IFE).

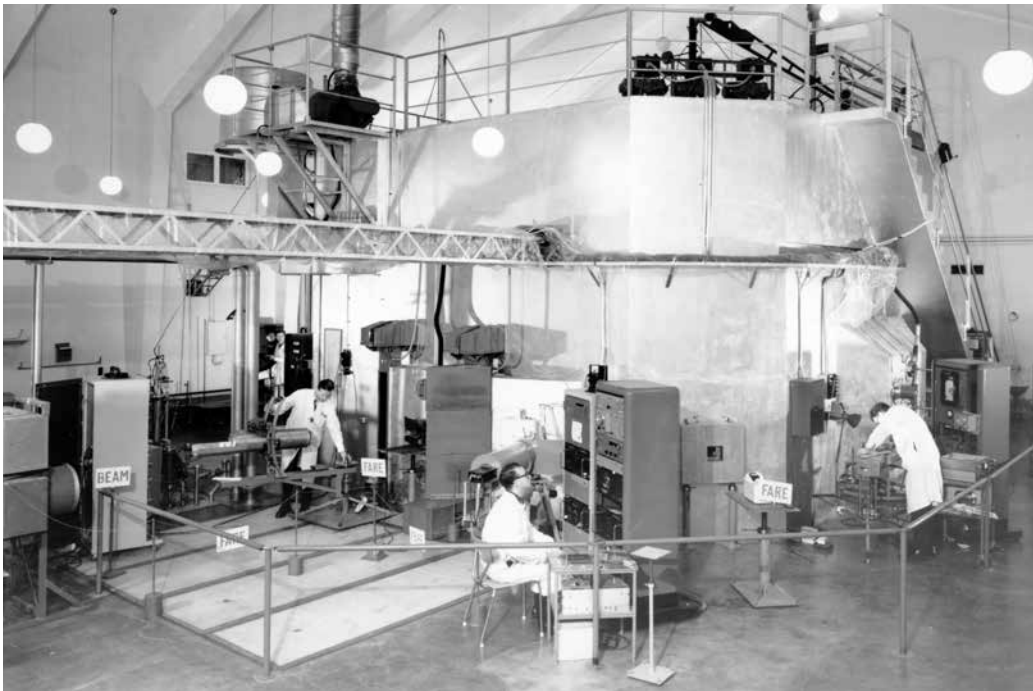
Den 25. april 2019 vedtok styret i IFE å legge ned JEEP II-reaktoren. Dette satte dermed punktum for en 68 år lang ærerik historie og lukket foreløpig døren for en nasjonal videre satsing på bruk og tilgjengelighet av nøytroner i Norge. En evaluering utført av konsulentfirmaet Oxford Research i 2019, «JEEP II – utredning og evaluering av reaktorens nytteverdi» [2], konkluderte blant annet med: «Utrede muligheten for å etablere en lineærakselerator for produksjon av nøytroner». Det er dermed håp om fortsatt produksjon av nøytroner på norsk jord hvis det er forskningspolitisk vilje for det.

Den første tiden

Det var spesielt tre fagområder som det ble fokusert på i den første tiden: isotopproduksjon, kjernefysikk og faststoffysikk. På det første området skrev avisen Nationen i et førstesideoppslag den 1. august 1951: «Radioaktiv isotop produsert i Norge for første gang. Ved den nye uranmilen på Kjeller». Lengre ned i artikkelen ble det presisert at isotopen ble «produsert i Uranreaktoren på Kjeller, under ledelse av Gunnar Randers og hans stab av unge vitenskapsmenn og teknikere.» Dette banet vei for en utstrakt bruk av isotoper innenfor medisinske og industrielle områder med utvikling av sterke miljøer ved IFA/IFE helt opp til våre dager.

På det kjernefysiske området ble det gjort en rekke eksperimenter på nøytron-innfangningsreaksjoner og på studier av fisjonsprosesser, som har satt spor etter seg. Den største innsatsen kom imidlertid på nøytronspredning fra faste stoff og etter hvert studier av molekylbevegelser i polymerer og flytende materialer utført av Fysikkavdelingen ved IFA ledet av Tormod Riste.

Med en reaktor så tidlig som i 1951 fikk Norge ved Kjeller-miljøet et forsprang på flere år på de fleste andre land, slik at en snart greidde å sette sitt navn på verdenskartet. Og her var utgangspunktet det beste; ja, kanskje har norske fysikere aldri hatt så heldig utgangsposisjon: Med reaktoren JEEP I hadde IFA en nøytronkilde på høyde



Figur 2. JEEP I åpnet i 1951.

med de aller fleste i 1951. I USA fantes tre reaktorer med omtrent samme styrke, i Argonne, Brookhaven og Oak Ridge. Frankrike og England hadde óg hver sin reaktor i samme klasse. Det var bare ved Chalk River i Canada en hadde en reaktor som var vesentlig sterkere. Etter hvert fikk disse landene reaktorer som i styrke langt overgikk den norske JEEP II, men med den gode starten på IFA var det til stor nytte for å få innpass til de best anleggene ute i mange år. Under et opphold ved Oak Ridge på 1960-tallet deltok Tormod Riste i et klassisk studium i bruken av polariserte nøytroner som analyseverktøy for å skille ulike spredningsfenomener. Den banebrytende betydningen av dette arbeidet kan spores enn i dag. Knappt noen rapport om oppgradering av nøytronkilder unnlatte å nevne behovet for polariserte nøytroner.

Mot slutten av 1960-tallet kom det et nytt gjennombrudd innenfor metodeutvikling av nøytronspredning på Fysikkavdelingen da Tormod Riste utviklet bruk av grafitt for å filtrere ut et smalt bølglengdeområde, såkalte *monokromatorer*, som i ettertid ble brukt av alle nøytronspredere over hele verden. De viste fordelene ved å benytte flate krystaller av pyrolytisk grafitt som monokromatorer. Metoden ble ytterligere forbedret ved at monokromatoren ble presset til en krum form. Det kan nevnes at Nobelprisen i fysikk 1994 ble tildelt «for banebrytende bidrag til utvikling av nøytronspredningsteknikker for studier av kondensert stoff» med halvparten av prisen til Bertram Brockhouse «for utvikling av nøytronspektroskopi» og med halvparten til Clifford Shull «for utvikling av nøytrondiffraksjonsteknikken» (omtalt i FFV 80/4 (2018) s. 104–107). Det kan hevdes at det ikke

hadde vært urimelig om Tormod Riste kunne ha delt denne prisen med Brockhouse og Shull ut fra de tunge bidrag han ga til utvikling av nøytronspektroskopi. Umiddelbart etter Nobelprisutdelingen i Stockholm dro Shull og besøkte sin mangeårige kollega Riste på IFE (figur 5).

Hva er viktig og spesielt med nøytroner i materialforskning?

Viktigheten og suksessen med nøytronspredning og metodens fortsatte store betydning er et resultat av ulike unike egenskaper til nøytroner. I motsetning til røntgen- og elektrondiffraksjon vil nøytroner, som er elektrisk nøytrale, passere uhindret gjennom «elektronskyene» og vekselvirke med selve atomkjernen. Dette kan fremskaffe informasjon om faste stoffer og væsker dypt inn i materialene, og ikke bare overflatestrukturer. I tillegg, fordi nøytroner spres både av kjernene og uparede elektroner i stoffet, vil de gi informasjon om både atomære- og magnetiske strukturer.

Nøytroner produsert i reaktorer kan bli modertert til å være såkalt termiske, med energier som tilsvarer vibrerende- eller diffunderende atomer i faste stoff. Derfor kan nøytroner ikke bare bestemme likevekstposisjonene til atomene i faste stoff, men også tidsvariable strukturforandringer. Fordi nøytronspredningsevnen til atomkjerner varierer ganske betydelig med atomnummer, kan nøytroner skille mellom nærliggende grunnstoffer (i det periodiske systemet) og kan lett identifisere det letteste grunnstoffet, hydrogen, selv ved tilstedeværelsen av tyngre grunnstoffer. Denne siste egenskapen gjør at nøytroner er et kraftig verktøy til å utforske biologiske molekyler og syn-



Figur 3. JEEP II ferdig i 1966. Viser vernebygningen. (Foto: Mona L. Ramstad, IFE)

tetiske polymer, som begge inneholder betydelige mengder hydrogen. Hydrogenatomene har ikke tilstrekkelig elektrontetthet til å registreres med røntgenkristallografi. Det er også mulig å benytte nøytroner til å se forskjell på bestemte hydrogenposisjoner i molekyler ved å erstatte hydrogen med isotopen døyterium, siden de to isotopene sprer nøytroner på forskjellig måter.

