

Fra Fysikkens Verden



International
Year of Light
2015

FN har valgt 2015 til Året for lys og lysbasert teknologi
(Se artikler med dette emblemet)

Nr. 1 – 2015
77. årgang

Utgiver:
Norsk Fysisk Selskap

Redaktører:
Øyvind Grøn
Emil J. Samuelsen

Redaksjonssekretær:
Karl Måseide

Innhold

Lars Egil Helseth:	
Optisk overvåking av vann	3
Emil J. Samuelsen:	
Effektive solceller for hydrogen frå vatn	8
Kristian Fossheim:	
Fasekonjugert ultralyd	12
Jonas Persson:	
Eksperimentet som aldri ble utført	22
Fra Redaktørane	2
Nytt fra NFS	2
Fysikermøtet 2015 og Nordic Physics Days 2015	15
Indeks 2014	26
Bokomtale	26
Ivar Olovsson m fl (red): From a Grain of Salt to the Ribosome	28
Fysikknytt	28
«Gravitasjonsbølgesignalet» var stråling fra støv	30
Kommentar	30
Lungenes rensesystem og radon	31
Trim i FFV	31

Fra Redaktørene

Ved generalforsamlingen 20. desember 2013, proklamerte FN at 2015 skal være *Året for lys og lysbasert teknologi*. Motiveringen er formulert i vedtaket og inneholder blant annet følgende punkter.

- Dette er en anerkjennelse av betydningen av lys og lysbasert teknologi for jordas borgere og for utviklingen av et velfungerende globalt samfunn.
- Godt og billig lys er avgjørende for å kunne etablere globale utdannings- og helsesystemer slik at livskvaliteten kan forbedres i utviklingsland.
- Godt lys er avgjørende for fremgang innenfor områdene medisin, kommunikasjon og kulturell virksomhet.
- Utnyttelse av lysenergi har store miljømessige fordeler.

I denne sammenheng er det interessant å merke seg at jorda mottar ti tusen ganger mer solenergi enn den totale energien menneskene nå forbruker. Det er mer enn nok solenergi til å dekke menneskets totale energibehov i overskuelig fremtid. Dette er fornybar energi som kommer fra kjerneenergi frigitt i solsystemets store fusjonskraftverk ved at hydrogen fusjonerer til helium på sola.

La meg foreslå et lysbasert prosjekt som kan gjennomføres med velkjent teknologi: Dekk den nordlige delen av Sahara med solcellepaneler. Bruk en del av den oppsamlede solenergien til å pumpe vann opp fra Middelhavet. Avsalt vannet og bruk det til å dyrke opp området rundt det gigantiske solkraftverket.

Vi ønsker å markere at 2015 er det internasjonale lysets år ved å ha minst én artikkel relatert til lys og lysbasert teknologi i hvert av årets fire numre av *Fra Fysikkens Verden*. Disse vil være merket med emblemet for lysets år.

Øyvind Grøn

∞

Nytt fra NFS

Fysikermøtet 2015 og Nordic Physics Days 2015

Det store fysikermøtet i år vil bli kombinert med det felles nordiske fysikermøtet, *Nordic Physics Days*. Dette fellesmøtet vil bli holdt ved NTNU i Trondheim, 9. til 12. juni, og vil få deltakere fra hele Norden. Professor Asle Sudbø er leder for arrangementskomiteen.

Takket være støtte fra Forskningsrådet, har vi kunnet invitere flere prominente internasjonale forskere til å gi plenumsforedrag, og vi har vært så heldige at nobelprisvinneren *Serge Haroche*, Frankrike, har takket ja til å komme. Sammen med David J. Wineland fikk han Nobelprisen i fysikk 2012 "for banebrytende eksperimentelle metoder som muliggjør måling og styring av enkeltstående kvantesystemer". Mange av resultatene deres er blitt svært viktige for å utvikle teknologi innenfor opto-elektronikk og optisk kommunikasjon.

Også *Mike Lockwood*, England (romfysikk), *Jean-Marc Triscone*, Sveits (faststoffysikk og nanofysikk), *Daniel Bonn*, Nederland (myke og komplekse materialer), *Cees Dekker*, Nederland (biofysikk), Jesper Bruun, Danmark (undervisning) og Helge Kragh, Danmark (utviklingen av den generelle relativitetsteorien), har takket ja.

Det blir parallellsesjoner i atom- og molekylærfysikk, medisinsk- og biofysikk, akustikk og anvendt fysikk, optikk og fotonikk, myke og komplekse materialer, nano- og faststoffysikk, rom-, atmosfære og miljøfysikk, astro- og subatomær partikkelfysikk, fysikkutdanning og kvinner i fysikk.

Fristen for innlevering av abstracts er 20. mars. Du kan finne mer informasjon på nettstedet <http://www.ntnu.edu/physics/npd2015/>

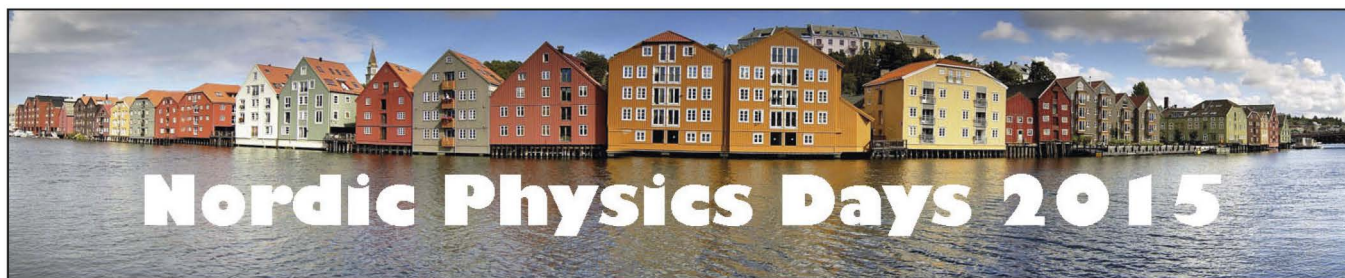
Meld på foredrag eller posters, og sett av dagene 9. til 12. juni til Fysikermøtet!

Prisutdelinger på møtet

Det vil bli delt ut følgende priser på Fysikermøtet:

Vinghøg-prisen i elektrooptikk

Prisen gis for et norsk arbeid på fagområdet elektrooptikk eller et arbeid der elektrooptiske metoder er anvendt. Prisen er på 15 000 kr.



Norsk Fysisk Selskaps Undervisningspris

NFS' undervisningspris på 15 000 kr utdeles til én eller flere som gjennom sitt arbeid har gitt et konkret bidrag til utvikling av fysikkundervisningen i skolen (grunnskole og videregående skole).

Martin Landrøs pris for fremragende mastergradsoppgave i fysikk

Prisen utdeles til én eller to kandidater som i løpet av foregående to kalenderår har levert en særlig god mastergradsoppgave i fysikk. Prisen deles ut på Norsk Fysisk Selskaps årsmøte med 5000 kr pr. kandidat.

Veiledere og sensorer inviteres til å nominere kandidater. Nominasjonsfristen for alle prisene er 15. april. Nominasjoner sendes til: Norsk Fysisk Selskap, e-mail: nfs.styret@gmail.com eller til undertegnede, ashild.fredriksen@uit.no

Mer informasjon om prisene og statuttene finnes på: <http://www.norskfysikk.no/nfs/nfs/priser/>

Åshild Fredriksen
president i NFS

∞

Optisk overvåking av vann

*Lars Egil Helseth **



Optisk teknologi har en viktig plass i vår hverdag, men også for overvåking av miljøparametere i luft og vann. I forbindelse med at FN har deklart 2015 som "Det internasjonale året for lys og lysbaserte teknologier", vil vi se litt på fysikken som ligger til grunn for noen av de systemer som kommer til å få stadig større betydning i fremtiden.

Introduksjon

En stadig økende oppmerksomhet mot gasser og partikler som forandrer det lokale og globale miljøet har ført til økte krav om god og pålitelig overvåking av en rekke miljøparametre. For eksempel overvåkes luften og havet av en rekke sensorer som sørger

for at vi får vite om akseptable grenseverdier er overholdt. I dette innlegget skal jeg ta for meg noen utvalgte optiske teknologier for overvåking av vann. Nå er det slik at overvåking av molekyler og partikler i vann ikke nødvendigvis kan nyttiggjøre seg samme teknologi som for luft. For eksempel så vil molekyler som lett kan detekteres ved hjelp av infrarød spektroskopi når de er i gassform, ikke nødvendigvis kunne detekteres på samme måte i vann, der man i tillegg får bidrag fra vannmolekylene som vil utgjøre en signifikant bakgrunn. Optisk-kjemisk overvåking av vann er da et godt alternativ.

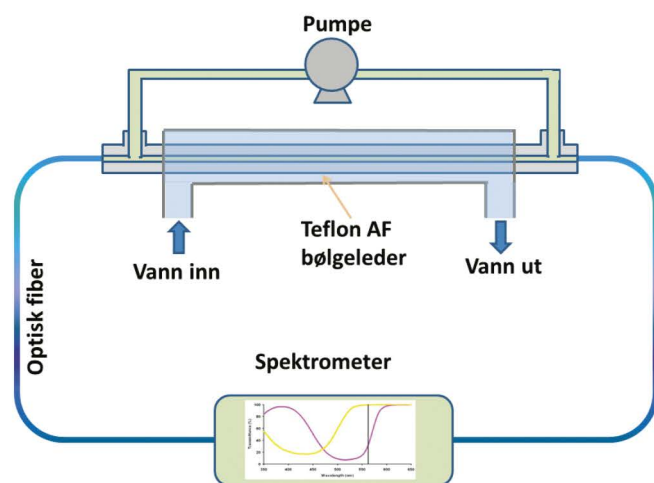
Optisk-kjemisk overvåking av vann

Forsuring av innsjøer og hav er et gjennomgående tema i dagens miljøproblematikk, og her står overvåking av surhet sentralt. En av de mest popu-

* Institutt for fysikk og teknologi, Universitetet i Bergen

lære metodene for overvåking av pH i vann er basert på bruk av kolorimetriske syre-baseindikatorer som forandrer farge med aktiviteten av hydroniumioner. Nøyaktig overvåking av lysintensiteten som transmitteres gjennom en lengde, L , i en væske gir adgang til nøyaktig, kvantitativ analyse. Ifølge Beer-Lamberts lov vil en væske med absorpsjonskoeffisient μ gi en transmisjon gjennom væsken gitt ved $T = e^{-\mu L}$, der μ avhenger av bølgelengden til lyset, konsentrasjonen av hydroniumioner (H_3O^+) og bufferløsningen som brukes. Vanlige fargestoffer er bromotymol blå eller fenolrød, i en passende bufferløsning. Det eksisterer en rekke forskjellige design for nøyaktig overvåking av surhetsgrad med en presisjon på ned mot 10^{-3} pH-enheter, mens typiske glasselektroder gjerne ligger en størrelsesorden over. En skjematisk figur av et typisk oppsett for å detektere små forandringer i pH eller CO_2 er vist i figur 1, der indikatorløsning pumpes inn i en tynn bølgeleder og kontinuerlig sirkuleres eller erstattes, slik at den ikke fordampes eller blekes av lyset.

Lyset kommer gjerne fra flere lysdioder (ikke vist her) koblet til en optisk fiber, som igjen er koblet til en tynn bølgeleder laget av en gasspermeabel polymer. Et klart skille i form av en polymer mellom indikatorløsning og innstrømmende vann er i prinsippet ikke nødvendig for deteksjon av pH, da man her er interessert i den totale aktiviteten til hydronium-ioner.



Figur 1. Oppsett for å måle pH eller CO_2 i vann. En syre-base indikator (grønn) pumpes gjennom en optisk bølgeleder (grå). Den optiske bølgelederen som er laget av en porøs fluoropolymer lar CO_2 fra vann (blå) diffundere inn, slik at pH, og dermed også fargen, til indikatorløsningen forandres. Fargeforandringene kan måles ved hjelp av lys som sendes gjennom løsningen via en optisk fiber, og til et spektrometer.

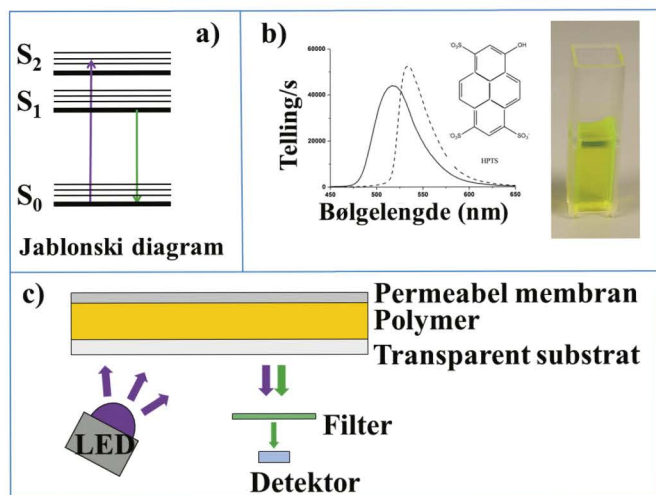
CO_2 -deteksjon

Dersom man ønsker å detektere CO_2 i vann, må man skille vannet som kommer inn fra indikatorløsningen ved hjelp av en CO_2 -permeabel membran som Teflon AF.⁽¹⁾ CO_2 vil da diffundere gjennom den "porøse" polymerstrukturen til Teflon AF før den trenger inn i indikatorløsningen og danner kjemisk likevekt i løpet av noen minutter. Her er det ønskelig at polymerstrukturen bare er permeabel for CO_2 , da andre gasser også forårsaker forandringer i pH. Videre er det nødvendig at polymeren har en mindre brytningsindeks enn indikatorløsningen, da lyset ellers vil lekke ut av indikatoren idet bølgeleder-effekten går tapt. Selv om den type optisk-kjemiske sensorer som vi har beskrevet ovenfor kan detektere små variasjoner i pH eller CO_2 i innsjøer eller hav, har de likevel noen viktige begrensinger. For det første kreves det nokså inngående kjennskap til systemet og dets virkemåte for å kunne håndtere det, der blant annet regelmessig utskifting av indikatorløsning er påkrevet. Videre har et slikt system relativt lang reaksjonstid på grunn av at kjemisk likevekt skal etableres i indikatorløsningen før en pålitelig måling kan gjennomføres. I tillegg har systemet ofte relativt stor utstrekning, der selve bølgelederen kan være 15–20 cm. For å redusere størrelsen og responstiden til systemet er mikrofluidiske systemer et alternativ.

Optoder

Et annet alternativ for deteksjon av CO_2 der man unngår kontinuerlig utskifting av indikatorløsning, er bruk av såkalte 'optoder', der man blander fargestoffet inn i en tynn polymerfilm, som dermed vil virke som både holder og gassbarriere på en gang. En populær måte å gjøre dette på er å dope en polymer med et fargestoff som vil forandre sin farge når den vekselvirker med CO_2 . Det kan nevnes at polymerfilmen vanligvis er tynn (typisk 1 mm eller tynnere), mens bølgelederen i figur 1 er kanskje 15–20 cm, noe som gjør at mye større konsentrasjoner av indikatorløsning er påkrevet. For CO_2 har man prøvd de samme fargestoffene som er brukt i mer tradisjonelle oppsett som i figur 1, men det viser seg at bleking av indikatoren og kryssforstyrrelser fra ioner gir en reduksjon i sensitiviteten. Derfor har man i mange tilfeller sett nærmere på optoder som benytter seg av fluorescens.⁽²⁾ En rekke molekyler har sine energinivåer arrangert slik at de fluorescerer (dvs. sender ut lys ved andre

bølgelengder) når man lyser på dem med tilstrekkelig kort bølgelengde. Fluorescens kan kanskje lettest forstås ved å se på det såkalte Jablonski diagrammet (oppkalt etter den polske vitenskapsmannen Alexander Jablonski) i figur 2a).



Figur 2. Figur a) viser et Jablonski diagram, der S_0 , S_1 og S_2 representerer energinivåene i et molekyl. Figur b) viser et forenklet diagram av molekylærstrukturen til pyranin, samt et typisk fluorescens-spektrum (antall fotontellinger per sekund) i vann (heltrukken linje) og i lut (stiplet linje). Også vist er pyranin i vannløsning i en kuvette. Figur c) viser en typisk optode basert på fluorescens, der det fiolette LED-lyset eksiterer fluorescens (grønt lys) som filtreres ut og detekteres.