En kan trygt si at en stor del av det konseptuelle og teoretiske fundamentet for nyere forståelse av faste stoff hadde vært ufullstendig og ikke bevist uten bruk av nøytroner. Internasjonalt er det en erkjennelse av at nøytrondiffraksjon er et helt vesentlig verktøy for å forstå materialer på mikroskopisk nivå med et økende antall anvendelser innenfor energi, miljø og helse.

Et europeisk nøytronanlegg, European Spallation Source (ESS), er under bygging i Lund i Sverige og forventes å stå ferdig i 2025. ESS vil bli en av verdens kraftigste nøytronkilder og et senter for europeisk forskning på nye materialer innenfor områdene nevnt ovenfor. For å sikre at Norge skal få fullt utbytte av ESS må kunnskap om nøytroner og nøytronspredning opprettholdes her i landet. IFE har gjennom ulike prosjekter bidratt med utvikling av instrumenter og kontrollrom ved ESS-anlegget, og står via Forskningsrådet for en stor andel av Norges egenfinansiering, såkalt «in-kind» bidrag inn i ESS.

Historisk blikk på nøytronspredning på Kjeller

Kjeller fikk en god start på 1960-tallet ved studier av magnetiske materialer. Statistiske og dynamiske fenomen var fremdeles upløyd mark. De aller første publikasjonene på kritiske fenomen som faseoverganger og eksitasjoner i både anti- og ferrimagnetiske stoff kom fra Kjeller. Etter det kom det tilsvarende arbeid på ferromagnetiske stoff.

Det er interessant å se hva som ble lagt merke til og sitert ute i verden når det gjaldt resultater



Figur 4. JEEP II inne i vernebygningen. Reaktorblokk og instrumentering. (Foto: IFE)

fra nøytronspredningen på Kjeller de første 50 årene. I 1995 utga American Institute of Physics et omfattende trebindsverk, *Twentieth century physics*, på over to tusen sider (figur 6). Av de ca. 2500 navn som er listet, kommer fem fra Norge med forskningsresultater utført i Norge. Av disse er det tre fra Fysikkavdelingen på IFE: Tormod Riste, Kaare Otnes og Emil Samuelsen der det henvises til arbeid knyttet til JEEP II reaktoren. Ett arbeid omhandlet det såkalte «central peak»-fenomenet [3], det andre av såkalt «løpende spinnbølger» [4], og det tredje den første eksperimentelle verifikasjonen av den berømte eksakte løsningen av faseovergangen i to-dimensjonale Ising ferromagneter, utledet av nobelprisvinner Lars Onsager [5]. De to andre fysikere fra Norge som ble funnet verdig til å bli inkludert var Kristian Birkeland og Carl Størmer med forskning i forbindelse med nordlys i begynnelsen av forrige århundre.

Fysikkavdelingen fikk også en god start på utvikling av nye materialer for hydrogenlagring, såkalte hydrider. Utviklingen av disse materialene, som mye senere er blitt benyttet i hybridbiler, ble for en stor del startet i Fysikkavdelingen på midten av 1950-tallet. De aller første nøytronspredningsmålingene i verden på opptak av hydrogen i metaller ble utført i JEEP I allerede i 1955 [6]. IFA arrangerte også den første internasjonale konferansen på hydrogenlagringsmaterialer i 1977 [7].



Figur 5. Clifford Shull (venstre) og Tormod Riste på IFE i 1994.

På bakgrunn av disse lange tradisjonene ble IFE etter hvert internasjonalt ledende med forskning og utvikling av teknologi rettet mot energi- og kostnadseffektiv anvendelse av hydrogen som energibærer. Potensialet i fremtidens «hydrogen-samfunn» er formidabelt og Norge ligger således godt an takket være pionerarbeidene med bruk av JEEP I og i de senere år med JEEP II.

Reaktorene på Kjeller har vært basis for en betydelig produksjon av norske forskningsresultater på et internasjonalt nivå på mange områder og har gitt forskere fra andre land en grunn til å komme til Norge. Det blir en utfordring å videreføre denne kompetansen etter nedleggelsen av JEEP II både for å utnytte ESS maksimalt og å muliggjøre internasjonalt samarbeid som tidligere.

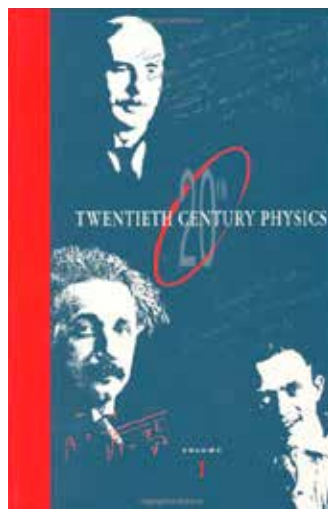
Geilo-skolene

Fra 1968 hadde Randers to års permisjon fra IFA for å kunne arbeide innen NATO med ansvar for samarbeid mellom NATO-landene innen forskning og vitenskap. Dette førte til opprettelsen av såkalte «NATO Advanced Study Institutes» [1]. Han informerte Tormod Riste om denne nye muligheten og i 1971 startet så Riste en serie med slike «Institutes» på temaer i tilknytning til faseoverganger med utgangspunkt i forskningen rundt JEEP II. Disse har vært avholdt på Geilo hvert annet år siden og blitt internasjonalt kjent som «The Geilo Schools» (figur 7). Disse «skolene» satte på mange måter norsk faststoff-fysikk på verdenskartet, og som Riste en gang uttrykte det: «Oslo er ikke akkurat på veien fra et sted til et annet, så for at du skal få gode forskere til å komme på besøk, må du gi dem en grunn». Og det var akkurat det han gjorde. Samtidig hadde han en enestående evne til å velge tidsriktige temaer for «skolene», ofte før temaene var generelt akseptert.

Gjennom årene har «skolene» samlet over 1500 deltagere fra 20–30 land. Hele fem av deltagerne har seinere fått Nobelprisen. Perovskitter var et viktig tema på de første Geilo-skolene, 1971, 1973, 1975 og 1977. Fysikkavdelingen på IFA ledet an i grunnforskningen på dette feltet. Diskusjonene på Geilo, spesielt mellom Tormod Riste, Harry Thomas og Alex Müller, som deltok på alle



Figur 7. Geilo-skolene på Bardøla Hotel i 50 år.



Figur 6. Viktigste arbeider i fysikk 1900–2000: *Twentieth century physics* edited by L.M. Brown, A. Pais, and B. Pippard (IoP, AIP, 1995)

Geilo-skolene i denne tiden, førte til at Müller fikk laget de såkalte høy-temperatur supralederne som resulterte i hans Nobelpris i 1987. Med-vinneren Georg Bednorz ble ansatt av Müller og arbeidet med ham på IBM, men det var Müller som kom med ideen. Grunnlaget ble for en stor del lagt på Geilo og aktivitetene hos deltagerne der.

Det foreligger «Proceedings» fra alle Geilo-skolene (figur 8). Disse representerer viktig dokumentasjon av tidsriktige temaer for «skolene» og illustrerer også hvor lang tid det tar fra grunnforskning til anvendelser. For eksempel, de nevnte høy-temperatur supralede perovskittene anvendes nå i vitenskapelige og industrielle magneter, inkludert NMR- og MR-systemer. Perovskitter er i dag også viktige materialer brukt i solceller for å øke virkningsgraden, ca. 50 år etter at de var tema på Geilo-skolene.

Neste års Geilo-skole i 2021 vil være den 26. i rekken og markere et 50-års jubileum.

Quo vadis nøytroner i Norge?

Det er et paradoks at Norge nå har «nøytrontørke». Norge var tross alt det første land i Nord-Europa og sjette land i verden som greidde å «produsere» nøytroner i en reaktor allerede i 1951. Tormod Riste ledet en arbeidsgruppe i regi av OECD som kom med en rapport om «Neutron Beams and Synchrotron Radiation Sources» i 1993 [8], der det ble varslet om en mulig kommende «nøytrontørke» fremover mot år 2020. Det er akkurat det som er



Figur 8. «Proceedings» fra alle Geilo-skolene til nå.

tilfelle nå. Tre europeiske forskningsreaktorer, som har vært sentrale for tiårene med suksess i det europeiske nøytronlandskapet, ble lagt ned i 2019: Orphée, brukt av Laboratoire Léon Brillouin (LLB) nær Paris, BER II ved Helmholtz-Zentrum Berlin, og JEEP II. Hver av disse reaktorene opererte som nasjonale anlegg som primært betjente forskere i Frankrike, Tyskland og Norge, men var også vert for et stort antall internasjonale forskere gjennom transnasjonale programmer.

Det var ulike grunner til at disse reaktorene ble stengt. Hvorfor ble så JEEP II besluttet stengt i en tid da lett tilgang på nøytroner i Norge ville være viktigere enn noen gang for å få full utnyttelse av ESS (figur 9)? I styrevedtaket står det: «Vesentlige drifts- og sikkerhetssystemer må gjennomgå omfattende reparasjoner» og dette ble altså for dyrt til å kunne bæres av IFE uten en stor økning i statlige midler. Forut for dette ble anleggene tilknyttet JEEP II-reaktoren i 2016 anerkjent som nasjonal forskningsinfrastruktur for nøytronforskning gjennom etableringen av forskningssenteret NcNeutron, Norwegian Center for Neutron Research. NcNeutron ble etablert i partnerskap med Universitetet i Oslo, Universitetet i Stavanger, SINTEF og NTNU. Etter stengningen av JEEP II er situasjonen rundt NcNeutron en helt annen og fremtiden er usikker. Det forhandles om mulige løsninger for å etablere sentrale deler av instrumenteringen i NcNeutron ved et annet europeiske nøytronanlegg.

Det synes imidlertid avgjørende viktig for Norge på sikt å fortsatt kunne forankre sin stilling i nøytronvitenskap med en nøytronkilde i Norge. Dette kan realiseres ved en såkalt aksele-tordrevet nøytronkilde, og Oxford-rapporten [2] anbefaler å utrede muligheten for å etablere en

slik enhet på Kjeller innenfor Forskningsrådets «Forskningsinfrastruktur» programmer. Tiden vil vise om det er politisk og forskningspolitisk vilje til å realisere dette.

Uansett hva fremtiden vil bringe for norske brukere av nøytronstråler, er det et faktum at nøytronstråler skaffer unik informasjon som ikke kan frambringes med noen annen metode. Nøytroner vil dermed fortsatt være nødvendig. ■

Referanser

1. O. Steinsvoll. «Gunnar Randers». *Norsk Fysisk Selskap*, Verdens Fysikkår (2005). www.norskfysikk.no/nfs/arkiv/wyp05/randers.php.
2. E.S. Hauge. «JEEP II. Utredning og evaluering av reaktorens nytteverdi». Oxford Research AS (2019). <https://ife.no/wp-content/uploads/2019/08/190811-JEEP-II-Utredning-og-evaluering-Rapport-final.pdf>.
3. T. Riste, E.J. Samuelsen og K. Otnes. «Critical Neutron Scattering from SrTiO₃». *Structural Phase Transitions and Soft Modes* (E.J. Samuelsen, E. Andersen og J. Feder, red.), Universitetsforlaget, Oslo (1971), s. 395.
4. T. Riste og A. Wanic. «A neutron diffraction study of spin fluctuations in α-Fe₂O₃». *J. Phys. Chem. Solids* 17 (1961) s. 318.
5. E.J. Samuelsen. «Experimental Study of the Two-Dimensional Ising Antiferromagnet Rb₂CoF₄». *Phys. Rev. Lett.* 31, no. 15 (1973) s. 936.
6. J.A. Goedkoop og A.F. Andresen. «The Crystal Structure of Copper Hydride». *Acta Cryst.* 8 (1955) s. 118.
7. F. Andresen og A.J. Maeland (red.). «Proc. Int. Symp. On Hydrides for Energy Storage, Geilo, 1977». Pergamon, Oxford (1978).
8. T. Riste. «Neutron Beams and Synchrotron Radiation Sources». OECD Meagascience Forum (1994).

Figur 9. En digital modell av European Spallation Source (ESS) i Lund, Sverige, som viser ESS i forgrunnen og synkrotronen MAX IV som den runde bygningen i bakgrunnen samt det forventede utviklingsprosjektet Science Village. ESS forventes å ha de første brukere i 2025. (Kilde: ESS)



Elektrisk supraleiing ved romtemperatur

Heilt sida supraleiing blei påvist ved temperaturar under 23 K i 1911, og særleg etter at «høgtemperatur-supraleiing» for opptil 165 K temperatur blei funnen etter 1986, har det eksistert ein draum om stabile materiale som kan vere supraleiande ved (og helst over) romtemperaturar. Høgste dokumenterte overgangstemperatur til no er 270 K, altså omlag frysepunktet for vatn. Men materiala tilhører ein heilt annan klasse enn det mange hadde tenkt seg; dei er metallhydrid, og dei krev høge trykk.

Emil J. Samuelsen Institutt for fysikk, NTNU

Supraleiing

Mekanismen for supraleiing (elektrisk leiing utan motstand) er ikkje enno godt forstått i eitt og alt. Men for den kategorien som blir kalla «konvensjonelle supraleiarar» eksisterer ein akseptert modell kalla BCS-modellen, etter Bardeen, Cooper og Schrieffer som fekk fysikknobelprisen i 1972. Modellen seier at der opptrer *tiltrekkande* vekselverknad mellom elektron så det blir danna *elektron-par* kalla Cooper-par, og at systemet av slike elektron-par kan kondensere og flyte utan motstand gjennom materialet. Ei kjelde for tiltrekkinga er meint å vere kopling mellom elektronisk tilstand og atomvibrasjonar i stoffet (*elektron-fonon-vekselverknad*). Som forklart seinare i artikkelen krev høge verdjar for overgangstemperaturen T_c at vibrasjonsmodane som koplar til elektronisk tilstand har høg frekvens. Sjå elles nestsiste avsnitt i artikkelen.

I 1968 skreiv N. Ashcroft ein artikkel om hydrogen under trykk, og venta at det ikkje berre ville skje ein overgang til metallisk hydrogen, men også at materialet kunne bli supraleiande. Etter 2010 er fleire arbeid publiserte om forsøk på å framstille metallisk hydrogen, men resultatata har til no ikkje vore overtydande. Interesse har dei seinare åra vendt seg mot andre hydrogenhaldige materiale, og for tida er det enkelte metall-hydrid som er i fokus.

Supraleiing i H_2S under trykk

I 2015 kom ein særns interessant publikasjon [1]: Forskarar ved Max-Planck-Institut i Mainz hevda å ha registrert at H_2S under trykk på opptil 250 GPa var supraleiande med overgangstemperatur T_c på opptil 203 K (1 GPa (gigapascal) = 10^9 N/m² \approx 10^5 atmosfærars trykk). Det blei nytta trykkceller av diamant, og prøvestorleiken var på berre 25 μ m.

Supraleiinga blei påvist ved magnetisk moment og motstandsmålingar og ved at magnetfelt undertrykker supraleiinga, (kalla Meissner-effekt). Også døytererte prøver blei undersøkt, og viste reduserte verdjar for T_c .

Teoriar for romtemperatur-supraleiing i metallhydrid

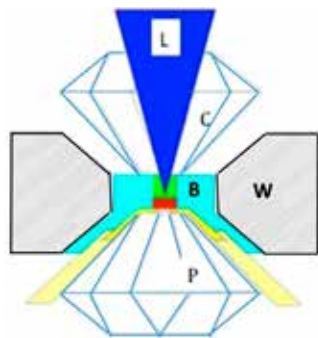
Tidleg på 2000-tallet var det ei veksande interesse for supraleiing under trykk. Til dømes blei det vist i 2002 at jamvel metallisk litium Li blir supraleiande, med $T_c = 16$ K for trykk over 40 GPa. Det vaks fram ein betydeleg teoretisk innsats på supraleiing under trykk, med datasimuleringar basert på densitetsfunksjonal-teori DFT (Density Functional Theory). (DFT er ein mykje brukt framgangsmåte for kvantemekaniske berekningar av romleg elektron-densitetsfordeling og energifordeling for molekyl og faste stoff. Det gir informasjon om struktur, eventuell leiingsevne og magnetiske forhold.) Spesielt var interessa stor for hydrid-materiale med høgt H-innhald, og i 2013 og utover blei mange materiale i denne kategorien funne å kunne vere potensielle supraleiarar ved temperaturar opp mot og jamvel over romtemperaturar. Estimering av overgangstemperatur baserer seg på elektron-phonon-vekselverknad, og må utførast i eigne berekningar basert på supraleiingsmodellar som BCS- og/eller Eliashberg-formuleringar [2].