Dette er i all hovedsak en sterkt forenklet fremstilling av energinivåene til et slikt molekyl. Når man belyser molekylet med kortbølget fiolett lys, vil molekylet eksiteres fra grunntilstanden S_0 og opp i den eksiterte tilstanden S_2 . Deretter vil molekylet relaxere ned til bunnen av S_1 i løpet av et tidsintervall på typisk 10^{-12} s, før det går tilbake til grunntilstanden og emitterer et foton. Levetiden for denne siste prosessen er typisk 10^{-9} s, men kan endres ved hjelp av elektromagnetiske vekselvirkninger med andre molekyler. Som man ser av Jablonski-diagrammet, vil lyset som sendes ut ha en lengre bølgelengde (grønt) enn lyset som eksiterer molekylet. Dette betyr at man kan skille mellom fluorescens og direkte refleksjon ved å bruke et filter. I tillegg er det ofte slik at fluorescerende molekyler har sterke farger på grunn av sitt eget absorpsjonsspekter, som vil overlappe med fluorescensspekteret og dermed gjøre det vanskelig å detektere sistnevnte uten filter.

Pyranin er et molekyl som ofte brukes ved deteksjon av CO_2 i vann, fordi dette molekylet

har et spektrum som er svært sensitivt ovenfor forandringer i pH. Den heltrukne linjen i figur 2b) viser fluorescens-spekteret for pyranin i rent vann når man belyser molekylet med fiolett lys med bølgelengde 405 nm, mens den stiplete linjen viser at hele spekteret rødforskyves (mot større bølgelengder) når man gjør løsningen basisk.

Dersom man ønsker å lage en optode basert på et molekyl som pyranin, er en metode å lage en lagdelt tynnfilm som vist i figur 2c). Først doper man en polymer med pyranin og legger denne på et gjennomsiktig substrat. Polymeren sin oppgave er å holde pyranin-molekylene på plass, samtidig som den tillater CO_2 -molekyler å trenge inn. For å sikre at ikke andre pH-drivende molekyler slipper inn i polymeren, legger man vanligvis en permeabel membran oppå polymeren. Membranen har som oppgave å slippe inn CO_2 molekyler, men så få som mulig av andre typer molekyler. Man belyser nå pyranin-molekylene med korte lyspulser ved hjelp av en eller to lysdioder (LEDs). Dette genererer både direkte reflektert lys (fiolett) og fluorescens (grønt). Det grønne lyset skilles så ut ved hjelp av et optisk filter. Dersom mengden av CO_2 -molekyler i polymeren forandrer seg, vil både levetid og fluorescens-spekteret forandre seg, og dette er størrelser som brukes til å gjøre kvantitative målinger av mengden CO_2 tilstede. Til nå har det vist seg at optiske systemer basert på optoder (figur 2) er mindre sensitive enn optisk-kjemiske sensorer basert på indikatorløsninger i væskeform (figur 1), slik at sistnevnte fortsatt er i bruk ved overvåking av hav og innsjø.

Deteksjon av brytningsindeks

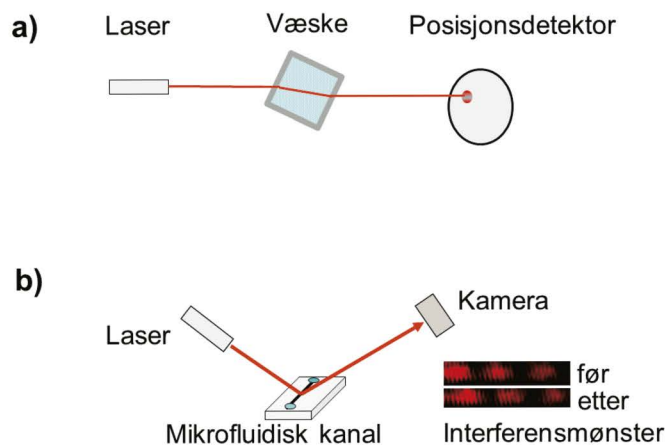
I mange tilfeller trenger man ikke noen form for indirekte påvisning av analytter, siden brytningsindeksen forandrer seg såpass mye når man tilsetter fremmedstoffer i vann at det er mulig å detektere disse forandringene direkte.

Refraktometri

En måte å måle forandringer i brytningsindeks på er ved hjelp av et refraktometer som vist i figur 3 a). Her sendes en laserstråle gjennom en beholder med vann. På grunn av at vannets brytningsindeks er ulik den i luft (og beholder), vil strålen brytes ved grenseflaten i henhold til Snells lov

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

der n_1 er brytningsindeksen til luft, θ_1 er vinkelen den innkommende laserstrålen danner med grenseflaten, n_2 er brytningsindeksen til vannløsningen og θ_2 er vinkelen laserstrålen danner med grenseflaten når den forplanter seg i vann.



Figur 3. To prinsipper for å måle forandring i brytningsindeks ved hjelp av laser. Figur a) viser et laser refraktometer, der en laserstråle brytes ved to væskeoverflater og det påfølgende forskyvning av laserstrålen måles av en posisjonsdetektor. I figur b) vises et interferometer, der bølgefrontene som reflekteres fra topp og bunn av overflatene mellom væske og en mikrofluidisk kanal interfererer og intensitetsfordelingen registreres av et kamera.. For å illustrere hva som skjer med interferensmønsteret ved små forandringer, viser figur b) også intensitetsfordelingen på kameraet før og etter at brytningsindeksen har forandret seg. Man kan måle forskyvningen i interferensmønsteret, og finne forandringen i brytningsindeks.

Den romlige forskyvningen av laserstrålen avhenger av hvor stor brytningsindeksen til vann er, og denne avhenger av temperatur, trykk og hvilke fremmedmolekyler som er oppløst i vannet. Vanligvis er man ikke interessert i absoluttverdien av brytningsindeksen, men heller forandringer i denne når man tilfører små mengder analytt. Forandringer i brytningsindeks fører ifølge Snells lov til at laserstrålen forskyves litt, og denne forskyvningen kan måles ved hjelp av en silisiums-basert posisjonssensitiv detektor. Det finnes en rekke ulike typer posisjonssensitive detektorer på markedet, og med noen av disse kan man detektere forflytninger i laserstrålen $< 1 \mu\text{m}$, og dermed også små forandringer i brytningsindeksen. Jo lenger unna posisjonsdetektoren er den brytende overflaten, jo større blir forflytningen av strålen på posisjonsdetektoren. Vanligvis ønsker man seg relativt små og kompakte apparat, som setter restriktive begrensninger på hvor små variasjoner i

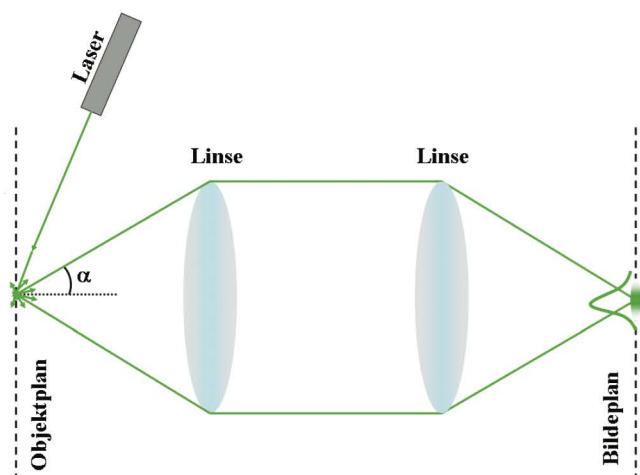
brytningsindeks man kan måle. Slike små variasjoner i brytningsindeks oppstår når saltinnhold i havet forandrer seg, noe som gjør denne typen sensor veldig interessant med tanke på overvåking av saltinnhold i vann. Nå er det likevel slik at det eksisterer allerede gode elektriske målesystemer som kan gjøre målinger av konduktiviteten, og dermed indirekte også saltinnholdet, til en væske. Fordelen med optiske refraktometre er at brytningsindeksen avhenger direkte av saltinnholdet, noe som gjør at man slipper ekstra brysomme kalibreringer som for konduktivitetsmålere. Nå er likevel optiske refraktometre så ømfintlige at de sjelden har blitt brukt i kommersielle system, men det foregår forskning med tanke på å rette opp i dette problemet, se for eksempel ref. (3).

Interferometri

En metode som har vist seg mye mer nøyaktig enn refraktometri, er interferometri fra tynne kanaler, som kan ha sirkulære (som i kapillærrør) eller rektangulære tverrsnitt. Et slikt oppsett er beskrevet i figur 3b), der kanalene har rektangulære tverrsnitt. Vannløsning med analytt pumpes inn i en tynn kanal laget i polymer med tykkelse på rundt $d = 100 \mu\text{m}$ og lengde på noen millimeter. Ideen er at laserstrålen vil reflekteres både fra den øverste og den nederste grenseflaten mellom polymer og vann, og deretter danne et interferensmønster som kan fanges opp ved hjelp av et kamera. Den ene av de to interfererende lysbølgene vil forplante seg gjennom væsken inne i kanalen, og dermed vil den optiske faseforskyvningen avhenge av brytningsindeksen til væsken. Dette betyr at hele interferensmønsteret vil forskyves dersom brytningsindeksen forandrer seg, som vist i figur 3b). Denne metoden kan i prinsippet brukes til å detektere forandringer i brytningsindeks helt ned til 10^{-9} , til tross for at væskevolumet kan være $< 1 \mu\text{L}$. En ulempe med denne type interferometer er at det ikke er særlig robust. Det egner seg best som et laboratorieinstrument, der det har vært brukt innen sensitiv deteksjon av biomolekylære reaksjoner.⁽⁴⁾

Overvåking av partikler i vann

Jeg har til nå beskrevet optiske teknologier for overvåking av ioner eller molekyler i vann. Det finnes også en rekke optiske teknologier for å overvåke partikler eller partikkelaggregater basert på spredning, absorpsjon eller spektroskopi.



Figur 4. Forenklet tegning av et optisk system basert på laser-spredning fra partikler. Laserlyset treffer enkeltpartikler, og spres i mange forskjellige retninger. Noe av lyset fanges opp og avbildes på et kamera.

Et eksempel er vist i figur 4, der noe av laserlyset som spres fra en partikkel blir avbildet på et kamera i bildeplanet. På grunn av interferensmønsteret som dannes i bildeplanet, vil en partikkel som er mye mindre enn lysets bølgelengde representeres ved en intensitetsfordeling med utstrekning på $\approx \lambda/(2NA)$, der $NA = \sin\alpha$ er den numeriske aperturen til objektivlinse, og λ er lysets bølgelengde. Til tross for at bildet av lyssprederen har en utstrekning med samme størrelsesorden som bølgelengden til laserlyset, er det fullt mulig å måle forskyvninger i posisjonen til denne lysflekken med en nøyaktighet som er flere størrelsesordener mindre enn bølgelengden. Man kan også bruke et oppsett som i figur 4 til å bestemme størrelsen på partikler. En liten partikkel vil fritt virrevandre i vannet dersom det ikke eksisterer væskestrømmer. Det midlere kvadratiske avviket fra middeposisjonen er da gitt som funksjon av tiden, t :

$$\langle \Delta r^2 \rangle = 6Dt, \quad (2)$$

der diffusjonskoeffisienten er gitt som

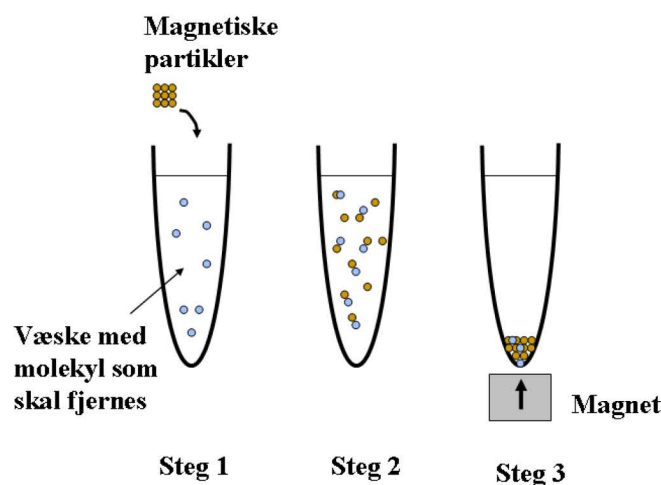
$$D = \frac{k_B T}{6\pi\eta R} \quad (3)$$

Den siste formelen kalles ofte Einsteins relasjon, basert på hans arbeid fra 1905 om Brownske bevegelser. Her er k_B Boltzmanns konstant, T er temperaturen i væsken, η er viskositeten til væsken og R er den hydrodynamiske radius til partikkelen (dvs. den effektive radius til partikkelen når den drar med seg et tynt lag væske). Man ser altså at ved å måle posisjonen som funksjon av tiden ved

hjelp av et kamera, kan man regne ut $\langle \Delta r^2 \rangle$, som igjen betyr at man kan finne diffusjonskoeffisienten D . Med væskens viskositet og temperatur er det da en smal sak å estimere partikkelens hydrodynamiske radius R . Denne metoden har vært brukt til å bestemme størrelsen til svært små partikler og proteiner, og det finnes flere kommersielle laboratorieinstrumenter som benyttes til dette formålet i forskning og undervisning. For overvåking av partikler i væsker ute i felten er laserspredning også brukt, men da for større partikler. Her er man ofte interessert i hvordan partiklene strømmer i væsken gitt forskjellige geometriske hindringer, noe som gjør at partiklene ikke trenger følges med så stor presisjon som nevnt i anvendelsen ovenfor.

Det er ikke bare overvåking av enkeltpartikler som er av interesse. I mange tilfeller er man interessert i å rense vann for partikler eller molekyler, for eksempel ved hjelp av mekanisk filtrering gjennom passende membraner. Det er også mulig å filtrere vannløsninger på andre måter, for eksempel ved magnetoforese, som har blitt tatt i bruk i de senere år. Magnetoforese refererer til forflytning av partikler i magnetiske felt. Spesielt partikler som magnetiseres i magnetfelt kan brukes til å separere molekyler, enten det er farlige kjemiske sammensetninger eller ufarlige proteiner, fra vannholdige prøver, som illustrert i figur 5.

Ugelstaddkuler og andre jernholdige polymerpartikler med diameter $\approx 1\mu\text{m}$ er svært populære for dette formålet, siden overflaten kan lages svært uniform og dekkes av et rimelig velkjent antall



Figur 5. Fjerning av molekyler fra en vannprøve ved hjelp av magnetiske partikler. Man blander først sammen væsken med magnetiske partikler (steg 1). Molekylene fester seg så til de magnetiske partiklene (steg 2), og de kan sammen fjernes ved hjelp av en magnet.

molekyler. I tillegg er de jernholdige polymerpartiklene såpass store at de beveger seg lett i små magnetiske feltgradienter ved hjelp av magnetoforese. For å øke overflaten og dermed også antall molekyler som kan festes til overflaten på overflatebehandlede magnetiske partikler, er det et uttalt ønske om å gå fra mikro til nanopartikler, noe som også har vist seg å øke hastigheten til den magnetoforetiske prosessen. Mengden av magnetiske nanopartikler fjernet fra en vannholdig løsning kan overvåkes optisk ved å ganske enkelt sende en lysstråle gjennom væskeløsningen i figur 5 og måle transmisjonen. Transmisjonen av lys kan i noen tilfeller beskrives av Beer-Lamberts lov, men oftest vil aggregater gjøre at mer komplekse beskrivelser er nødvendig. Venter man lenge nok (hvor lenge avhenger av partiklenes størrelse og magnetisering), vil alle nanopartikler trekkes mot bunnen og separeres fra væsken. I en studie brukte man magnetiske nanopartikler med stort overflateareal (dvs stort i forhold til volumet på partiklene) til å fjerne betydelige mengder arsenikk i vann ved hjelp av lave feltgradienter ($< 100 \text{ T/m}$) som kan oppnås med vanlige magneter. Mer om dette kan man finne i ref. (5).

Referanser

1. Z. Wang et al.: *A long pathlength spectrophotometric $p\text{CO}_2$ sensor using a gas-permeable liquid-core waveguide*. *Talanta* **57**, 69–80 (2002)
2. Q. Zhu et al.: *A new ratiometric, planar fluorosensor for measuring high resolution, two-dimensional $p\text{CO}_2$ distributions in marine sediments*. *Marine Chemistry* **101**, 40–53 (2006)
3. M. Le Menn et al.: *Advances in measuring ocean salinity with an optical sensor*. *Meas. Sci. Technol.* **22**, 115202 (2011)
4. D.J. Bornhop et al.: *Free-solution, label-free molecular interactions studied by back-scattering interferometry*. *Science* **317**, 1732–1736 (2007)
5. C.T. Yavuz et al.: *Low-field magnetic separation of monodisperse Fe_3O_4 nanocrystals*. *Science* **314**, 964–967 (2006)

∞

Effektive solceller for hydrogen frå vatn

Emil J. Samuelsen *



Hydrogen, H_2 , er ein viktig framtidig energibærer, og er elles av stor industriell interesse. H_2 kan framstillast av vatn ved elektrolyse, altså spalting av H_2O til H_2 og O_2 , ein prosess som krev mykje energi. Forsking for å bruke solcelleelektrisitet til elektrolysen har pågått sidan 1980-åra. Særs oppløftande resultat er nyleg offentliggjort om bruk av nyutvikla solceller av perovskitt-materiale.