Metall-multihydrid under trykk

Teoretiske berekningar for ei rekke hydrid viste at rett mange av dei kunne vere potensielle supraleiarar under trykk. Vi skal sjå nærare på ei interessant gruppe, nemleg hydrid av lantan, La. Teorien føreså at LaH_3 skulle kunne vere supraleiande med $T_c \approx 22$ K ved trykk 11 GPa.

Vi skal gå meir i detalj om lantan-hydrid LaH_x med $x \approx 10$. Teoretiske T_c -verdjar av storleik 274–286 K ved 210 GPa trykk for LaH_{10} er blitt utleidd teoretisk [3]. Også enkelte *yttriumhydrid* YH_n var studert med DFT-berekningar.

I det følgjande skal eg drøfte eit par sentrale eksperimentelle arbeid på lantanhydrid under høge trykk, der to forskingsgrupper publiserte bortimot identiske resultat i løpet av siste året, [4] og [5]. For [4] var The George Washington University, Washington DC som var hovudbase, og [5] hadde Max-Planck-Institut für Chemie i Mainz som sin hovudbase. For begge arbeida gjeld at dei opererte med små materielmengder plasserte i trykkceller av diamant. ▶



Figur 1. Reaksjonskammer og trykkcelle. Raudt: Lantanmetall. Gult: Platina-elektrodar. Grønt: NH_3BH_3 (hydrogenkjelde). Sjøgrønt (B): isolerande bornitrid BN. Grått (W): Wolfram-pakning. (C): Diamant-trykkcelledel. (P): Diamant-trykkcelledel, blir pressa oppover. Blått (L): Laserlys for oppvarming (gjennom senterhol i C), [4].

Prøvene var forsynte med fire elektrodar for motstandsmålingar, og med vindauge for å gjere diffraksjonsmålingar *in situ*.

Begge forskingsgruppene framstilte La-hydridet i trykkcellene ved oppvarming med laserlys (sjå figur 1 med forklarande figurtekst). Dimensjonane var små, prøvetjukkuleik 5–10 μm , utstrekning 50–100 μm , og laserfokus omlag 30 μm . Ved trykk over 175 GPa og temperaturar på 1000–1500 K blei det danna LaH_{10} .

Røntgenmikrodiffraksjon med synkrotronrøntgen viste danning av ein flatesentrert kubisk fase, i tillegg til signalet frå ureagert La-metall, sjå figur 2, som viser synkrotronrøntgenopptak med bølglengd 0,4066 Å ved tre ulike temperaturar. (Sjå også strukturbildet lenger framme i artikkelen). Blå-markerte toppar er signal frå platinaelektrodane, og dei raud-markerte frå LaH_{10} . For 300 K er modelltilpassing vist. Ein ser at mønstret endrar seg lite over dette 150 K temperaturspenntet.

Faseovergangen mellom normal og supraleiande tilstand er vist i figur 3 og figur 4. Målingane av Washington-forskningsgruppa i figur 3 er tatt

med trykk på 188 GPa. Dei viser hysteres mellom oppvarming og nedkjøling. Nedkjølingsknekken startar ved 260 K, mens oppvarmingsknekken er ved om lag 245 K. Mange ulike prøver blei undersøkt, med nokon variasjon av resultatane for ulike prøver. Forskarane sjølve hevdar at dei registrerte supraleiing opp til 260 K. Variasjon av T_C som funksjon av trykket var ikkje systematisk utført.

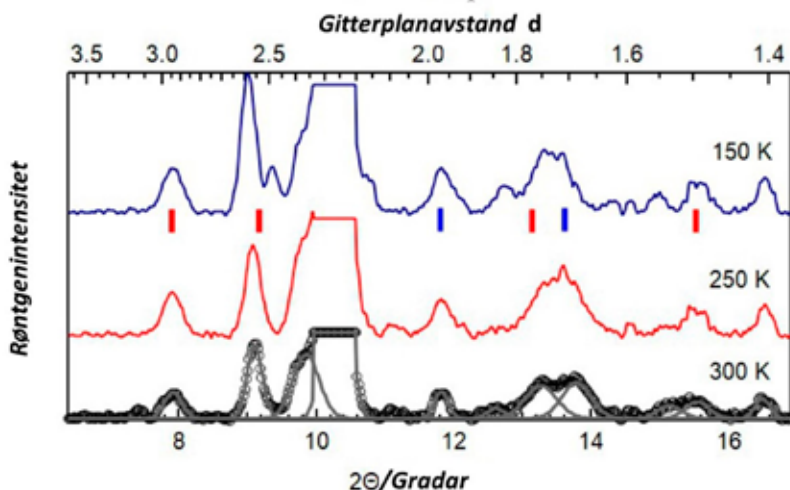
Forskarar frå Max-Planck-gruppa i Mainz har tidlegare arbeid med trykk-effektar på H_2 med tanke på å leite etter metallisk hydrogen under trykk, eventuelt også supraleiande hydrogen.

Det aktuelle arbeidet med LaH_{10} blei også utført ved syntese i kvarts-trykkcelle, men her blei H_2 -gass nytta som hydrogenkjelde og sett under trykk i kontakt med metallisk La, fulgt av oppvarming med laserstråle til 1500 K. Prøva blei studert med 4-punkts motstandsmålingar, og verifisering av supraleiinga blei gjort med å sjekke *Meissner-effekt* med påtrykt ytre magnetfelt (figur 4). (Begrepet «Meissner-effekten» er ein effekt oppdaga av tyskarane W. Meissner og R. Ochsenfeld i 1933, og inneber at ytre magnetfelt kan påverke og jamvel heilt undertrykke supraleiing.) Det blei også gjort studie av materiale der hydrogen ^1H var bytta ut med døyterium ^2D , noko som viste ein klar isotopeffekt på T_C , med betydeleg lågare verdi for døyterert prøve.

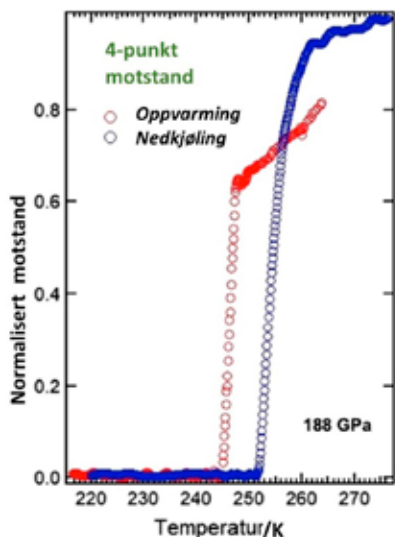
Krystallstruktur av supraleiarmateriale LaH_{10}

Det er ikkje mulig på grunnlag av røntgendigram å få eit fullgodt bilde av krystallstrukturen, fordi røntgen blir lite spreidd av lette grunnstoff som hydrogen. Likevel har forskarar i begge gruppene danna seg eit bilde av strukturen, og her har nok resultatane av DFT-berekningar spela ei betydeleg rolle.

Diffraksjonsmønster for LaH_{10} som i figur 2 blei observert under trykk 150 GPa også av Max-Planck-gruppa. Det er i godt samsvar med at gitteret er av typen «flatesentrert kubisk» (sjå



Figur 2. Røntgenopptak ved tre temperaturar ved 188 GPa trykk, med røntgenfokus 5 $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$. For 300 K er vist kurvetilpassing. Stort signal ved 10,2 gradar er frå ureagert lantanmetall, [4].