Mange bruksområde for hydrogen

Hydrogen er eit viktig råstoff for industriell bruk. Store mengder går til framstilling av ammoniakk,

NH_3 , som er utgangsmateriale for produksjon av kalksalpetergjødsel, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Hydrogengass blir nytta i oljeraffinering, og er elles eit betydeleg reduksjonsmiddel i fleire industriprosessar. Gassen inngår også som brensel i rakettmotorar for romfart. Viktig framtidsbruk er som drivstoff i kjøretøy og båtar, og gassen inngår som eit hovudelement i elektrisitetsproduksjon med brenselceller. Hydrogen kan også eigne seg som lagringsmedium av "fornyeleg" energi frå solceller og vindmøller.

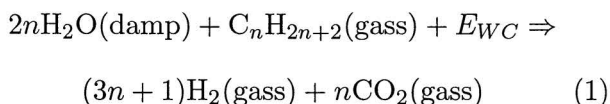
Framstillingsmetodar

Det er fleire metodar for framstilling av hydrogen. Vi nemner her berre dei to viktigaste.

* Institutt for fysikk, NTNU, Trondheim.

Reduksjon av vatn med naturgass

Hydrogen blir framstilt i industriell skala ved reaksjon mellom naturgassar (f.eks. med formel C_nH_{2n+2} , der $n = 1$ er metan, CH_4) og vassdamp ved høg temperatur. Reaksjonen kan forenkla skrivast som

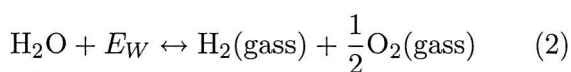


E_{WC} er tilført energi (kalla "entalpi" i termodynamisk terminologi). Denne prosessen går over to trinn ved ulike temperaturar, og gir betydelege utslipp av karbondioksid. Om lag 95 % av hydrogenet som blir framstilt industrielt kjem frå denne metoden. Andre metodar inneber oksidering av naturgass med oksygen, og har CO som biprodukt.

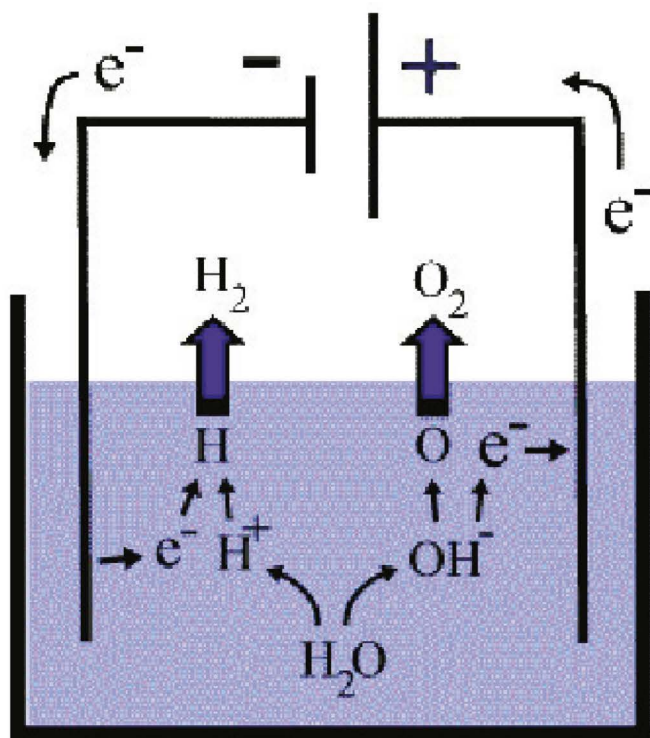
Spalting av vatn ved elektrolyse

Denne prosessen har den opplagte fordel at han ikkje produserer klimagassane CO og CO_2 , men han krev mykje energi.

Spaltingsprosessen kan skrivast som



E_W er tilført energi ("entalpi"), som er 286 kJ per



Figur 1. Prinsippskisse av elektrolyse av vatn til hydrogen og oksygen.

mol H_2O , eller 15890 kJ (4,41 kWh) per kg spalta vatn. Det svarar til at det teoretisk trengst minst 40 kWh per kg framstilt H_2 . Spalting av vatn er altså energikrevande. Basert på slike energikrav gir termodynamisk utrekning at minstespenninga som trengst for spalting ved atmosfærestrykk og temperatur 25 °C, er 1,23 V. Dette blir kalla *standardpotensialet* for spalting av vatn.

Elektrolyse av vatn har vore kjent sidan 1880-åra. Spaltinga skjer i ein elektrolytt, t.d. kalilut, 20-40 % KOH i vatn, i ionisert form K^+ og OH^- . I praksis trengst ei spenning som er betydeleg høgare enn standardpotensialet, av storleik 1,5–2,0 V, på grunn av diverse kontaktpotensial på elektrodeoverflatene og tap andre stader i systemet. Overspenninga er avhengig av elektrodematerialet som er brukt. Dei beste elektrodemateriala er gjerne dyre metall som platina; derfor er ein på leit etter rimelegare løysingar. Mellom elektrodane er det gjerne plassert ein membran for å halde dei produserte gassane frå kvarandre.

Brenselceller kan seiast å vere elektrolyseceller kjørt i revers. Hydrogengass og oksyngengass blir tilført kvar sin elektrode i ein elektrolytt, og gir ut ei spenning svarande til standardpotensialet, 1,23 V, ved at hydrogenet og oksygenet kombinerer til vatn. For fleire detaljar viser eg til ref. (1).

Hydrogenproduksjon med solenergi

Den reinaste forma for energi i stor skala er utan tvil energien i sollyset. Plantene lagrar solenergi ved hjelp av klorofyllet i bladverket, som gjennom fotosyntesen produserer sukkerartar av vatn og karbondioksid. Effektiviteten til denne naturprosessen er ikkje stor, < 1 %, men plantene tar tida til hjelp og utnyttar kvar stund lyset er tilstrekkeleg sterkt til at syntesen kan skje.

Med fotosyntesen som inspirator er tankar om "kunstig" fotosyntese naturleg komne opp – å spalte vatn ved hjelp av sollys ved tilpassa symbiose mellom solcelle for å skaffe elektrisk straum og elektrolyse av vatn i høvelege elektrolyttar, såkalla "fotoelektrokjemiske celler".

I 1983 vart det tatt ut patent i USA på eit slikt system, basert på silisium-solceller. For å få høg nok spenning, vart mange Si-celler nytta i serie, ettersom kvar Si-celle gir ut spenning på berre litt over 0,5 V. No er dei fotoelektrokjemiske cellene blitt vidareutvikla og forbetra, med total effek-

tivitet for sollys-til- H_2 -prosessen på opp til 6-8 %. Men storskalaproduksjon av hydrogen har dette ennå ikkje gitt, og prisen på solprodusert H_2 er 4-5 gonger høgre enn naturgass-basert H_2 , mest fordi cellemateriala er dyre og ikkje effektive nok.

Ei tilfredsstillande fotoelektrokjemisk celle for hydrogenproduksjon må kunne vere omtrent like robust som bladgrønt er ute i naturen, for å kunne nyttiggjere sollyset seint og tidleg. Ein kan stille opp fire krav til framtidige celler i drift: Dei må vere 1) *effektive*, 2) *billege* og 3) *av lett tilgjengelege materiale* (unngå bruk av sjeldne grunnstoff som platina, ruthenium, iridium, indium og liknande), og 4) *stabile i bruk over lang tid*.

Billegare celler og høgre effekt

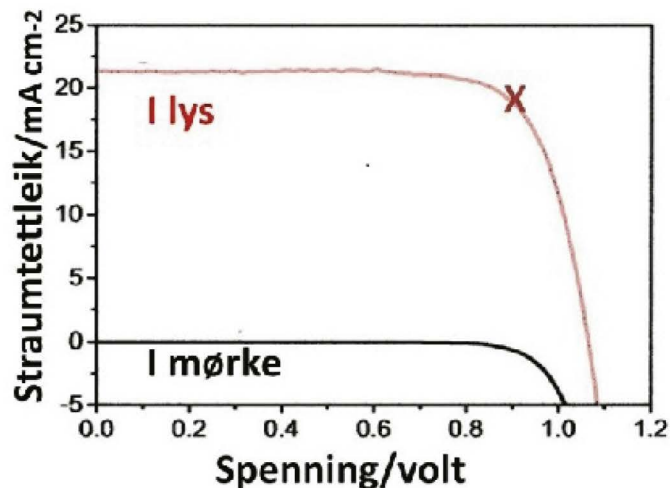
Det føregår heile tida forskingsinnsats for betre solceller. Ei spesielt interessant nyutvikling i løpet av dei aller siste åra er dei såkalla "perovskitt-baserte" solcellemateriala *metyl-ammonium-bly-halogen-perovskitt* (MABHP) med kjemisk formel $CH_3NH_3PbX_3$, der X står for halogen-atom klor Cl, iod I eller brom Br.⁽²⁾ MABHP har krystallstruktur som liknar mineralet perovskitt, og derav namnet.

Alle råmateriala som trengst, er billege og lett tilgjengelege kjemikaliar. I cellene føreligg MABHP som nanometer-tynne sjikt framstilt ved enkle sprøytemetodar. Konverterings-effektivitetar opp mot 20 % for sollys til elektrisk energi er rapportert.⁽²⁾ Særleg viktig er at enkeltceller gir spenningar på 0,9-1,0 V, slik at to celler i serie vil vere nok for å kunne spalte vatn.

Fotoelektrokjemiske celler av perovskitt-type

Ei forskingsgruppe i Lausanne offentleggjorde i september 2014 fotoelektrokjemisk spalting av vatn ved hjelp av solcelle av perovskitt-typen, der halogenet X er iod, I.⁽³⁾ Målt celleeffektivitet for konvertering til elektrisk energi oppgir dei til 17,3 %. Straum-spenningskarakteristikken er vist i figur 2. Kurva "I lys" gir ein "Fyllingsfaktor", FF, på 0,70, som er ein akseptabel verdi. (FF er forholdet mellom produktet av straum (19) og spenning (0,9) for knekkpunktet, X, på kurva, og produktet av største straum (23) og største spenning (1,07)). Vi ser at straumtettheten for denne enkeltcella er over 20 mW/cm² under "standardbelysning".

Særs viktig for den elektrokjemiske effek-

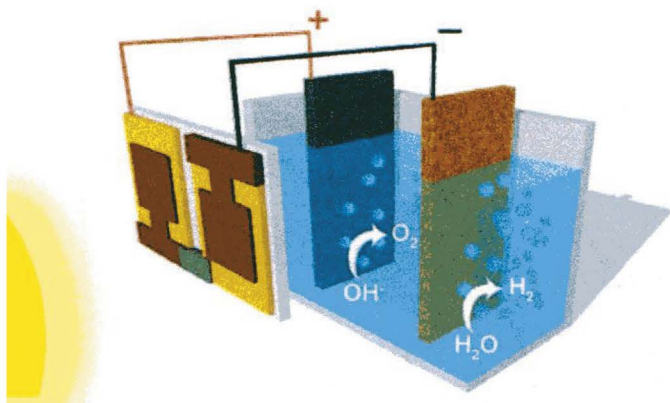


Figur 2. Straum-spenningskarakteristikk for solcella, i mørke og under "standardbelysning" 100 mW/cm² under AM 1,5-forhold (dvs. simulert solspekter etter å ha passert 1,5 atmosfæremasse). (Frå Ref. (3) med løyve).

tiviteten er kva slags elektrodar og elektrolytt ein nyttar. Det gjeld om å halde alle overpotensial på elektrode-grenseflatene nede, samtidig som materialet i elektrodane må tole kontakten med elektrolytten. Elektrolytten i dette tilfellet var 25 % kalilut. Her vart valet av elektrodemateriale eit porøst nikkelbasert hydroksyd med tilsetjingar av jern, kalla NiFe-LDH, som består av billege råstoff. Materialet fungerer både som anode (der oksygenet blir utvikla) og som katode (på hydrogensida), og har samtidig katalytisk verknad slik at overpotensialet blir halde på under 0,5 V. Det betyr at med ei arbeidsspenning på $1,23 + 0,50 = 1,73$ V er den elektrokjemiske effektiviteten $1,23/1,73 = 0,71$, og totaleffektiviteten for den fotoelektrokjemiske konverteringa frå solenergi til hydrogengass blir då $17,3 \times 0,71 = 12,3$ %. Det er den høgste verdien som hittil er rapportert for solcellebasert hydrogenframstilling.

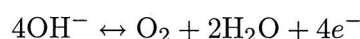
To celler i tandem

For å oppnå ei spenning på 1,7 V ville det trengst minst fire Si-celler i serie. Ein klar fordel ved perovskittceller er at ein kan greie seg med to. Figur 3 viser eit skjematisk bilde av oppsettet. For det aktuelle eksperimentet er elektrodane oppgitt å ha ei overflate kvar på 5 cm², og solcelleoverflata er berre 0,32 cm². Dei brukte ikkje membran mellom cellene, men gassane blei samla opp og målte. Med kunstig sollys på 100 mW/cm² var straumtettheten for dobbeltcella 10 mA/cm², som er det halve av straumtettheten for enkeltceller. Cellereaksjonane

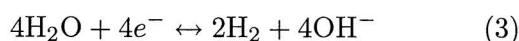


Figur 3. Skjematisk avbildning av elektrolysekar med elektrodane og solcellene seriekopla på venstre side. Lyskjelda, ei "kunstig sol", heilt til venstre. (Frå Ref. (3) med løyve).

er ved anoden (+):



og ved katoden (-)



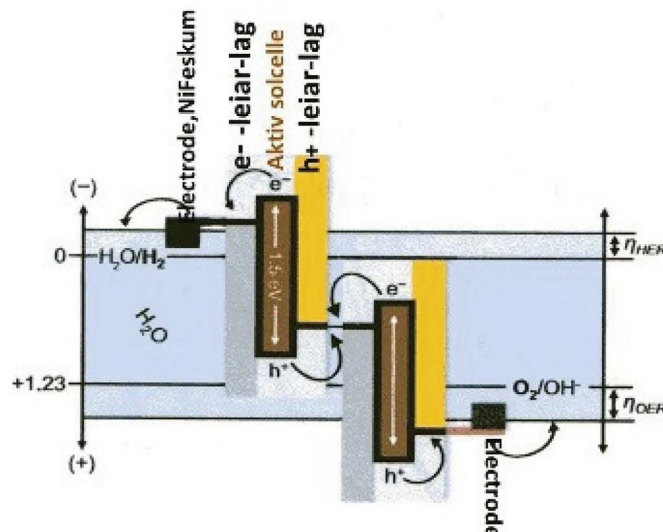
Summen av desse to reaksjonane blir altså at to vassmolekyl blir spalta til to molekyl hydrogen og eitt molekyl oksygen og forsvinn, i samsvar med likning (2).

Resultat

Det er klart at denne forsøksoppstillinga ikkje gir noko endeleg svar på kor godt dette systemet til sjuande og sist kan komme til å fungere. Ein kan vel seie at av dei fire krava er dei tre første bra oppfylte. Men perovskitt-solcellene er enno ikkje ferdigutvikla, og i ubeskytta tilstand er levetida begrensa. Eksperimentet ovanfor gjekk i opptil 10 timar, men det skjedde ei degradering over det tidsrommet som nok skyldest perovskittcella. Forfattarane meiner at innkapling av cellene i glas kan forbetre stabiliteten. Dei har også tru på at MABHP-celleforskinga skal utvikle celler med endå høgare effektivitet, men også at endå betre elektrodemateriale skal kunne finnast, så overspenningane η_{HER} ved katoden og η_{OER} ved anoden kan reduserast (sjå figur 4).

Energilagring

Ettersom brenselceller kan seiast å vere elektrolyseceller kjørt i revers, kan spalting av vatn nyttast som ei form for lagring av "fornybar" energi frå solceller (og også frå vindmøller). Ein lar overskot-



Figur 4. Dei to seriekopla solcellene med spenningsforholda vist skjematisk i vertikalretninga, med standardpotensialet 1,23 V og overspenningane η_{HER} ved katoden og η_{OER} ved anoden. Elektrodane er "nikkel-jern-dobbellags-hydroxyskum, NiFe-LDH" (svart). Det aktive solcellematerialet er $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (brunt) som har energigap på 1,5 eV. I solcellene er det eit elektron-leiande lag på venstre sida.

senergi gå til elektrokjemiske celler for å produsere hydrogen og oksygen om dagen når sola skin (og frå møllene når det er vind), og så gjenvinne energien med brenselceller om natta (og ved vindstille). Også i dette aspektet kan det omtalte arbeidet vere eit viktig steg framover.