Figur 3. Måleresultat av elektrisk motstand som viser overgang frå vanleg motstand ved høge temperaturar og supraleiing ved låge temperaturar for ei LaH₁₀-prøve ved 188 GPa trykk. Kurvene viser hysteresis på om lag 7 K mellom oppvarming og nedkjøling, [4].

figur 5 der lantan-atomene er plasserte i hjørna av ein kubus, og i tillegg sentrert midt på sideflatene). Det er i hovudsak La som spreier røngtenstrålen, og ein ser at La er plassert i det flatesentrerte gitteret, som har gitterparameter 5,126 Å, svarande til La-La-avstand 3,625 Å. I metallisk La med fcc-struktur og ved atmosfæretrykk er La-La-avstanden 3,74 Å.

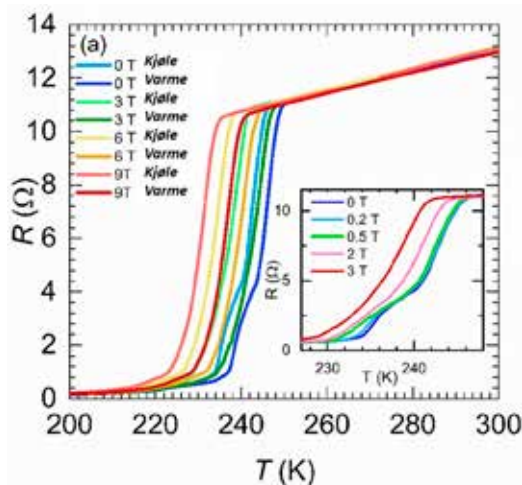
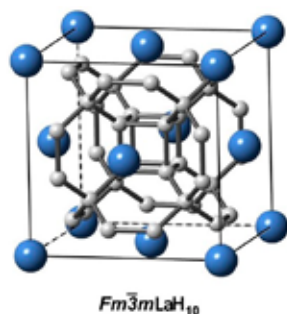
DFT-berekingane antyder at hydrogenatomene er plasserte som eit klatrat-nettverk mellom La-atomene. H-H-avstandane er kring 1,0 Å og 1,2 Å (ved låge trykk), same storleik som i molekylært H₂. Figur 5 og 6 viser illustrasjon av ei repetisjons-celle og eit hydrid-klatratet.

Vilkår for høge overgangstemperaturar T_C

Metallisk lantan er supraleiande, med T_C = 4,9 K og 6,0 K for kubisk og heksagonal struktur. I LaH₁₀ fungerer La-atomene som elektron-donorar til H-klatratet, og det gir H-atomene ei lita negativ ladning. Etter teorien er det H-H-vibrasjonar i form av «optiske» gittersvingingar (fonon) som er opphavet til elektron-fononkoplinga i hydridet.

Vidare, etter BCS-teorien, der elektron-pairing skjer ved hjelp av elektron-fononkopling, er

Figur 5. Ei kubisk flatesentrert repetisjons-celle med nettverk av hydrid-klatrat rundt kvart La-atom som vist i figur 6. Blåe kuler: La; små grå kuler: H [6].



Figur 4. Max-Planck-gruppen sine målinger av temperaturvariasjonen av elektrisk motstand i LaH₁₀ under påvirkning av ytre magnetfelt (Meissner-effekt) som bevis på at overgangen gjeld supraleiing. Overgangen er ved ulike temperaturer ved oppvarming og ved kjøling, [5].

eit tilnærma uttrykk for overgangstemperaturen:

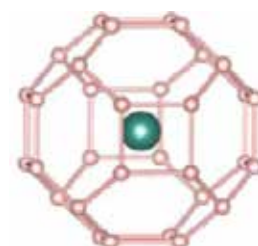
$$k_B T_C = 1,14 \hbar \omega_d e^{-1/(N(0) \cdot V)}$$

Sentralt her er proporsjonaliteten med fonon-energien $\hbar \omega_d$ (somtid kalla Debye-energien, som representerer fonon som deltar elektron-fononkoplinga. For metall-hydrid som LaH₂ er typiske verdier for $\hbar \omega_d$ av storleik 0,15 eV). N(0) er elektrontilstands-tettleik (per volum og energi-eining) ved absolutt nulltemperatur, og V representerer elektron-fonon-verkselverknadsenergi. Høge verdier for kvar av desse parametrene bidreg til å gi høge overgangstemperaturar. k_B er Boltzmann-konstanten. Generelt skal stoff med lette atom kunne gi høgaste verdier for T_C.

Framtida for romtemperatur-supraleiarar?

Draumen om supraleiing ved temperaturar over romtemperatur er ikkje over, og resultatene for desse multihydrida har gitt mange voner om at det må late seg realisere. Men det er liten grunn til å tru at framtida sine supraleiande leiingar (der kjølemedium er overflødig), vil bestå av LaH₁₀ eller nærskylte materiale. Enno er ikkje 20°C passert, ▶

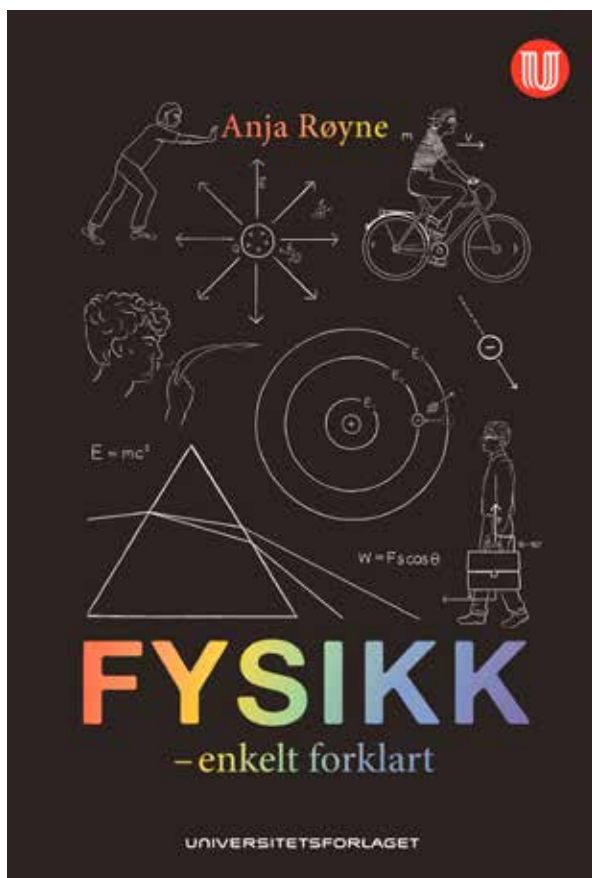
Figur 6. Klatrat av 32 H-atomer kring kvart La-atom, fire kvadratar og tolv sekskantar. H-H-avstandane er ikkje alle like, [6].



og prøvene har førebels dimensjonar av mikrometerstorleik. Den største ulempen er at det trengst trykk i 200 GPa- området, det vil seie to millionar atmosfærars trykk, noko som er ugjerleg å realisere for leidningar av lengder målt i nokre meter eller kilometer. Det eigenlege gjennombrøtet for romtemperaturstraum utan motstand må vi framleis vente på. ■

Referansar

1. A.P. Drozdov og medarbeidarar. «Conventional superconductivity at 203 K at high pressure». *Nature* 525 (2015) s. 73–76.
2. T. Bi, N. Zarifi, T. Terpstra, E. Zurek. «The search for superconductivity in high pressure hydrides». ArXiv: 1806.00163 (2018).
3. H. Liu, I. I. Naumov, R. Hoffmann, N.W. Ashcroft, R.J. Hemley. «Potential high T_c superconducting La- and Y-hydrides at high pressure». *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 114 (2017) s. 6990–6995.
4. M. Somayazulu og medarbeidarar. «Evidence for superconductivity above 260 K in lanthanum superhydride at megabar pressure». *Phys. Rev. Letters* 122 (2019) s. 027001–1/027001-6.
5. A.P. Drozdov og medarbeidarar. «Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressure». ArXiv: 1812.01561 (Februar 2020); *Nature* 569 (2019) s. 528–531.
6. T. Bi og medarbeidarar. «The search for superconductivity in high pressure hydrides». ArXiv:1806.00163 (2018).



Bokanmeldelse:

Fysikk – enkelt forklart **Anja Røyne**

Universitetsforlaget, 2020
156 sider
Pris: 299 kr.

Boka bruker enkle regneoppgaver i fysikk til å forklare sentrale temaer i grunnleggende fysikk. Den starter med kinematikk og beveger seg videre til dynamikk, elektromagnetisme, optikk og litt atomfysikk og kjernefysikk. Forfatteren gir tydelige forklaringer av alle symboler i de sentrale likningene. Dette er et fint pedagogisk grep som jeg ikke har sett tidligere på den visuelle måten det er gjort her.

For en leser av boka er det litt uklart hvem denne boka er skrevet for. Men på nettsidene til forlaget står følgende om boka: «Boka fungerer både som støttelitteratur på videregående skole og universitetsnivå og som repetisjon for deg som har tatt fysikk tidligere og ønsker å friske opp kunnskapen.» Jeg savner et forord hvor dette kunne ha vært nevnt.

De fleste eksemplene er standardeksempler. Men i blant kommer noe som er litt mer utenfor allfarvei i fysikkundervisningen. Det første slikt eksempel finnes i avsnitt 2.8 med tittelen: Hvorfor glir tunge skiløpere bedre enn lette? Dessverre har fremstillingen her noen svakheter. Hun innleder med å skrive om da hun gikk på ski med sin mor,

og senere med sine barn. Så her er det tydelig at det dreier seg om sakte fart – ikke utforkjøring i 100 km i timen.

Etter denne innledningen kommer bevegelseslikningen med et ledd som representerer luftmotstand. Hun bruker et ledd proporsjonalt med hastigheten, $F_L = mk_1v$. Det er ikke oppgitt noen verdi for k_1 .

Vi kan finne størrelsesorden av k_1 ved å bruke Stokes lov for friksjonskraften som virker på en kule som beveger seg så langsomt gjennom luft at det ikke oppstår turbulent bevegelse av luften bak kula, $F_L = 6\pi r\eta v$, dvs. $k_1 = 6\pi r\eta/m$, der r er kulas radius, og η er luftens viskositet. La oss velge en kule med radius $r = 0,5$ m og masse 50 kg. Viskositeten til luft er $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$ kg/ms. Dette gir $k_1 = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

Det vanlige når det gjelder luftmotstand, er et ledd proporsjonalt med kvadratet av hastigheten, $F_{LK} = mk_2v^2$. Men ved små hastigheter kan Røynes tilnærming brukes. La oss beregne hva som ligger i uttrykket «små hastigheter». Det lineære og kvadratiske leddet for luftmotstanden er like store ved en hastighet $v_1 = k_1/k_2$. Ved mindre hastighet dominerer det lineære leddet og ved større det kvadratiske.

For å bestemme k_2 ser vi på en fallskjermhopper i fritt fall før skjermen er slått ut. En person på 80 kg har en terminalhastighet på rundt 50 m/s. Ved likevekt mellom tyngde og luftmotstand med så stor hastighet, er det tilstrekkelig å bruke det kvadratiske leddet for luftmotstanden. Det gir $mg = mk_2v^2$, dvs. $k_2 = g/v^2 = 0,004 \text{ m}^{-1}$.

Vi kan nå beregne hastighetene der de to uttrykkene for luftmotstanden er like store. Innsetting av verdiene av k_1 og k_2 i $v_1 = k_1/k_2$ gir at i luft er det lineære leddet for luftmotstanden lik det kvadratiske leddet ved en hastighet $v_1 = 0,025 \text{ m/s} = 90 \text{ m/t}$. Dette betyr at når det gjelder luftmotstand ved skigåing kan det lineære leddet neglisjeres.

En annen sak er at luftmotstanden er såpass liten ved hastighet på rundt 10 km/t at forskjellen i friksjonskoeffisient mellom skiene og snøen for en tung og en lett skiløper trolig har større betydning for at den tunge løperen glir bedre enn den lette.

Boken fortsetter med mange eksempler som er behandlet pedagogisk på en god måte. Men på side 100 dukker en ny feil opp. Det dreier seg om bruken av begrepet spenning. Røyne skriver at definisjonen på spenning er potensiell energi per ladning, og fortsetter med å skrive: «Siden spenning er definert som potensiell energi, gir det ikke mening å snakke om spenningen i ett enkelt punkt.»

Her er begrepet spenning forvekslet med potensial. Det korrekte er at potensial defineres som potensiell energi per ladning, og spenningen mellom to punkter defineres som forskjellen i potensial i de to punktene. Den siste setningen skulle altså vært: Siden spenning er definert som potensialforskjell, gir det ikke mening å snakke om spenningen i ett enkelt punkt.

Boka fortsetter nå med mange gode avsnitt som gir en god leseopplevelse. Men på side 146 opptrer en tredje feil. Røyne skriver: «En klokke i en satellitt som suser i bane rundt jorda går ørlite grann saktere enn en klokke nede på jorda. Det må vi ta hensyn til når vi bruker satellitter til å finne ut hvor vi befinner oss gjennom GPS-systemet.»

I en artikkel [1] publisert i FFV i 2006 ble det imidlertid vist at klokkene i GPS-satellittene går *raskere* enn klokker i ro på jordoverflaten. Årsaken til at satellittklokkene går raskere enn klokker i ro på jorda er at ifølge den generelle relativitetsteorien går klokker høyere oppe i et tyngdefelt raskere enn klokker lavere nede. GPS-satellittene beveger seg med en hastighet på $4 \cdot 10^3$ m/s rundt jorda omtrent 20 000 km over jordoverflaten. Det betyr at vi her har to konkurrerende effekter som bestemmer hvor raskt satellittklokkene går. Den hastighetsavhengige tidsforlengelsen fra den spesielle relativitetsteorien bidrar til at satellittklokkene går langsommere, mens den gravitasjonelle tidsforlengelsen fra den generelle relativitetsteorien gjør at satellittklokkene går raskere enn klokkene på jorda. Beregninger viser at for GPS-satellittene er den gravitasjonelle effekten omtrent tre ganger større enn den hastighetsavhengige effekten [1]. Så konklusjonen er at klokkene i GPS-satellittene går raskere enn klokkene på jordas overflate.

Boka er pedagogisk og fin, men skjemmes av de tre omtalte feilene. Når man skriver bok er det vanskelig å unngå at det sniker seg inn noen feil. Men feilene her er av en slik karakter at de skulle ha vært fanget opp av forlagets faglige konsulenter slik at teksten kunne ha vært rettet opp før utgivelsen av boka.

Øyvind G. Grøn

1. Ø. Grøn. «Relativitetsteorien og GPS-systemet». *Fra Fysikkens Verden* nr. 3, s. 69–71 (2006).



Thormod E. Henriksen

(1928–2020)

Professor emeritus Thormod E. Henriksen døde 13. februar 2020 – nesten 92 år gammel. En nestor i norsk fysikk har med dette lagt inn årene for godt. Thormod ble født på Nøtterøy i 1928, fikk et dosentur ved Universitetet i Oslo i 1970, fikk professorat i 1980, var primus motor i oppbyggingen av Biofysikkmiljøet ved Fysisk institutt ved UiO, ledet Fysisk institutt ved UiO 1978–1980, ledet Norsk Fysisk Selskap i 1991–1998, fikk UiOs formidlingspris i 1998, gikk av med pensjon i 1998, og forble faglig aktiv resten av sitt liv. Sin siste artikkel fikk han antatt i *Fra Fysikkens Verden* etter at hans hjerte hadde sluttet å slå. Familie, idrett, strålingsfysikk, kreftforskning, miljøfysikk og kunnskapsformidling fylte hans liv.

Thormod Henriksen ble født og vokste opp på Nøtterøy. Etter eksamen artium ved Tønsberg Gymnas i 1948 begynte han å studere ved Universitetet i Oslo, og ble cand. real. i 1955. Hovedfagsarbeidet utførte han ved Norsk Hydros Institutt for Kreftforskning (NHIK) ved Det Norske Radiumhospitalet med Johan Baarli (en annen nestor innen strålingsfysikken) som veileder. Thormod studerte blant annet hvordan Radiumhospitalets nye 31 MeV betatron best kunne brukes i kreftbehandlingen. Han fortsatte ved Biofysisk avdeling (ved NHIK) som stipendiat i Kreftforeningen og arbeidet førte ham over til eksperimentelle studier av biomolekyler i cellene og deres respons på ioniserende stråling. En ny eksperimentell metode, Elektron Spinn Resonans (ESR)-spektroskopi, skulle bli hans viktigste arbeidsverktøy og i 1957 hadde han fullført byggingen av Nordens første ESR-spektrometer. Ved hjelp

av dette instrumentet utførte han grunnleggende studier av viktige prosesser tilknyttet strålevirkning på biomolekyler.