Referansar

1. V.S. Bagotskii: *Fuel cells: problems and solutions*. Textbook, Wiley & Sons, Hoboken (2012)
2. Emil J. Samuelsen: *Solcellerevolusjon med perovskitt*. Fra Fysikkens Verden, **76**, Nr. 2, 47–51 (2014)
3. J. Luo, J.-H. Im, M.T. Mayer, M. Schreiner, M.K. Nazeeruddin, M.-G. Park, S.D. Tilley, H.J. Fan, M. Grätzel: *Water pyrolysis at 12,3 % efficiency via perovskite photovoltaics and earth-abundant catalysts*. Science, **345**, 1593–1596 (2014)

Fasekonjugert ultralyd – fascinerande fysikk

Kristian Fossheim *

Ei historie om korleis ny fysikk blir til i laboratoriet

Innleiing

Utviklinga innan fysikken tvingar i våre dagar fram investering i store laboratorium og konsentrasjon om fellesprosjekt med mange forskarar og bruk av store ressursar. Dette er ei utvikling som verkar sterkt styrande på val av forskningstema for den enkelte forskaren. Samtidig blir det i offentleg debatt påpeika kor viktig det er å ta vare på den ein-skilde forskarens prosjektidear.

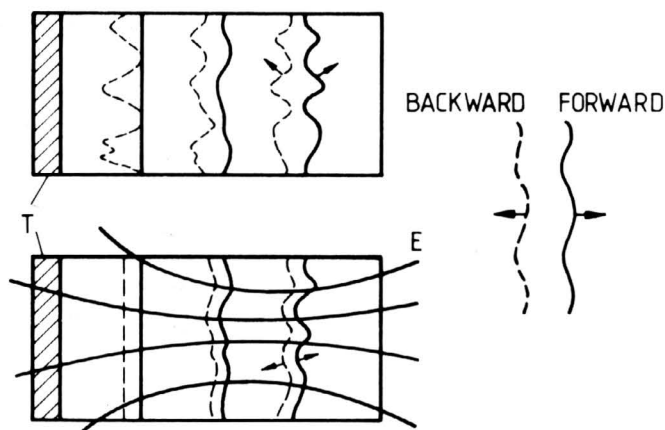
Eg nemner dette som ein inngang til ei historie eg vil fortelje frå arbeid ved NTH/NTNU, som eit døme på fruktbart samarbeid mellom ein professor og ein student, utan andre aktørar enn desse to. Ein ny eksperimentell metode vart utvikla til relativt liten ekstra kostnad, og gav interessante resultat innan grunnforskning. I denne historia er ultralyd hovudverktøyet. Ultralyd i faststoff høyrer til området fysikalsk akustikk. Fysikken i historia nedanfor har anar heilt tilbake til oppdaginga av spinnekkjo av Hahn i 1950. Målet med prosjektet var å studere kritiske fenomen ved strukturell faseovergang i fast stoff.

Rett på sak

La oss her like godt hoppe rett ut i den eksperimentelle utfordringa. Rundt 1970 vart det oppdaga at ultralydbølgjer som er genererte av ein piezoelektrisk transducer (givar), kan fasereverserast, eller meir presist, fasekonjugerast. Det vil seie at ei bølge som bevegar seg framover i eit medium, kan kopierast "i flukt" og sendast bakover att utan å ha møtt noko fysisk hindring eller reflekterande flate. Og ikkje berre det, den kan også gjenskape si opprinnelege form dersom den vart deformert av spre-

ingsprosessar på vegen fram. *Forbløffande! Tidsreversjon?* Her trengst først litt terminologi.

Vi vil kalle eit slikt signal *ekko* i samsvar med vanleg vitskapleg praksis. Figur 1 illustrerer skilnaden på reflektert bølge øvst, og ekko nedst. Bølgja startar som ei plan bølge, ein kort puls av mikrosekunds lengde, frå den flate transduceren, T, skravert i figur 1, og går mot høgre (øvre figur, heiltrekt bølgefrent). Den blir reflektert ved høgre enden av krystallen og så kasta mot venstre (prikk bølgefrent). På grunn av inhomogenitetar i materialet, får den returnerande bølga større og større avvik frå plan form, og kan dermed ikkje målast av den plane transduceren, T.



Figur 1. Øvst: Krystall, liggande, med pålimt transducer, T. Emittert bølge (heiltrekt bølgefrent) går mot høgre. Etter refleksjon (stipla): Bølgefrenten blir aukande deformert på grunn av inhomogenitetar i prøven. Nedst: Ved vekselverknad mellom bøljepuls og kortvarig elektrisk felpuls, E, blir det danna ekko som under returen til transduceren går gjennom "tidsreversjon".)

Ekko blir derimot til, som illustrert i figur 1 nedst, når foroverbølga i eit kort tidsintervall vekselverkar med eit høgfrekvent elektrisk felt, E, også dette ein kort puls av mikrosekunds lengde. Tidspunktet for denne bestemmer den som utfører

* Institutt for fysikk, NTNU, Trondheim.

eksperimentet, og avgjer dermed kvar i prøven ekkoet blir til. Ekkobølgja som nå går mot venstre, vil kvar stad på vegen ha same form som foroverbølgja hadde der, og kjem difor tilbake til transducer som ei plan bølge. Den kan nå målast korrekt med den flate transduceren. Både intensitet og lydfart kan nå målast presis. Vi skal halde oss til svært korte pulsar, av mikrosekunds lengde, og typiske frekvensar i området 100–500 MHz. Vi skal vise korleis bruken av ekko mogeleggjør svært avanserte og interessante målingar som tidlegare ikkje kunne utførast.

Det endelege målet, å studere kritiske fenomen ved faseovergangar i faststoff, er eit tema som har stått sentralt i faststoff-fysikken i årtier. I dette tilfellet dreia det seg om perovskitten KMnF_3 . Dette pionerarbeidet innan denne avanserte bruken av ultralyd og fononfysikk, vart utført rundt 1980, hovudsakleg av min dåverande doktorgradsstudent Rune Holt ved Institutt for Teknisk Fysikk, Norges Tekniske Høgskole, nå professor ved Institutt for petroleumsteknologi og anvendt geofysikk ved NTNU. Det nye i dette eksperimentet var at akustisk ekko her ikkje berre var eit interessant fenomen i seg sjølv, men vart teke i praktisk bruk som eit verktøy i grunnforskning. På vegen dit måtte fleire vanskelege barrierar passerast og ny teknologi utviklast. Desse skal vi beskrive etter kvart.

Sterkt forenkla teori

Det akustiske ekkoet $e(\omega, q, t)$ oppstår som ein ulineær effekt ved vekselverknad mellom ein høgfrekvent akustisk puls $Ae^{i(\vec{q}\cdot\vec{x}-\omega t)}$ som bevegar seg med bølgevektor $\vec{q}$ og frekvens ω mot høgre i figur 1, og eit homogent (her x -uavhengig) høgfrekvent elektrisk felt $Ee^{i\Omega t}$, med frekvens Ω . Produktet, med ein vekselverknadsstyrke $\gamma \neq 0$, blir

$$E(\omega, q, t) = \gamma A e^{i(\vec{q}\cdot\vec{x}-\omega t)} \cdot E e^{i\Omega t} = \gamma A E e^{i[\vec{q}\cdot\vec{x} + (-\omega + \Omega)t]} \quad (1)$$

Korleis kan dette vere eit ekko? Vi ser at om vi set $\Omega = 2\omega$, og berre då, blir resultatet

$$e(\omega, q, t) = \gamma A E e^{i(\vec{q}\cdot\vec{x} + \omega t)} \quad (2)$$

Dette er ei bølge som går mot venstre med same lydfart, ω/q , som foroverbølgja, altså eit akustisk ekko som blir skapt av vekselverknaden mellom den akustiske bølga og E-feltet, og berre når E-feltet har akkurat dobbelt så høg frekvens som den akustiske bølga. Det er her nøkkelen til magien

ligg. Nå gjeld det å utnytte dette i praksis. Ein ting er å påvise det interessante fenomenet ekko, ein heilt annan ting å utvikle det som reiskap til å utforske krevjande problem i faste stoff eller i væsker. Det er her arbeidet saman med Rune Holt kjem inn.

Eksperiment

Vi går nå over til det eksperimentelle arbeidet, og tar for oss utfordringane ei etter ei.

Første utfordring

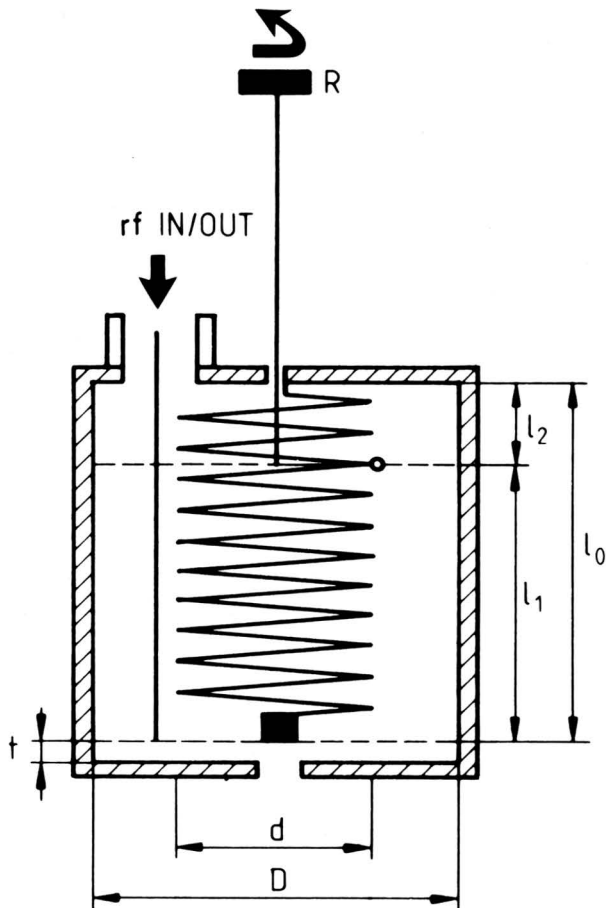
Å generere akustiske pulsar i megahertz-området er basert på bruk av piezoelektrisk transducer, T, limt fast til ein krystall eller anna materiale slik som vist i figur 1.

Ei rekkje resonansfrekvensar for transduceren kan brukast, frå nokre få megahertz til mange hundre megahertz og vidare. Omvendt, ved retur av akustisk puls til transduceren gir den eit elektrisk signal som respons på elastisk deformasjon skapt av bølga. Ved romtemperatur er det relativt greitt å lime saman transducer og prøve, men kva med nedkjøling til -100 eller -200 °C der vårt eksperiment skulle utførast? Alle typar lim vil fryse til fast stoff. Då har vi tre faste material som trekker seg saman ulikt samtidig som dei skal halde fysisk kontakt utan at limet sprekke opp og signalet er tapt. Prøving og feiling har vist at ein type feitt frå kjemilaben ofte gjer jobben. Her gjekk det bra.

Andre utfordring

Korleis skape det elektriske feltet som skal trenge gjennom materialet slik som i figur 1, og samtidig treffe akkurat den frekvensen og det tidspunkt som gir ekko?

For både å skape det høgfrekvente elektriske feltet, og treffe rett frekvens ved ulike val av akustisk frekvens ω måtte det byggjast mikrobølgjekavitatar. Her måtte så den elektriske feltpulsen avfyrast til rett tid, og kunne avstemmast over eit breitt frekvensområde etter behov. Ei stor utfordring. Trass i at mikrobølgjefysikk er å rekne som ein klassisk disiplin, hadde slike breibanda kavitatar ikkje vore utvikla før. Ein ny idé viste seg å gje løysinga: Koparkavitatar med ein innebygd spiral med ein kortsluttingskontakt som delte kaviteten i to delar, som illustrert i figur 2. Det oppstår då eit spektrum av resonansar for kvar innstilling. Ved å flytte kontakten inne i kaviteten kan ein velje frekvens



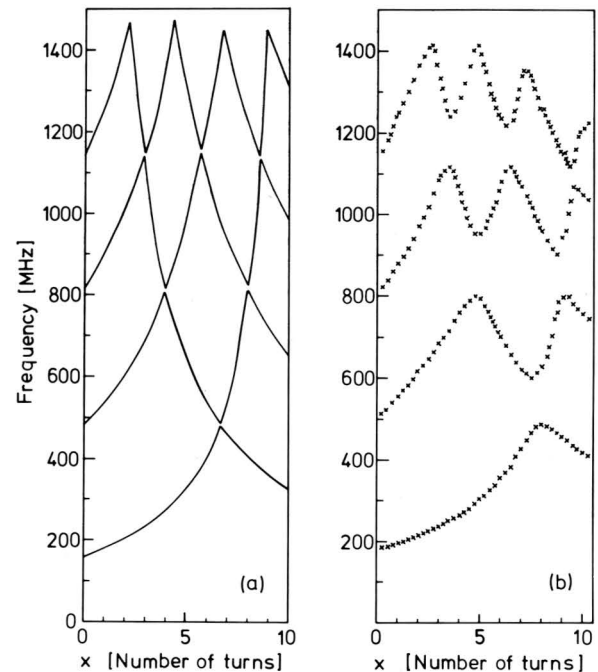
Figur 2. Figuren viser spiralkaviteten med indre diameter, D , antenne (rf IN/OUT) for inn- og utkoping av radiofrekvenssignal (rf), spiral med breidde d og lengde l_0 , delt i to delar, l_1 og l_2 , av kontakten som kan førast langs spiralen ved å dreie stanga som endar i ein knapp, R. Ekkokrystallen blir plassert i holet under enden av spiralen. E-feltet oppstår mellom spiralenden og jord i kavitetsholveggen. Posisjonen for kontakten avgjer resonansfrekvensane for kvar del av kaviteten. Posisjoneringa ("number of turns") gjer det mogeleg å velje $\Omega = 2\omega$ og dermed skape ekko i krystallen.

over eit stort område. Figur 2 viser utforminga av kaviteten, og figur 3 viser spekteret av frekvensar som oppstod, teoretisk i figur 3a og eksperimentelt i figur 3b. Eit frekvensintervall frå 200 til 1400 MHz vart nå tilgjengeleg. Utfordring nr. 2 var løyst.

Tredje utfordring

Å finne eit materiale som gjev kraftig ekko.

Ingen systematisk studie av dette hadde vore publisert. Her galdt det altså å prøve seg fram gjennom tilgjengelege krystallinske materiale. Krystallar som vart prøvde, var mellom anna: $\text{Bi}_{12}\text{SO}_{20}$, LiNbO_3 , LiTaO_3 , LiJO_3 , CdS , TGS (triglysinulfat) og KDP (kaliumdihydrogen-fosfat). Nå hjelpete hellet på ein høgst overraskande måte.



Figur 3. 3a viser teoretiske utstrekningar av resonansfrekvensane i kaviteten som funksjon av posisjon for kontakten som deler den i to. Eitt sett oppovergåande kurver for l_2 -delen, og eitt sett nedovergåande for l_1 -delen viser til saman mogeleg resonansar. 3b viser eksperimentelt resultat, det som verkeleg måtte brukast. For kvart val av akustisk frekvens, ω , må kontakten til spiralen leggjast slik at den får resonans ved 2ω og dermed genererer E-feltet ved denne frekvensen.

Under eit besøk ved Ioffe-instituttet i Leningrad fekk Rune Holt vite at materialet $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO) som Lars Svaasand og medarbeidarar ved Elektroavdelingen ved NTH hadde spesialisert seg på å gro krystallar av, hadde kraftig ekko! Både BGO og $\text{Bi}_{12}\text{SO}_{20}$ (BSO), og LiNbO_3 viste ekkosignal av varierende styrke. Men BGO gav det kraftigaste ekkosignalet, og ville altså vere lovande som "arbeidshest" som ekkogenererande materiale i det vidare eksperimentet. I eit oscilloskopbilete frå laben (figur 4), er den høge frittstående pulsen ekkoet. Dette signalet er mykje sterkare enn dei to refleksane som kjem etter. Dette ekkoet var sterkt nok til å kunne brukast. Tredje utfordring var løyst.

Fjerde utfordring

Materialet vi skulle studere ved å sende ekkoet gjennom det, var perovskitten KMnF_3 , ein nær slektning av SrTiO_3 som K. Alex Müller i Sveits var ein av dei som hadde gjort berømt ved studier av overgangen mellom kubisk og tetragon struktur ved $T_c = 105 \text{ K}$.

Fra Fysikkens Verden

76
~~75~~. årgang
2013/4

Norsk Fysisk Selskap

Oslo 2013/4

ISSN-0015-9247

Innhold FFV 2014

Nr. 1:

Fra Redaktørene	2
<i>Øyvind Grøn</i>	
In Memoriam	2
Fred Kavli (1927–2013)	
<i>Arne T. Skjeltorp</i>	
Fra Fysikkens Verden 75 år	
<i>Thormod Henriksen</i>	4
Hvad vet vi om atomkjernene	
<i>Egil A. Hylleraas</i>	12
Indeks FFV 2013	17
Fysisk Selskap (1909-1924)	
<i>Thormod Henriksen</i>	22
Kr. Birkelands terrellaeksperimenter	
for nordlysstudier 1901-1913	
<i>Terje Brundtland</i>	26
Newtons första och andra lag	
<i>Jonas Persson</i>	31
Trim i FFV	34
Nytt fra NFS	35
Endringer i NFS fra 2014	
<i>Åshild Fredriksen</i>	
Nye Doktorer	35
PhD Tonje Nesse Forland	

Nr. 2:

Frå Redaktørane	38
<i>Emil J. Samuelsen</i>	
In Memoriam	38
Torger W. Holtsmark (1924–2014)	
<i>Arnt Inge Vistnes og Einar Sagstuen</i>	
FFV Gratulerer	39
Johan Moan 70 år	
<i>Erik O. Pettersen</i>	
Øyvind Grøn 70 år	
<i>Iver H. Brevik</i>	
Hvordan strålingstrykk påvirker asteroider	41
<i>Øyvind Grøn</i>	
Solcellerevolusjon med perovskitt	47
<i>Emil J. Samuelsen</i>	
Gravitasjonsbølger fra universets begynnelse?	51
<i>Øyvind Grøn</i>	
Antimaterie fra pulsarer eller mørk materie?	
<i>Sigurd Kirkevold Næss</i>	56
Grafén i fokus	
<i>Emil J. Samuelsen</i>	60
Fysikknytt	62
Nøytrinoastronomi?	
<i>Øyvind Grøn</i>	
Kva skjer	63
Krystallografiåret 2014	
<i>Emil J. Samuelsen</i>	
Kommentar	64
Higgs-bosonet og atomenes masse og eksistens	
<i>Jon-Ivar Skullerud</i>	
Nytt fra NFS	65
Nye styremedlemmer	
<i>Åshild Fredriksen</i>	
Nye medlemmer	
Nye Doktorer	67
PhD Håvard Granlund	
Trim i FFV	67

Nr. 3:

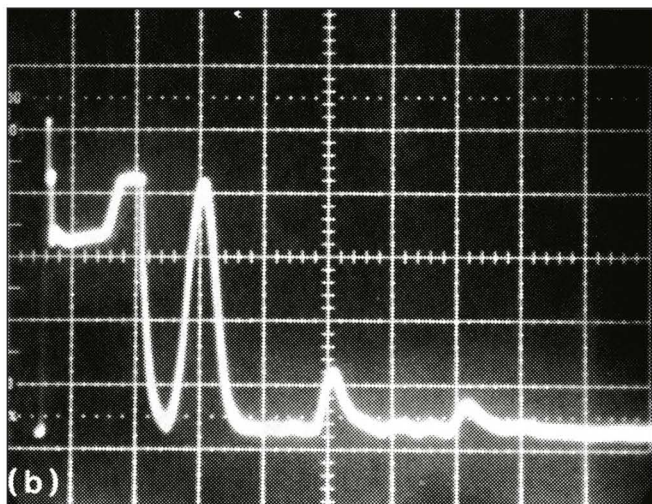
Fra Redaktørene	70
<i>Øyvind Grøn</i>	
In Memoriam	70
Bjørn Landmark (1927–2014)	
<i>A. Egeland, J.A. Holtet, A. Pedersen</i>	
<i>og E.V. Thrane</i>	
FFV Gratulerer	71
Tore Amundsen 80 år	
<i>K. Fossheim, A. Skjeltorp og B. Berre</i>	
Razi Naqvi 70 år	
<i>Anders Johnsson og Thor Bernt Melø</i>	
Jan Olav Eeg 70 år	
<i>Hallstein Høgåsen og Jon Magne Leinaas</i>	
Kavliprisen i astrofysikk 2014:	
Inflasjonskosmologi	75
<i>Øyvind Grøn</i>	
Kavliprisen i nanovitenskap 2014	
<i>Arne Brataas og Emil J. Samuelsen</i>	79
Gasshydrat – og hol i permafrosten	82
<i>Emil J. Samuelsen</i>	
Beregningsbasert mikroskopi	
<i>Dag W. Breiby</i>	87
Fysikknytt	91
Eksotisk partikkel funnet	
<i>Øyvind Grøn</i>	
Hva skjer	91
Fysikkolympiaden 2014	
<i>Øyvind Guldahl</i>	
Nytt fra NFS	93
Det lille fysikermøtet 2014	
<i>Åshild Fredriksen</i>	
Bokomtale	94
Øystein Elgarøy: Astronomi – en kosmisk reise	
Universitetsforlaget, 2014	
<i>Øyvind Grøn</i>	
Professoroppykk ved NTNU	95
Trim i FFV	95

Nr. 4:

Frå Redaktørane	98
<i>Emil J. Samuelsen</i>	
In Memoriam	98
Finn Lied (1916–2014)	
<i>Trygve Røed-Larsen og Eivind Thrane</i>	
Torbjørn Sikkeland (1923–2014)	
<i>Thormod Henriksen</i>	
Tor Jacobsen (1931–2014)	
<i>L. Bugge, K.M. Danielsen, F. Ould-Saada,</i>	
<i>S. Stapnes og S.O. Sørensen</i>	
FFV Gratulerer	101
Eivind Vilhelm Thrane 80 år	
<i>Tom A. Blix, Alv Egeland og Jan A. Holtet</i>	
Yaras Birkelandpris 2014	
til Thomas Gjesteland	
<i>Pål Brekke</i>	
Himmellegemer oppkalt etter	
Sjur Refsdal og Jan-Erik Solheim	
<i>Øyvind Grøn</i>	
Nobelprisen i fysikk 2014	
<i>Helge Weman</i>	104
Nobelprisen i kjemi 2014	
<i>Catharina de Lange Davies</i>	107
Lungenes rensesystem og radondoser	110
<i>Thormod Henriksen</i>	
Når skilir stigen?	117
<i>E.H. Hauge</i>	
Hva skjer	119
Norsk nanoteknologiforskning i 10 år	
<i>Emil J. Samuelsen</i>	
Birkelandforelesningen 2014	
<i>Jan Holtet</i>	
Nye Doktorer	121
PhD Vegard Rekaa	
Trim i FFV	122
International Year of Light	123

Forfatterregister 2014

<i>Bliz, Tom A., Alv Egeland og Jan A. Holtet:</i> FFV Gratulerer: Eivind Vilhelm Thrane 80 år 101	<i>Hauge, E.H.:</i> Når skilir stigen? 117
<i>Brataas, Arne og Emil J. Samuelsen:</i> Kavliprisen i nanovitenskap 2014 79	<i>Henriksen, Thormod:</i> Fra Fysikkens Verden 75 år 4
<i>Breiby, Dag W.:</i> Beregningsbasert mikroskopi 87	<i>Henriksen, Thormod:</i> Fysisk Selskap (1909–1924) 22
<i>Brekke, Pål:</i> FFV Gratulerer: Yaras Birkelandpris 2014 til Thomas Gjesteland 102	<i>Henriksen, Thormod:</i> In Memoriam: Torbjørn Sikkeland (1923–2014) 99
<i>Brevik, Iver H.:</i> FFV Gratulerer: Øyvind Grøn 70 år 40	<i>Henriksen, Thormod:</i> Lungenes rensesystem og radondoser 110
<i>Brundtland, Terje:</i> Kr. Birkelands terrellaeksperiment for nordlysstudier 1901–1913 26	<i>Holtet, Jan:</i> Hva skjer: Birkelandforelesningen 2014 120
<i>Bugge, L., K.M. Danielsen, F. Ould-Saada o.fl.:</i> In Memoriam: Tor Jacobsen (1931–2014) 100	<i>Hylleraas, Egil A.:</i> Hvad vet vi om atomkjernene 12
<i>Davies, Catharina de Lange:</i> Nobelprisen i kjemi 2014 107	<i>Høgåsen, Hallstein og Jan Magne Leinaas:</i> FFV Gratulerer: Jan Olav Eeg 70 år 74
<i>Egeland, A., J.A. Holtet, A. Pedersen og E.V. Thrane</i> In Memoriam: Bjørn Landmark (1927–2014) 70	<i>Johnssen, Anders og Tor Bernt Melø:</i> FFV Gratulerer: Razi Naqvi 70 år 73
<i>Fossheim, Kristian, Arne Skjeltorp og Bjørn Berre:</i> FFV Gratulerer: Tore Amundsen 80 år 71	<i>Næss, Sigurd Kirkevold:</i> Antimaterie fra pulsarer eller mørk materie? 56
<i>Fredriksen, Åshild:</i> Nytt fra NFS: Endringer i NFS fra 2014 35	<i>Persson, Jonas:</i> Newtons första och andra lag 31
<i>Fredriksen, Åshild:</i> Nytt fra NFS: Nye styremedlemmer, Faggruppemøter, IYL 2015 65	<i>Pettersen, Erik O.:</i> FFV Gratulerer: Johan Moan 70 år 39
<i>Fredriksen, Åshild:</i> Nytt fra NFS: Det lille fysikermøtet 2014 93	<i>Røed-Larsen, Trygve og Eivind Thrane:</i> In Memoriam: Finn Lied (1916–2014) 98
<i>Grøn, Øyvind:</i> Fra Redaktørene 2	<i>Samuelsen, Emil J.:</i> Frå Redaktørane 38
<i>Grøn, Øyvind:</i> Hvordan strålingstrykk påvirker asteroiders bevegelser 41	<i>Samuelsen, Emil J.:</i> Solcellerevolusjon med perovskitt 47
<i>Grøn, Øyvind:</i> Gravitasjonsbølger fra universets begynnelse? 51	<i>Samuelsen, Emil J.:</i> Grafén i fokus 60
<i>Grøn, Øyvind:</i> Fysikknytt: Nøytrinoastronomi? 62	<i>Samuelsen, Emil J.:</i> Kva skjer: Krystallografiåret 2014 63
<i>Grøn, Øyvind:</i> Fra Redaktørene 70	<i>Samuelsen, Emil J.:</i> Gasshydrat – og hol i permafrosten 82
<i>Grøn, Øyvind:</i> Kavliprisen i astrofysikk 2014: Inflasjonsskosmologi 75	<i>Samuelsen, Emil J.:</i> Frå Redaktørane 98
<i>Grøn, Øyvind:</i> Fysikknytt: Eksotisk partikkel funnet 91	<i>Samuelsen, Emil J.:</i> Kva skjer: Norsk nanoteknologiforskning i 10 år 119
<i>Grøn, Øyvind G.:</i> Bokomtale: Øystein Elgarøy: Astronomi – en kosmisk reise. Universitetsforlaget 2014 94	<i>Skjeltorp, Arne T.:</i> In Memoriam: Fred Kavli (1927–2013) 2
<i>Grøn, Øyvind:</i> FFV Gratulerer: Himmellegemer oppkalt etter Sjur Refsdal og Jan-Erik Solheim 103	<i>Skullerud, Jon-Ivar:</i> Kommentar: Higgs-bosonet og atomenes masse og eksistens 64
<i>Guldahl, Øyvind:</i> Hva skjer: Fysikkolympiaden 2014 91	<i>Vistnes, Arnt Inge og Einar Sagstuen:</i> In Memoriam: Torger W. Holtmark (1924–2014) 38
	<i>Weman, Helge:</i> Nobelprisen i fysikk 2014 104



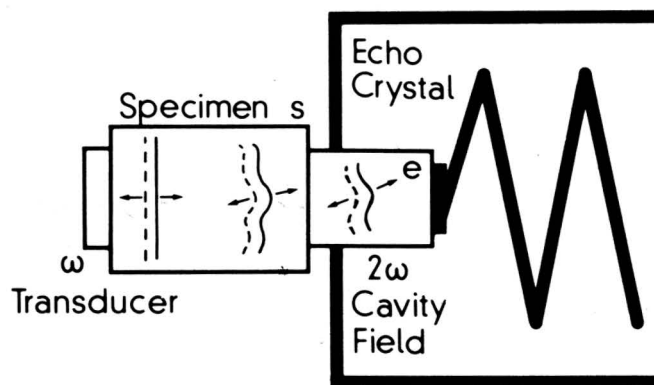
Figur 4. Figuren viser styrken i signalet transduceren, T, registrerer som funksjon av tid målt på mikrosekundskala med BGO som elektromateriale. Den kraftige pulsen ved tredje tidslinje er ekkoet. Signalet før det er lekkasjesignal frå sendar til mottakar. Dei to neste er refleksjonar i krystallen.

(Dette var lenge før Müller gjorde den store oppdaginga av kuprat superleiar saman med J.G. Bednorz, og fekk Nobelpris for det.) Her hadde Bjørn Berre og eg samarbeidd med Müller og påvist kritisk oppførsel, det vil seie sterkt auka damping av ultralyd når ein nærmar seg den kritiske temperaturen T_c der faseovergangen skjer. Denne oppførselen blir enklast uttrykt ved såkalla kritisk eksponent ρ , for temperaturavhengig ultralyddamping. Dette var eit skikkeleg "hot" tema i den tida då kritiske fenomen stod høgt på dagsorden i fysikken på 60-, 70- og 80-talet. Teorien sa at dempinga, α , av akustiske bølger skal følgje uttrykket

$$\alpha = \alpha_0 \omega^2 \left(\frac{T - T_c}{T_c} \right)^{-\rho} \equiv \alpha_0 \omega^2 t^{-\rho} \quad (3)$$

Det vil seie at dempinga divergerer når ein nærmar seg faseovergangen ved T_c . Her var då målet å bestemme eksponenten ρ .

Til krystallen av KMnF_3 (*specimen s* i figur 5) vart det nå den piezoelektriske sende- og mottakar-krystallen limt fast, vist heilt til venstre i figur 5, og ekkomaterialet BGO vart limt til den andre enden, som vist til høgre i figur 5. Med BGO plassert inn i den nyutvikla mikrobølgekaviteten som vist forenkla, kunne vi vone på det vesle mirakelet at dei uønskete effektane av inhomogenitet i materialet skulle bli overvunne av ekkoet. Det elektriske feltet i BGO som vekselverkar med den akustiske bølga, oppstår mellom elektroden som avsluttar spiralen og holet i veggjen av kaviteten. Systemet var dess-



Figur 5. Figuren viser spiralkaviteten liggande med ekkokrystall på plass, og med prøven ("specimen") limt til denne. Transduceren som både gir og detekterer akustisk signal er limt til vensstre enden av prøven. E-feltet (" 2ω cavity field") oppstår mellom enden av spiralen og periferien av holet i kavitetsveggen.

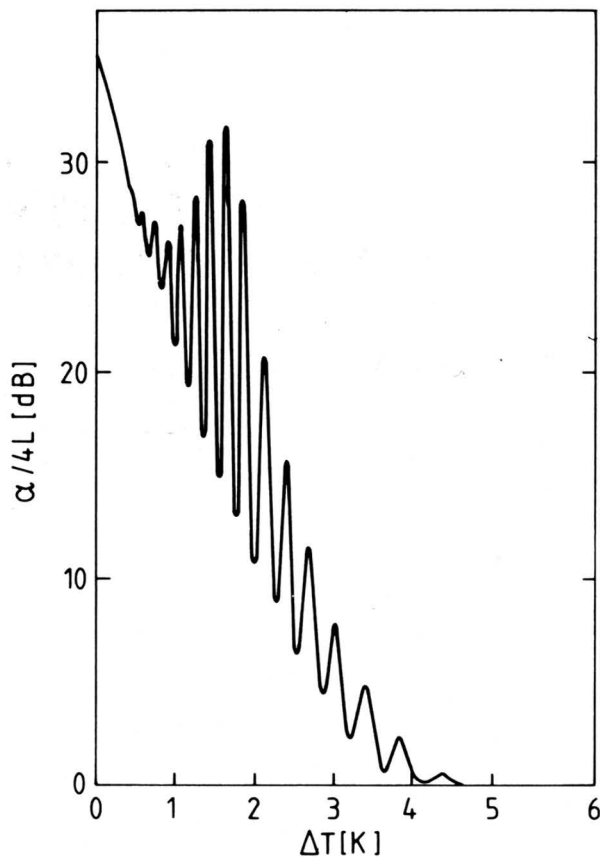
utan bygd inn i eit rom med tilnærma millikelvin temperaturkontroll.