Thormod Henriksen disputerte for den filosofiske doktorgraden i 1963 på et arbeid om strålingsbeskyttende stoffer. Hans forskningsinnsats bidro til at både instituttet og han selv fikk vitenskapelig anerkjennelse langt utover landets grenser. I to perioder på 60-tallet gjorde han California til sitt hjem sammen med ektefelle Målfrid og deres tre barn. Stasjonert ved de store akseleratoranleggene ved University of California i Berkeley publiserte han en rekke arbeider om virkningen av tunge ioner og partikkelstråling.

Da han i 1970 fikk et nyopprettet dosentur i Biofysikk ved Fysisk institutt, Universitetet i Oslo fikk han et kommersielt ESR-spektrometer i velkomstgave, og rundt dette bygget han opp en aktiv forskningsgruppe med en stadig strøm av stipendiater, gjesteforskere og hovedfagsstudenter. Da han i etterkant av den fatale strålingsulykken ved gamma-bestrålingsanlegget på Kjeller i 1982 ved hjelp av ESR bestemte stråledosen til den forulykkede ble Henriksen den første i verden til å demonstrerte i praksis at ESR spektroskopi var en meget velegnet metode for retrospektiv katastrofedosimetri. Forskningen tok etter hvert to hovedretninger; studier av strålingsinduserte radikaler i fundamentale biomolekyler (DNA og proteiner); og studier av struktur og dynamikk til biologiske molekyler i celler. Denne aktiviteten var Thormods hovedvirke fram til midten av 1980-tallet – kun avbrutt av en periode som bestyrer ved Fysisk institutt (1978–1980) og nok et opphold i Berkeley, California i 1981–1982.

Ulykken ved atomkraftverket Tsjernobyl 26. april 1986 ble en milepæl for Thormod Hen-

riksens faglige engasjement. I kjølvannet av denne ulykken våknet hans stadig voksende engasjement for kunnskapsformidling til befolkningen generelt. Først var det ioniserende stråling og helsemessige effekter av lave doser som sto i fokus, spesielt samfunnsproblemene knyttet til ukritisk bruk av LNT modellen. LNT står for «Linear-No-Threshold» og modellen antar at enhver stråledose, uansett hvor liten den er, vil gi en økt risiko for kreft. Modellen ble utviklet på 60-tallet og bygger på en rekke antakelser og analyser som i ettertid viser seg å være beheftet med både feil og misforståelser.

Etterhvert utvidet han miljøengasjementet sitt til også å omfatte UV bestråling, ozonlag, meteorologiske forhold i atmosfæren og drivhuseffekt. Han skrev flere bøker og hefter om de nevnte miljøtemaene i samarbeide med en rekke fagfolk. Sammen med hovedfags- og doktorgradsstudenter ble det laget to store utstillinger på Teknisk Museum: «Deilig er den himmel blå» og «Vår strålende hverdag». Gjennom sine bøker og temahefter – som fortsatt er i bruk både i grunnskoleverket og ved universiteter og høyskoler – har han nådd fram til et stort og bredt publikum – også utenfor landets grenser. I 1998 ble Thormod E. Henriksen tildelt Universitetet i Oslos Formidlingspris.

I perioden 1991 til 1998 var Henriksen president i Norsk Fysisk Selskap (NFS). Han arbeidet særlig for å øke rekrutteringen og det faglige engasjement blant landets lærere for på det vis å stimulere til en økning i rekrutteringen til fysikk blant skoleelever. Faggruppen for undervisning i NFS ble styrket ved opprettelsen av Norsk Fysikkklærerforening. Han opparbeidet en genuin interesse for Norsk Fysisk Selskap og dets historikk og har i FFV skrevet om historikken til både Norsk Fysisk Selskap og til forløperen, Fysisk Selskap.

Thormod Henriksen fikk oppleve å være faglig aktiv pensjonist i over 20 år og han lå ikke på latsida. Han fortsatt sitt livs lange jakt på kunnskap om vekselvirkninger mellom stråling og levende celler, om forståelse av mekanismene som gjør at store mengder stråling er skadelig samtidig som små mengder stråling kan være virkningsløse, eller endog ha positiv virkning for levende organis-

mer, og han videreformidlet kunnskapen.

Han skrev en rekke artikler i FFV, blant annet om lungenes rensesystem i forbindelse med radon og lungekreft, om drivhuseffekten, om stråling og helse, om strålingsfysikk, og strålevirkningsmodeller. I 2009 utgav han en helt ny nettbasert versjon av boka *Radiation and Health* (325 sider) som fikk stor internasjonal oppmerksomhet. Boka som ble sist oppdatert i 2015 er fritt tilgjengelig på nettet og benyttes fortsatt som lærebok ved flere utenlandske institusjoner.

Thormod Henriksen fortsatte å være en aktiv og kritisk røst i samfunnsdebatter, og han gav aldri opp kampen for at overordnede samfunnsbeslutninger skulle være kunnskapsbaserte – spesielt de som angikk radioaktivitet, radon, UV, stråling og ozon. Han hadde en ubendig tro på at ærlig formidling av kunnskap til hele befolkningen er både viktig og nyttig.

Gjennomgående i all hans utadrettede virksomhet var hans faglige integritet, preget av dyptpløyende ærlighet og respekt for fagkunnskap.

Thormod Henriksen har i hele sitt liv vært en meget engasjert og aktiv person – og ikke bare innen faglige spørsmål. Allerede i svært ung alder viste han stor interesse for sport og friluftsliv, som utøver og aktiv tilskuer. Entusiasmen for idrett fikk også andre nyte godt av gjennom hans mange års lederverv i Tyrving og Holmen Idrettslag, og entusiastisk oppfølging av både barn og barnebarn.

Vi er mange som kan takke Thormod Henriksen for mye! Da vi som unge studenter møtte lederen av Biofysikkmiljøet på Blindern ble vi tatt imot av en hjelpsom og humorfylt entusiast med glimt i øyet. Han utstrålte omsorg og trygghet, formidlet sterk faglig integritet, inkluderte oss i det faglige fellesskapet og proppet hodene våre fulle med faglige anekdoter og all verdens sportsresultater. Våre valg under studiene og seinere i livet bærer hans avtrykk. Vi vil alltid minnes ham – i dyp respekt.

Vi takker Målfrid, barna og den øvrige familien for at vi fikk dele Thormod med dem.

*Eli Olaug Hole og Einar Sagstuen
– på vegne av mange.*



Philip Warren Anderson

(1923–2020)

En av det 20. århundrets fremste teoretiske fysikere, Nobelprisvinneren i fysikk 1977, Philip Warren Anderson, gikk bort 29. februar 2020. Han er regnet som en av grunnleggerne av moderne kondenserte mediers fysikk og har etterlatt seg svært viktige bidrag i en rekke fysikkdisipliner. En rekke fenomener i fysikk bærer i dag hans navn, slik som Anderson-lokalisering, Anderson ortogonalitets-katastrofe, Anderson-Higgs-mekanismen, Andersons teorem for superledere, i tillegg til at han utvilsomt har gitt noen av de aller viktigste bidrag til moderne teori for magnetisme.

Philip Anderson (eller «Phil», som han var kjent som) ble født i Indianapolis 13. desember 1923, og vokste i perioden 1923–1940 opp på en farm ved Urbana i delstaten Illinois, der hans far var professor i plantepatologi ved University of Illinois at Urbana Champaign. Farfaren var, med Andersons egne ord «en mislykket fundamentalist-predikant som hadde slått seg på farming». Morfaren var professor i matematikk ved Wabash College i Urbana. 17 år gammel fikk han et National Scholarship stipend som dekket alle utgifter, for å studere ved Harvard. Opprinnelig hadde han tenkt å studere matematikk, som var en av de få intellektuelle utfordringene han kunne huske fra sine skoleår. Slik gikk det ikke. Det ble fysikk i stedet, og han gikk ut med en bachelor grad med gode resultater fra Harvard i 1943, til sin egen overraskelse ifølge ham selv.