KMnF_3 har same type strukturell faseovergang som SrTiO_3 , men med $T_c = 187$ K. Nå skulle vi for det første utforske statisk kritisk oppførsel, dvs. måle ρ . I tillegg skulle det også undersøkast om kritisk dampingseksponent, ρ , for temperaturavhengigheit nær T_c varierar med frekvensen, det vi kallar kritisk dynamisk oppførsel. Dette var eit problem som var endå meir krevjande enn å studere såkalla statiske eksponentar. Her gjaldt det å ha førsteklasses eksperimentell metode. Det store problemet var at nær faseovergang blir ein kvar liten inhomogenitet i materialet problematisk ved at lydfarten varierer lokalt med både spenningar og ørsmå variasjonar i samansetting i materialet. Ingen krystallar er feilfrie. Med sterkt temperaturavhengig lydfart nær T_c , vil dermed variasjon i komposisjon og spenningar forvrengje bølgefrenten på lydbølgjene kraftig. Det var her ekkoteknikken skulle komme inn og vonleg rydde opp.

Det var ein spennande dag då eksperimentet endeleg skulle prøvast. To skrivarar var kopla til. Den eine registrerte eit reflektert signal, og den andre registrerte ekkosignalet.

Resultatet var slående. Ja, verkeleg ei fascinerande oppleving i laboratoriet!

Figur 6a og 6b viser dei to dempingskurvene inn mot T_c . Her er $\Delta T = T - T_c$. Kurva som er målt med refleksjonssignalet svingar opp og ned når temperaturen nærmar seg faseovergangen ved 187 K. Dette skuldast interferens mellom ulike delar av bølgefrenten på grunn av påverknad frå inhomogenitetane i prøva. Den andre går roleg inn mot



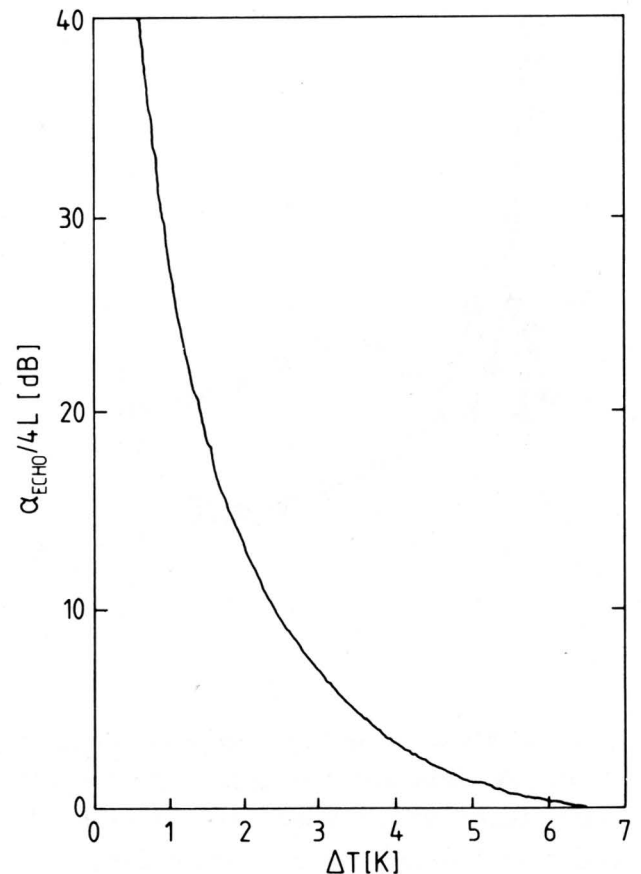
Figur 6a. Figuren viser korleis dempinga, α , målt i decibel, av ultralydbølgjene aukar inn mot kritisk temperatur, T_c , målt med refleksjonssignal. Her er interferens. Dette kan ikkje tolkast med omsyn til kritisk oppførsel.

faseovergangen mens dempinga aukar veldig sterkt. Interferensen er borte her. Ekkoet gjer jobben. "Magien" fungerer. Fasereversjon fungerer også i denne nye situasjonen, ein teknikk som ingen før hadde prøvt. Det var ei sjeldan fin oppleving i laboratoriet, eit høgdepunkt. Så vidt vi veit, har ingen gjort det etter trass i at det kom gjester langvegs frå for å studere teknikken.

Femte utfordring

Ville så kvaliteten av data vere god nok til å foreta alle dei målingar og analysar som vidare trongst, med ei lang rekkje temperaturkontrollerte ultralydmålingar ved ulike frekvensar og ulike krystallretningar?

Rune Holt gjorde eit omfattande arbeid, med grundig gjennomgang av teoretisk litteratur og analysar i relasjon til denne. Målingane kom til å fastlegge eksponenten ρ i likning (3) til verdien $\rho = 1,87 \pm 0,05$ for alle temperaturar der T var meir enn 1-2 °C over T_c , i samsvar med publiserte teoriar av K.K. Murata og F. Schwabel. Ved



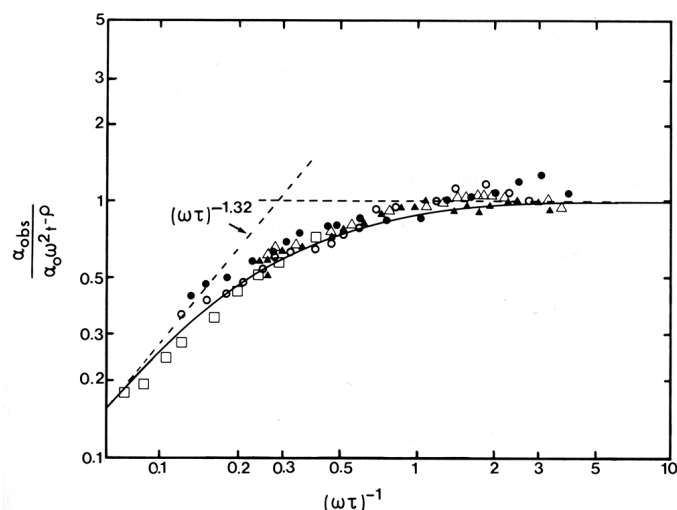
Figur 6b. Figuren viser korleis dempinga, α , av ultralydbølgjene auka inn mot kritisk temperatur, T_c , målt med ekkosignalet. Denne, og liknande målingar ved andre frekvensar og i andre krystallretningar, kunne så analyserast slik som i figur 7.

temperaturar nærare T_c kom eit anna fenomen inn i biletet. Enkelt sagt vil små fluktuasjonar av lågtemperaturfasen prøve å eksistere like over T_c . Desse fluktuasjonane har ei karakteristisk tid, τ , som også varierer inn mot faseovergangen. Her vil i følge teorien, forholdet mellom perioden for bølga, $\omega/2\pi$, og den karakteristiske relaksasjonstida for fluktuasjonane, τ , komme inn som ein faktor gjennom produktet $\omega\tau$ og redusere dempinga relativt til likning (3). Plottet i figur 7 analyserer dette.

Alle data er her kondenserte ned i eitt skaleringsdiagram som oppsummerte dei dynamiske kritiske eigenskapane, her gjennom avhengigheit av $(\omega\tau)^{-1}$, i ein figur. Sjå figur 7 og tekst til denne.

Diskusjon

Dette arbeidet er blitt ståande som konklusjonen på dynamisk kritisk oppførsel i denne typen faseovergang. (Dataanalysen og teorien er diverre altfor omfattande til å ta opp her. For ein interessert lesar er



Figur 7. Figuren viser eit konsentrert plott for damping av ultralyd i ein krystallretning, [110], ved ulike frekvensar i KMnF_3 : $\circ$ 95, $\bullet$ 155, $\square$ 305, $\star$ 345 og $\triangle$ 470 MHz. Den heiltrekte lina er gjennomsnittet av data i alle retningar i prøven og ved alle målte frekvensar. Alle måldata er normaliserte mot uttrykket i likning (3) med den bestemte verdien av $\rho = 1,87$.

Rune Holts avhandling den aller beste litteraturen).

Arbeidet vekte oppsikt og vart følgd med inviterte foredrag i USA og Europa. Det fann sin naturlege plass i *Physical Review Letters* og i ein 80-siders artikkel i bokserien *Physical Acoustics* i USA, og i proceedings frå ein NATO sommarskole i Frankrike osv. Rune fekk mellom anna tilbod om postdoktor-stilling i Tyskland. Han valde NTNU, og er som nemnt professor her og SINTEF-forskar.

Ovanfor stilte vi spørsmål om tidsreversjon. Sjølv om det vi har kalla "magi" fungerer, betyr det sjølvsagt ikkje strengt sagt at tidsreversjon er realisert, eksempelvis har vi tap av energi som er irreversible prosessar. Likevel blir uttrykket "tidsreversjon" ofte brukt i litteraturen, særleg om fasekonjugert ultralyd i væsker med liten damping. Analoge fenomen finst ved bruk av lys. Spinnekkko er som alt nemnt, eit fenomen i same klasse. Men det er viktig å skilje mellom ekkofenomen som representerer berre ein type ordningsprosessar som i spinnekkko, og bølger som forplantar seg i rommet, som lyd og lys. Det er her ein får denne kjensla av magi.

Det er interessant å merke seg den vidare utviklinga innan akustisk fasekonjugering. Ei gruppe leia av Mathias Fink ved École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris, har seinare utvikla teknikken til det som nå blir kalla "acoustic time-reversal mirror". Eksempelvis blir slike metodar brukt medisinsk til å knuse nyrestein. Ei rekkje andre anvendelsar er

nå aktuelle, eksempelvis i kommunikasjon mellom ubåtar. Men mens arbeidet vi utførde berre trengde ein krystall til fasekonjugering, brukar Paris-gruppa typisk ei samling av 100 små krystallar til å detektere bølgefrenten, lagre den og sende den ut att for å oppnå det dei kallar tidsreversjon.

Etterord

Det kan vere interessant å komplettere historia med korleis arbeidet starta.

Under eit års opphald ved IBM *Thomas J Watson Research Center* i Yorktown Heights, New York, 1975-76, gjorde eg mitt første arbeid med akustiske ekkofenomen saman med andre forskarar der. Det var under dette opphaldet eg fekk ideen til eksperimentet som er omtala ovanfor. I eit 1-sides brev til Rune Holt som var i militærteneste ved FFI, gjorde eg greie for forslaget til doktorgradsprosjekt. Rune kom til Trondheim og gjekk modig laus på alle utfordringane. Alt vart gjennomført som foreslått i notatet. Rune Holts monografiske doktoravhandling er eit godt døme på korleis frittstående, ambisiøse prosjekt kan gje framifrå resultat.

Referanse

1. Rune Martin Holt: *Development and application of phonon echo technique in phase transition studies*. Dr.ing.-avhandling. Institutt for teknisk fysikk, Norges Tekniske Høgskole, (1980)

Alle figurar er frå Rune Holts avhandling, men er også brukte i ymse andre publikasjonar.

∞

Husk å melde
adresseforandring
til sekretæren
i NFS!

Eksperimentet som aldri ble utført

Jonas Persson *

Det sies at Galileo Galilei slapp to kuler fra Det skjeve tårn i Pisa, og at Isaac Newton fikk ideen om gravitasjonsloven da han fikk et eple i hodet. Dette er myter. Disse hendelsene har ikke inntruffet. Det finnes også eksperimenter som har blitt utført, men ikke dreide seg om det som ofte skrives i dag. Jeg skal her omtale et slikt eksperiment, det berømte Cavendish-eksperimentet.

”Cavendish-forsøket” og eksperimentet til Cavendish

Mange kjenner til Cavendish-forsøket (<http://no.wikipedia.org/wiki/Cavendish-eksperimentet>) hvor man med en torsjonspendel kan bestemme gravitasjonskonstanten, G , ved å måle vinkelutslaget over tid. Man bruker riktig nok et forsøksoppsett som har sin opprinnelse i oppsettet Cavendish brukte, men dette har senere blitt forbedret på mange måter. Mer interessant er det at i lærebøker og laboratorieinstruksjoner står at forsøket opprinnelig handlet om å bestemme G , og i noen tilfeller hevdes det at Cavendish ”veide jorda”. Dette anses som allment kjent kunnskap som manifesterer seg i mange ulike bøker i fysikk, f.eks. i den mye brukte læreboka *University Physics*.⁽¹⁾ Et stort antall andre forfattere begår samme feil, til og med når de refererer til Cavendishs originale artikkel fra 1798.⁽²⁾ Om vi ser på tittelen på det originale arbeidet til Cavendish, *Experiments to determine the density of the earth*, er det klart at de ikke kan ha lest hverken tittelen eller artikkelen. (Originalartikkelen er tilgjengelig på Internett og kan anbefales: <http://rsl.royalsocietypublishing.org/content/88/469.full.pdf> eller <http://www.phys.ufl.edu/det/effsource/1798Cavendish.pdf>).

Den viktigste grunnen til at Cavendish ikke kunne ha bestemt G med forsøket sitt, er at tanken om at dette var viktig ikke eksisterte på den tiden. Newton hadde gravitasjonskonstanten med i sin

teori, men man anså ikke før på slutten av 1800-tallet at det var mulig å bestemme denne gjennom målinger på jorda. Det er mulig å bestemme G gjennom Cavendish-forsøket, men han selv gjorde ikke det siden den tidens forestillingsverden ikke åpnet for dette.

Det Cavendish gjorde handlet om et mye mer jordnært eksperiment. Han ønsket å bestemme jordas tetthet relativt til tettheten for vann, noe som var av interesse på den tiden. Han kunne ha beregnet jordas masse, men det var ikke dette som var formålet med eksperimentet, og dermed var det ikke av interesse for Cavendish. Som i mange andre tilfeller handler dette om å være bevisst på hva som kan være interessant, og å være åpen for å gå videre med sine resultater. Ofte er man bare fokusert på hva som er målet med eksperimentet og ser ikke videre enn dette.

Henry Cavendish

Henry Cavendish (1731–1810) var en britisk vitenskapsmann innen kjemi og fysikk, og oppdaget hydrogen (1766). Han var svært folkesky og unngikk kontakt med andre mennesker. Middagene på Royal Society ville han likevel ikke gå glipp av, og der var han et høyt verdsatt medlem. Hans kontakt med andre var ellers meget begrenset. Blyghet gjorde at han ofte unnlot å publisere sine arbeider, og hans kolleger visste lite om hva han holdt på med. Lenge etter hans død gikk James Clerk Maxwell gjennom hans notater og fant flere oppdagelser som andre siden hadde kommet fram til. Blant disse er: Ohms lov, Daltons lov om partialtrykk, prinsippene for elektrisk konduktivitet (inkludert Coulombs lov) og Charles lov for gasser. Hans upubliserte arbeid om varme (1783–1790) beskrives som det eneste arbeidet fra 1700-tallet med en mekanisk teori for varme. Forsøket med å bestemme jordas tetthet, som ble publisert, var bare ett i en lang rekke eksperimenter som han utførte med stor innsikt og presisjon. Cavendish-laboratoriet, etablert til minne om Cavendish, ble åpnet av hans slektninger i 1874

* Program for lærerutdanning, NTNU, Trondheim.



Figur 1. Henry Cavendish, med autograf.

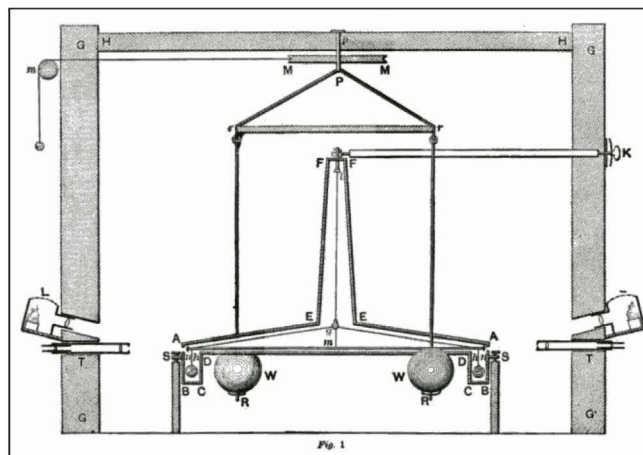
med Maxwell som en viktig pådriver. Maxwell ble også den første Cavendish-professoren ved University of Cambridge.

Oppsettet i Cavendish sitt eksperiment

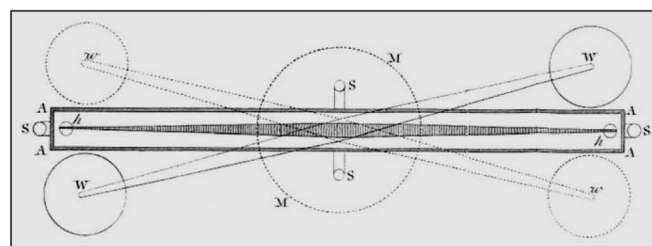
Forsøksoppsettet som Cavendish benyttet seg av, var opprinnelig utviklet av John Michell, som dessverre ikke rakk å oppfylle sine intensjoner før han døde i 1793. Cavendish, som var blant de mer velstående i England på den tiden, var en av de få som både hadde mulighet til å ta i bruk utstyret og som hadde plass til det. Han overtok apparaturen fra Francis Wollaston, som igjen hadde fått tak i det etter Michells død.

John Michell (1724–1793) var en britisk prest og naturforsker som i dag er nesten helt glemt. Han startet med studier i geologi og var den første til å beskrive hvordan magnetisme avhenger kvadratisk av avstanden fra en magnetpol. Foruten å konstruere oppsettet for Cavendish sitt eksperiment, er han mest kjent for å ha postulert (newtonske) sorte hull.

Cavendish beskriver oppsettet for eksperimentet i detaljer i sin artikkel,⁽²⁾ hvor det inngår detaljerte tegninger (figur 2 og 3). Apparaturen ble plassert i et eget rom for å minimere feil på grunn av luftbevegelser og vibrasjoner. Observasjonene ble gjort utenfra ved hjelp av et system med teleskoper (T) og lamper (L) (se figur 2 og 3) for å kunne



Figur 2. Cavendish sitt oppsett, vertikalt tverrsnitt, fra originalartikkelen.⁽²⁾ T: teleskop. L: lamper. TK: skruesystem. W: Store blykuler.



Figur 3. Cavendish sitt oppsett, horisontalt tverrsnitt, fra originalartikkelen.⁽²⁾

avlese måleskalaen (s). Oppløsningen Cavendish oppnådde var ca 1/100 inch (jeg velger å angi de målene som Cavendish bruker i sin artikkel, 1 inch $\approx$ 2,54 cm). To små blykuler (2 inches i diameter) ble hengt opp på en lett arm som var festet til en torsjonstråd (gl) med en lengde på 40 inches. De to små kulene tiltrekkes av to store blykuler (W) (2439000 grains, eller ca 158 kg), noe som gir en vridende kraft på armen. Cavendish regnet ut at kraften som de to kulene ble utsatt for var 1 til 50 millioner i forhold til deres tyngde, eller i størrelsesorden 2×10^{-7} N. Kraften kunne avleses som forskyvning av armen. For å unngå feil på grunn av luftstrømmer, ble de små kulene plassert i en trekasse. Konstruksjonen gjorde det mulig å manipulere plasseringen av de små kulene ved hjelp av et skruesystem (FK). De store blykulene (W) var plassert utenfor trekassen og kunne dermed manipuleres utenfra.

Forsøksoppstillingen, illustrert i figurene 2 og 3, skiller seg fra hvordan forsøket i våre dager blir beskrevet og rekonstruert, hovedsakelig gjennom hvordan de store massene er hengt opp. Charles-Augustin de Coulomb hadde tidligere gjort tilsvarende eksperimenter med elektriske lad-

ninger, men Michell hadde konstruert sitt oppsett uavhengig av, og uten kjennskap til, dette.

Cavendish utførte til sammen 17 relaterte forsøk med noen variasjoner. En tabell med resultatene av disse forsøkene er gitt i originalartikkelen,⁽²⁾ og er gjengitt i figur 4 her. Kolonne nr. 2 viser startposisjon for armen og retningen på bevegelsen. 3. og 5. kolonne viser forskyvning og hvor lang tid forskyvningen tok. Det er verdt å merke seg at Cavendish fant at torsjonstråden som ble brukt i de tre første forsøkene ikke var stiv nok, men ble deformert, slik at den ble erstattet med en stivere tråd.

The following Table contains the Result of the Experiments.

Exper.	Mot. weight	Mot. arm	Do. corr.	Time vib	Do. corr.	Density.
1	m. to +	14,32	13,42	14,55	-	5,5
	+ to m.	14,1	13,17			5,61
2	m. to +	15,87	14,69	14,42	-	4,88
	+ to m.	15,45	14,14			5,07
3	m. to +	15,22	13,56	14,39	-	5,26
	+ to m.	14,5	13,28			5,55
4	m. to +	3,1	2,95	7,1	-	5,36
	+ to m.	6,18	-			5,29
5	m. to +	5,92	-	7,3	-	5,58
	+ to m.	5,9	-			5,65
6	m. to +	5,98	-	7,5	-	5,57
	+ to m.	5,98	-			5,57
7	m. to +	3,03	2,9	7,4	-	5,53
	+ to m.	5,9	5,71			5,62
8	m. to +	3,15	3,03	7,4	-	5,29
	+ to m.	6,1	5,9			5,44
9	m. to +	3,13	3,00	7,4	-	5,34
	+ to m.	5,72	5,54			5,79
10	m. to +	6,32	-	6,58	-	5,1
	+ to m.	6,15	-			5,27
11	m. to +	6,07	-	7,1	-	5,39
	+ to m.	6,07	-			5,42
12	m. to +	6,09	-	7,3	-	5,47
	+ to m.	6,12	-			5,63
13	m. to +	5,97	-	7,7	-	5,34
	+ to m.	6,27	-			5,46
14	m. to +	6,13	-	7,6	-	5,3
	+ to m.	6,34	-			5,75
15	m. to +	6,1	-	7,16	-	5,68
	+ to m.	5,78	-			5,85
16	m. to +	5,64	-	7,2	-	5,85
	+ to m.	5,64	-			5,85

Figur 4. Måleresultatene til Cavendish, gjengitt fra originalartikkelen.⁽²⁾ 2. kolonne: Startposisjon og bevegelsesretning. 3. kolonne: Forskyvning i enheter av 1/766 grader. 5. kolonne: Relativ densitet for jorda.

Cavendish sin analyse av resultatene

Cavendish sin analyse var basert på at armen som holder de små blykulae er masseløs, og at bevegelsen til armen kan betraktes som en matematisk pendel. Siden det er en horisontal pendel, får den ingen påvirkning fra tyngdefeltet. Som referanse brukte Cavendish en lokal sekundpendel, altså en

pendel med svingetid på ett sekund.

Armens lengde (36,65 inches) og sekundpendelens lengde (39,14 inches) gir at svingetiden for pendelen blir $\sqrt{\frac{36,65}{39,14}}$ s. Fra dette konkluderer han at om en ytre kraft virker slik at svingetiden for armen blir N sekunder, må kraften som virker på armen og forårsaker et utslag med vinkel A , forholde seg til blykulas tyngde som $\frac{F_W}{W_x} \propto \sin A \times \frac{1}{N^2} \times \frac{36,65}{39,14}$, der W_x er tyngden av den lille blykula og F_W er kraften mellom den lille og den store blykula. Vinkelen A kan leses av som utslag på en skala målt i andeler av skalaen hvor hver andel tilsvarer $\frac{1}{766}$ grader. Uttrykt ved antall skalaandeler, som benevnes B , kan kraftforholdet finnes som $\frac{F_W}{W_x} \propto \frac{1}{818 \times N^2} \times B$.

Vi kan i mer moderne termer si at Cavendish observerer at en pendel som påvirkes av en (gravitasjons)kraft har en svingetid på ett sekund for en viss lengde av pendelen. Siden den horisontale pendelen ikke har samme lengde som sekundpendelen, gjøres en korreksjon ($\sqrt{\frac{36,65}{39,14}}$). Her relateres svingetiden (N) til en kraft som virker (gravitasjonskraften) fra blykulene i horisontalplanet, som gir at forholdet mellom kreftene blir $\frac{F_W}{W_x} \propto \frac{1}{818 \times N^2} \times B$.

Gravitasjonskraften mellom blykulene ($\frac{F_W}{W_x}$) relaterte Cavendish til jordas tetthet ved først å relatere den store blykulas masse og gravitasjonskraft til tilsvarende for en vannklue med volum én kubikkfot. På denne måten kunne han bruke vannets tetthet som referanse, dvs. vannets tetthet settes lik 1. De store blykulene veide ca 158 kg, eller 10,64 ganger mer enn vannkula. Dette gir en faktor 10,64 i utregningen. Radius for en sfærisk kubikkfot er 6 inches, og siden avstanden mellom blykulene (den store og den lille) er 8,85 inches, bli den relative kraften som virker på en masse plassert på overflaten av kubikkfoten med vann $10,64 \times 0,9779 \times \left(\frac{6}{8,85}\right)^2$. Her innførte Cavendish en geometrisk korreksjon (0,9779) for å få avstanden riktig (den lille blykula beveger seg langs en sirkelbue som gjør at avstanden til sentrum av den store massen ikke blir lik 1, men må korrigeres).

Neste trinn var å sammenlikne med en tilsvarende kraft som virker på en masse som virker på jordas overflate, altså den lille blykulas tyngde ved jordas overflate sammenliknet med kraften fra vannkulen. Denne kraften kan uttrykkes ved jordas diameter ($d_E = 41800000$ feet) og forholdet mellom jordas tetthet (D) og vannets tetthet. Forholdet mellom kreftene blir da $\frac{F_W}{W_x} \propto 10,64 \times 0,9779 \times \left(\frac{6}{8,85}\right)^2 \times \frac{1}{D} \times \frac{1}{d_E}$, eller som utledet nedenfor: $\frac{F_W}{W_x} \propto \frac{1}{8739000 \times D}$.

I dette resonnementet gjøres det direkte bruk av Newtons gravitasjonslov, selv om Cavendish ikke beskrev det slik. Dette gjør han ved først å erstatte blykula med en tenkt kule av vann for å få en referanse til vannets tetthet, og innføre en korreksjon med hensyn på avstand, geometri og tetthet for bly ($C=10,64 \times 0,9779 \times \left(\frac{6}{8,85}\right)^2$). Det ble da mulig å gjøre en sammenlikning mellom vannkula og jordkloden:

$$\frac{F_W}{W_x} \propto C \frac{GM_{\text{vann}}}{r_{\text{vann}}^2} \times \frac{r_{\text{jord}}^2}{GM_{\text{jord}}} \propto C \frac{M_{\text{vann}}}{r_{\text{vann}}^2} \times \frac{r_{\text{jord}}^2}{M_{\text{jord}}}$$

eller med densiteter:

$$\frac{F_W}{W_x} \propto C \frac{\rho_{\text{vann}} \times r_{\text{vann}}^3}{r_{\text{vann}}^2} \times \frac{r_{\text{jord}}^2}{\rho_{\text{jord}} \times r_{\text{jord}}^3} \propto C \frac{\rho_{\text{vann}}}{\rho_{\text{jord}}} \times \frac{r_{\text{vann}}}{r_{\text{jord}}}$$

$$\propto C \times \frac{1}{D} \times \frac{1}{d_E}$$

hvor jordas diameter gis i fot.

Dette gjorde det mulig å uttrykke jordas tetthet ved hjelp av vannets tetthet som $D = \frac{N^2}{10844 \times B}$. Her gjorde Cavendish et antall korreksjoner for å få den endelige verdien. Det var ut fra dette resonnementet og målingene i figur 4, mulig å finne en middelerdi for jordas tetthet. Merk at verdiene i tabellen for B må divideres med 2. Middeltettheten som Cavendish kom fram til var 5,48 ganger større enn tettheten for vann, senere korrigert av Francis Baily til 5,448 ganger vannets tetthet. Dette var Cavendish sitt resultat; han bestemte aldri G eller gikk videre for å bestemme jordas masse. Merk at siden Cavendish ikke hadde tilgang til et enhetssystem var alle resultater relative til en referanse, i dette tilfelle vannets tetthet.

Bestemmelse av G

Den første eksperimentelle bestemmelsen av G ble gjort av John H. Poynting, som publiserte dette i 1891.⁽³⁾ Her var han tydelig på at det var nettopp Newtons gravitasjonslov som var viktig. Han hadde med andre ord flyttet fokus fra en bestemmelse av en spesifikk størrelse (jordas tetthet) til det grunnleggende prinsippet (Newtons gravitasjonslov), og la derved grunnlaget for å ta et skritt videre. Det var mulig å bruke måleresultatene til Cavendish for å finne en verdi for G , noe som trolig til dels er opphavet til kvasihistorien om at Cavendish bestemte G . Poynting og andre senere forskere, utviklet forbedrede versjoner av det oppsettet Cavendish brukte, og det gav dermed mer presise måleresultater. Selv med mye arbeid for å bestemme G , er det den av fysikkens fundamentale konstanter som er bestemt med minst nøyaktighet, så her er det mye arbeid som gjenstår.

Avsluttende kommentarer

Man liker å tro at det som står i lærebøker er korrekt, men dette er dessverre ikke alltid tilfelle. Av pedagogiske hensyn har man inkludert menneskelige aspekter av fysikken, eller rettere sagt den historiske utviklingen av fysikken, for å gjøre den mer forståelig og for å gi den "et menneskelig ansikt". Selv om det er viktig å forstå hvordan utviklingen har foregått, kan framstillingen lett tilsløre at det ikke har vært en lett vei å gå. Hvis man velger å gi et forenklet bilde kan dette virke demotiverende på elever som strever med å forstå innholdet. Et inntrykk av at det var enkelt for dem som utviklet fysikken gjør det ikke lettere. Om man i stedet viser at dette var og er vanskelig, kan man derimot styrke elevens selvtillit og gjøre det lettere å akseptere problemene.

At man i tillegg presenterer en usann historie gjør ikke saken bedre. Et viktig, men oversett aspekt er at det ikke var mulig for Cavendish å finne en verdi for G , siden han ikke hadde tilgang på et enhetssystem. Dermed kunne han ikke gjøre absolutte bestemmelser, men måtte nøye seg med relative målinger. Den første som gjorde en absolutt måling var Carl Friedrich Gauss, noe som senere ble utviklet til CGS-systemet.

Det er viktig å ta i betraktning at mye av fysikkens utvikling ikke hadde vært mulig uten innføringen av et enhetssystem som gjorde målingene mye lettere. Den viktigste lærdommen når det gjelder fysikkhistorie, er å være klar over at når et eksperiment blir gjort, så måles det man der og da er interessert i og ikke noe annet som vi i ettertid ser kunne ha vært gjort. Å være bevisst på dette er en viktig del av å forstå den vitenskapelige metoden og dennes begrensninger. Ved å utelate dette i framstillingen av historien begår man en stor feil, siden man da tilslører at det har skjedd og vil skje igjen.

Takk

Takk til Berit Bungum for oversettelse av manuskriptet fra svensk til norsk, noe som også har ført til visse forbedringer i framstillingen.

Referanser

1. H.D. Young & R.A. Freedman: *Sears and Zemansky's University Physics, 13ed.* Pearson education, (2012)

2. H. Cavendish: *Experiments to determine the density of the earth*. Philosophical Transaction of the Royal Society of London **88**, 469–526 (1798)
doi: 10.1098/rstl.1798.0022
<http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/88/469.full.pdf/>
3. J.H. Poynting: *On the determination of the mean density of the earth and the gravitational constant by means of the common balance*. Philosophical Transaction of the Royal Society of London **A182**, 565–656 (1891)

∞

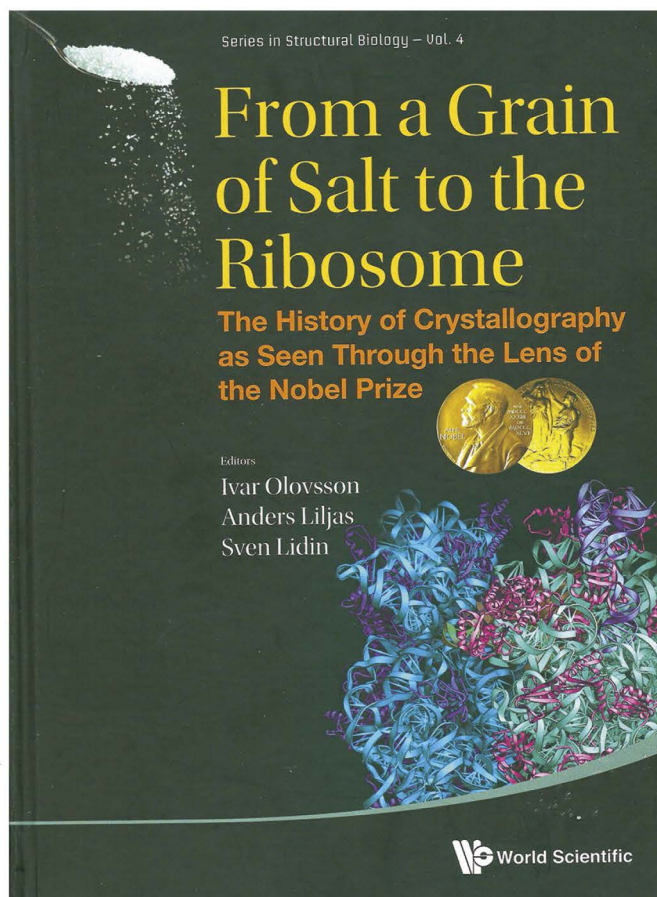
Bokomtale

Ivar Olovsson, Anders Liljas og Sven Lidin (red.): *From a Grain of Salt to the Ribosome*. Series in Structural Biology - Vol 4. World Scientific Publishing 2015, (519 sider).