På denne tiden var anvendelser av det som ble kalt «electronic physics» svært viktig for USA's krigsinnsats mot Tyskland og Japan, og med den bakgrunn Anderson hadde ble han i 1943 sendt til United States Naval Research Lab (NRL) for å forske på radarer og bygge radarantenner.

I 1945 returnerte han til Harvard, nå for å ta

doktorgrad i fysikk. En av stjernene ved Harvard i de dager var den nyansatte professoren i partikkelfysikk, Julian Schwinger, som «alle» ville studere med. Umiddelbart etter 2. verdenskrig var partikkel-og kjernefysikk av naturlige grunner et «hot topic». Anderson valgte imidlertid annerledes, ifølge ham selv for å slippe den ukentlige fornedrelsen det var for ham å måtte stå i en lang kø utenfor Schwingers kontor for å få veiledning. Han valgte i stedet John Hasbrouk van Vleck som sin doktorgradsveileder. Anderson kjente van Vleck fra sin tid som batchelor-student ved Harvard og fra sin tid ved NRL, og det virket som van Vleck hadde tid til å tenke over hva Anderson skulle gjøre på sin doktorgrad. Van Vleck er særlig kjent for sitt betydelige bidrag til å forstå elektronstrukturen i magnetiske material, og ga også viktige bidrag til radioastronomien ved å studere absorpsjon av radarbølger i atmosfæren ved ulike bølgelengder, med andre ord «electronic physics». Andersons valg av fagfelt for sin doktorgrad må sies å ha vært helt avgjørende for utviklingen til den moderne faststoff-fysikken etter andre verdenskrig. Han har bidratt til forståelsen av faststoff-fysikk, eller «kondenserte mediers fysikk» som den mer moderne terminologien nå er, på en helt revolusjonerende måte.

Anderson valgte å arbeide inne kondenserte mediers fysikk på en tid da fysikere var iferd med å lære seg nye matematiske teknikker for å forstå kollektive fenomener i kondenserte medier. Viktige fenomener som på den tiden ikke var særlig godt forstått, var forståelsen av hvorfor noen materialer er ferromagnetiske og noen antiferromagnetiske, fenomenet superfluiditet, og ikke minst fenomenet superledning. Nye teknikker, gjerne kalt kvantefeltteorier, muliggjorde at disse vanskelige problemene etter hvert kunne takles.

Etter fullført doktorgrad ved Harvard, ble Anderson ansatt som forsker ved Bell Laboratories ved Murray Hill i New Jersey. Der kom han sammen med fysikere som John Bardeen, William Shockley, Walter Brattain, Conyers Herring, og Charles Kittel. (De tre første fikk Nobelprisen for oppfinnelsen av transistoren i 1956, og Bardeen fikk Nobelprisen i fysikk på nytt i 1972 for sin teori for superledning). Det var mens han var ved Bell Labs han gjorde arbeidene som han fikk Nobelprisen for i 1977, innen teori for magnetisme. Prisen delte han likt med John van Vleck ved Harvard og Sir Nevill Mott ved Cambridge University, for deres grunnleggende studier av elektronstrukturen til magnetiske materialer og uordnede stoffer. Omtrent samtidig som han utviklet sin teori for magnetisme og såkalt superexchange (ca. 1958) forklarte han også hvorfor elektrisk ledningsevne forsvinner i systemer selv med svak uorden, under visse betingelser. Fenomenet kalles i dag «svak lokalisering», eller like gjerne «Anderson-lokalisering». For å forstå dette er det helt nødvendig å se på elektroner som bølger som kan interferere (destruktivt) med seg selv.

Etter mange år ved Bell Laboratories var Anderson en periode ved Cambridge University, før han ble professor ved Princeton University i 1984.

Anderson presterte det som mange andre Nobelpristagere finner vanskelig, nemlig å være faglig produktiv etter å ha fått Nobelprisen. Sammen med E. Abrahams, D.C. Licciardello og T.V. Ramakrishnan («Firerbanden») formulerte han en langt mer avansert skaleringssteori for lokalisering, som har ledet til mye ny fysikk, deriblant studier av «foton-lokalisering». Dette er et aktivt fagfelt også i dag.

Superledning er også et felt Anderson har gitt bemerkelseverdige bidrag til. Superledning er det fenomenet at elektrisk motstand helt plutselig forsvinner i et materiale når det kjøles ned under en viss temperatur. Anderson har gitt et fundamentalt perspektiv på dette. Elektrodynamikken til materialet endrer helt karakter når det blir en superleder, slik at fotonet får masse! Dette er analogt med det som skjedde ved at partikler fikk masse kort tid etter big bang i universets tidligste stadium, ved at et Higgs-kondensat dannet seg og påførte partikler masse. Fotonet slipper

unna, men når et metall blir superledende vil den endrede oppførselen til elektronene også ha en effekt på fotonet tilsvarende den Higgs-kondensatet har på elementærpartikler: Fotonet får masse. En superleder blir på en måte universet i en dråpe med kvikksølv. Fenomenet ble først forstått av Anderson og deretter Peter Higgs i en relativistisk invariant teori, og bærer i dag derfor navnet Anderson-Higgs-mekanismen for hvordan partikler blir massive.

Etter oppdagelsen av høy-temperatur superledning i 1987 av Müller og Bednorz, var det særlig dette fenomenet som opptok Anderson, og det var på feltet høy- T_c superledning jeg publiserte en artikkel sammen med ham og Sudip Chakravarty i *Science* i 1994. Han foreslo tidlig en teori for fenomenet basert på et enkelt bilde der spinn på et gitter går sammen to og to i en spin-singlett, som så kan begynne å bevege seg som et elektron-par (et såkalt Cooper-par) når systemene hull-dopes slik at de slutter å være isolatorer. I møtet med detaljerte eksperimenter viste det seg at denne teorien ikke kunne forklare alle aspekter ved dette fenomenet (som fortsatt ikke er forstått). Anderson fortsatte imidlertid helt til det siste å tenke på dette viktige problemet.

Philip Anderson var en helt usedvanlig kreativ og original tenker, også når man sammenligner med andre Nobelprisvinnere i fysikk. Han var en utpreget «anti-reduksjonist», og vektla sterkt et prinsipp som han benevnte «More is different»: Nye og uventede fenomener kan oppstå som kollektive effekter som ville være svært vanskelige å forutsi, selv om de grunnleggende fysiske lovene som bestemmer dynamikken til hvert enkelt atom i et materiale er velkjente. Ett av de mest kjente eksemplene på dette er grunnstoffet helium, som er det neste enkleste av alle atomer, men som fremviser forbløffende egenskaper når et stort antall helium-atomer bringes sammen og kjøles ned til en væske.

Philip Anderson øvde en enorm innflytelse på mange generasjoner av fysikere i mange tiår, og var intellektuelt skarp og aktiv til det aller siste.

Asle Sudbø

RETURADRESSE:

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

Styret i Norsk Fysisk Selskap

President

Professor Asle Sudbø, Institutt for fysikk, NTNU

E-post: asle.sudbo@ntnu.no

Visepresident

Professor Sunniva Siem, Fysisk instiutt, UiO, Kjerne- og energifysikk

E-post: sunniva.siem@fys.uio.no

Vara

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

E-post: arne.grimenes@nmbu.no

Styremedlemmer

Forsker Annett Thøgersen, SINTEF Oslo, kondenserte fasers fysikk og atomfysikk

Professor Magnus Borstad Lilledahl, NTNU, biofysikk

Postdoktor Audun Theodorsen, UiT, atmosfære-, rom- og plasmafysikk

Professor Håvard Helstrup, HiB, subatomær fysikk og astrofysikk

Professor Jon Samseth, OsloMet, industri- og energifysikk

Professor Astrid Aksnes, NTNU, optikk

Lektor Kaja Nordby, Kongsbakken vgs., Norsk Fysikklærerforening

Adresse

Norsk Fysisk Selskap

Institutt for fysikk, NTNU

7491 Trondheim

Internettadresse: www.norskfysisk.no

Sekretær: Haakon Thømt Simensen

E-post: nfs.styret@gmail.com

Bankgiro: 7878.06.03258

Org.nr.: 940 340 829

Bedriftsmedlemmer av NFS

Vi takker for støtten fra våre bedriftsmedlemmer:



UiT / NORGES ARKTISKE
UNIVERSITET



 NTNU 



UiO : Universitetet i Oslo

ISSN-0015-9247