Krystallografiens historie sett fra tildelte nobelpriser 1901 til 2012

Året 2014 var krystallografiens år. Det ble feiret over hele verden, og ble omtalt av Emil J. Samuelsen i FFV Nr. 2 2014, side 63-64. I løpet av dette året ble det publisert flere bøker om krystallografiens historie. Et imponerende verk er kommet i en bokserie i strukturbologi. I den ses krystallografiens historie med Nobelprisen som "linse". Forfatterne er professor em. Ivar Olovsson, Uppsala, og to professorer fra Lund, Anders Liljas og Sven Lidin. Olovsson er professor em. i uorganisk kjemi, Liljas er professor em. i strukturbologi, og Lidin er fortsatt professor i uorganisk kjemi og medlem av Nobelkomiteen i kjemi. Men bli ikke redd: Her er mye interessant stoff også for fysikere.

Året 2014 ble krystallografiens år fordi da var det omtrent 100 år siden det ble vist at spredning av røntgenstråler kan vise hvordan en krystall er bygget opp av atomer. Før dette var krystallografi studier av krystallenes ytre form og symmetri. Men nå, takket være røntgenstråler, ble det mulig å bestemme den indre strukturen til krystaller. Denne moderne form for krystallografi blir derfor kalt *røntgenkrystallografi* (*X-ray crystallo-*



graphy). Senere er det vist at også nøytroner og elektroner kan brukes til strukturbestemmelse.

Krystallstrukturen følger ikke direkte fra målinger av intensiteten av den spredde strålingen. Fasen på den spredde strålingen kan ikke bestemmes eksperimentelt. Den som vil bestemme strukturen av en krystall må derfor først gjette på en rimelig struktur. Gjetter man tilstrekkelig nær den riktige strukturen, kan den gjettede strukturen raffineres. At stadig mer komplekse strukturer, som består av et økende antall atomer, kan bestemmes, skyldes at stadig kraftigere datamaskiner, og såkalte "direkte metoder", er blitt tilgjengelig for krystallografene. Dette er forklart nærmere i boken.

Dette er ikke en vanlig historiebok hvor forfatterne skriver krystallografiens historie med egne ord. Ønsker du en slik bok om starten på røntgenkrystallografien, vil jeg anbefale André Authier: *Early days of X-ray crystallography* som kom på Oxford University Press i 2013. Boken som anmeldes her bygger på 20 nobelpriser med krystallografisk profil, som er tildelt i perioden 1901–2012. Den første Nobelprisen var til Conrad Røntgen i 1901, og den siste til Robert Lefkowitz og Brian K. Kobilka i 2012.

Forfatterne har skrevet en kort biografi om hver av dem som ble tildelt en av de 20 nobelprisene som de har valgt ut: 5 i fysikk, 14 i kjemi og én i medisin (for strukturen av DNA). I boken er også gjengitt originalartiklene nobelprisvinnerne skrev som var grunnen til at de fikk Nobelprisen. Det gjør boken til en "skattkiste". Her er alle artiklene lett tilgjengelige. De fire første artiklene er på tysk, de andre er på engelsk.

"From a Grain of Salt" refererer til bestemmelsen av strukturen av vanlig bordsalt, NaCl, av den unge W.L. Bragg i 1912 (Nobelprisen i fysikk i 1915 sammen med faren W.H. Bragg). Boken inneholder også en interessant artikkel av Anders Liljas som i detalj beskriver hvordan det svenske vitenskapsakademiet vurderte bidragene til von Laue, og til far og sønn Bragg, for Nobelprisene i fysikk i 1914 og 1915.

At strukturen av NaCl ikke inneholdt NaCl-molekyler kom som en overraskelse på mange kjemikere, og det tok tid å fordøye. Så sent som i 1927 ble det publisert en artikkel i *Nature* hvor forfatteren hevder at nå må kjemikerne forsvare at fast NaCl består av molekyler og ikke akseptere alt som publiseres av fysikere!

Et "ribosom" er en molekyllær maskin som er skreddersydd for å fremstille proteiner. Den kompliserte strukturen ble bestemt av V. Ramakrishnan, T.A. Steitz og A. Yonath, og ble belønnet med Nobelprisen i 2009. Her bidro nordmannen Håkon Hope med sin lavtemperaturteknikk som gjorde at ribosomkrystallene ikke ble ødelagt av røntgenstrålingen.

Det er bare fem nordmenn til som er nevnt i boken. Ikke Odd Hassel som fikk Nobelprisen i kjemi i 1969, men Sven Furberg som bidro til strukturen av DNA, Lars Vegard som skrev til W.H. Bragg om Max von Laues oppdagelse av at røntgenstråler ble spredd av krystaller, Carl Størmer som ble nominert for Nobelprisen i fysikk i 1915, 16 og 17 (sammen med Lars Vegard), Wilhelm Zachariasen som var en av flere lærere for Clifford Shull (Nobelprisen i fysikk i 1994). I boken om Lars Vegard som kom ut i 2008, er Vegards innsats som krystallograf beskrevet sammen med omtaler av andre sentrale norske strukturforskere fra side 74 til 105.

At tildelte nobelpriser blir brukt som "linse" til krystallografiens historie, gjør at denne historien ikke blir fullstendig. Første betingelse som må være oppfylt for å komme i betraktning for en nobelpris er at en er blitt nominert i løpet av det året. Det

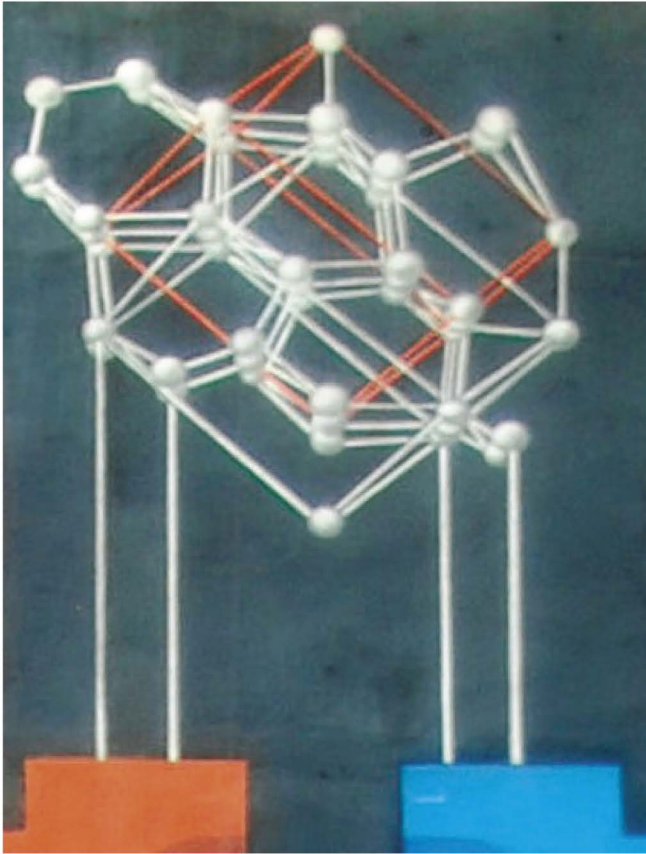
kan være forklaringen på hvorfor Sven Furberg ikke var en av dem som ble tildelt Nobelprisen for DNA-strukturen i 1962. Han var ikke nominert!

Men vinklingen i boken har flere konsekvenser enn dette. Den første nobelprisvinneren etter Bragg-ene som kan kalles krystallograf, er Linus Pauling som fikk Nobelprisen i kjemi i 1954, dels for sine bidrag til klargjøring av kjemisk binding og dels for bestemmelse av strukturen av komplekse forbindelser. Men på 40 år hadde krystallografien gjennomgått store forandringer, og strukturen av en rekke uorganiske stoffer og mineraler var blitt bestemt uten at dette hadde kvalifisert for en nobelpris. Dessuten trengte man ikke lenger å bygge sitt eget utstyr slik Lars Vegard og hans studenter måtte i 1920- og 1930-årene. Diffraktometere kunne nå kjøpes på markedet. Dessuten, krystallografene var tidlig ute med å ta i bruk datamaskiner, ja, mange ganger var det krystallografene som utviklet maskinene og programmene som de brukte. Det gjaldt f.eks. den første datamaskinen som ble bygget i Norge, "Nusse", som var en datamaskin konstruert av en engelsk krystallograf, Andrew D. Booth (1918-2009).

De eneste unntakene fra strukturbiologien i boken, er de nobelpriser som er tildelt dem som har utviklet metodene; Max von Laue for å ha oppdaget at røntgenstråler blir spredd av krystaller. Senere fikk de som viste at elektroner (Nobelprisen i fysikk i 1937) og nøytroner (Nobelprisen i fysikk i 1994) også blir spredd av krystaller slik at de kan brukes til strukturbestemmelse. To andre unntak er Nobelprisen i kjemi for utvikling av direkte metoder til fasebestemmelse av Hauptmann og Karle i 1985, og til Shechtman i 2011, for oppdagelsen av kvasikrystaller – metallkrystaller uten translasjonssymmetri.

Jeg synes også oppdagelsen av grafén, som ble belønnet med Nobelprisen i fysikk i 2010, burde ha vært med. Grafén består av ett lag av grafittatomer. Strukturen til grafitt ble bestemt av Odd Hassel og H. Mark (Hassels veileder i Berlin) i 1924, ti år etter at W.L. Bragg bestemte strukturen av diamant. En modell av strukturen av grafitt er vist på figur 2. Denne strukturen er gjengitt på vestveggen i Fysikkbygningen på Blindern, som en del av Per Kroghs freske "Atomet i verdensrommet".

Den verdensberømte krystallograf og professor i krystallografi, mineralografi og petrografi ved Universitetet i Oslo, Victor Moritz Goldschmidt fikk



Figur 2. Modell av grafittstrukturen malt av Per Krogh på vestveggen i vestibylen i Fysikkbygningen på Blindern (1935-38), antagelig etter et samarbeid med Odd Hassel som bestemte denne strukturen i 1924.

dessverre aldri Nobelprisen. Han ble nominert elleve ganger, men ble avfeid som geolog og ikke vurdert som kjemiker.

Bjørn Pedersen
Skolelaboratoriet, Kjemisk institutt, UiO.

∞

Fysikknytt

Annonserte spor etter "gravitasjonsbølger fra universets begynnelse" kom trolig fra galaktisk støv

BICEP2-teamet annonserte 17. mars 2014 at de hadde oppdaget spor av gravitasjonsbølger fra universets tidlige inflasjonsfase i polarisasjonsmønsteret i den kosmiske

mikrobølge-bakgrunnsstrålingen. Dette ble omtalt i FFV Nr. 2 - 2014.⁽¹⁾ I en ny rapport offentliggjort 2. februar, har forskere fra BICEP2 og Planck-teamene nå annonsert at det observerte polarisasjonsmønsteret trolig skyldes polarisering av strålingen fra støv i Melkeveien.

Franske forskere sørget ved en glipp for at det 29. januar, oppsto en lekkasje om hva som ville komme av nyheter i en fellesrapport fra BICEP2- og Planck-prosjektene om den tidligere annonserte oppdagelsen av gravitasjonsbølger fra universets begynnelse. Dette førte til en lynrask pressemelding dagen etter fra *European Space Agency*, ESA,⁽²⁾ og kommentar i *Nature* på Internett.⁽³⁾ Nature-artikkelen har overskriften: *Oppdagelse av gravitasjonsbølger er nå offisielt død*. Dette er ganske unyansert. Det vitenskapelige preprintet fra BICEP2 og Planck kom tre dager senere, den 2. februar.⁽⁴⁾

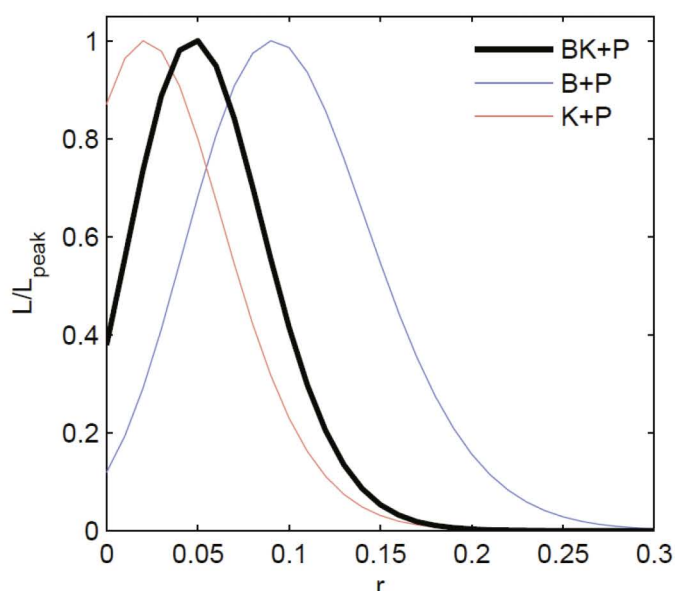
En mer detaljert omtale av hva dette dreier seg om, er publisert i *Nature*.⁽⁵⁾ Jeg vil her gi en kort omtale av hovedresultatet i BICEP2-Planck-rapporten. I beskrivelsen av polarisasjonsmønsteret i den kosmiske mikrobølge-bakgrunnsstrålingen benyttes forholdet, r , mellom amplitudene til den delen av polarisasjonen som kommer fra gravitasjonsbølger og den delen som har andre årsaker. Planckmålingene har gitt betingelsen $r < 0,11$. BICEP2-målingene som kom etterpå, ga $r = 0,20^{+0,07}_{-0,05}$. Det er tre bidrag til r :

1. *Gravitasjonell linseeffekt*. Nøyaktige analyser viste at denne effekten ikke kunne forklare BICEP2-observasjonene.
2. *Polarisasjon som skyldes støv i Melkeveien*. Med de dataene som var tilgjengelige for BICEP2-teamet, kom de frem til at støvet bare bidro med 0,04 til verdien av r . Det er dette bidraget som nå har vist seg å være mye større enn BICEP2-teamet kom frem til.
3. *Gravitasjonsbølger fra universets inflasjonsfase*. BICEP2-teamet konkluderte i mars 2014 med at bidraget til r fra disse opprinnelige gravitasjonsbølgene var på 0,16, og annonserte derfor oppdagelsen av gravitasjonsbølger fra det tidlige univers.

Planck-teamet kom med en rapport i september 2014.⁽⁶⁾ Der ble det fremhevet at BICEP2-signalet sannsynligvis skyldes galaktisk støv i Melkeveien, men at usikkerhetene fortsatt var så store at det ikke kunne utelukkes at BICEP2-teamet hadde sett spor

av gravitasjonsbølger fra universets begynnelse. Det ble derfor anbefalt at BICEP2-teamet og Planck-teamet skulle analysere sine data i fellesskap. Dette er nå blitt gjort, og den felles rapporten fra teamene med informasjon om resultatet av samarbeidet kom 2. februar i år.

BICEP2-teamet samlet observasjonsdata både med BICEP2-observatoriet, *B*, og med Keck-teleskopene, *K*, på Sydpolen, mens Planck-teamet benyttet ESAs Planck-teleskop, *P*. I den felles rapporten er det en figur som viser sannsynlighetsfordelingen for r med utgangspunkt i observasjonene med BICEP2- og Planck-observatoriene (blå kurve i figur 1), Keck og Planck (den røde kurven), og alle tre observatoriene (den svarte kurven).



Figur 1. Her vises hovedresultatet til den felles analysen av observasjonsdata fra BICEP2-, Keck- og Planck-observatoriene. Observasjonene er analysert med utgangspunkt i "standardmodellen for universet", dvs. en universmodell med euklidisk romlig geometri som inneholder 69 % vakuumenergi og 31 % kald materie.⁽⁷⁾ Grafene viser sannsynlighetsfordelingene for r ut fra observasjonene med B: BICEP2, K: Keck og P: Planck-observatoriene. Den svarte kurven representerer resultatet når alle observasjonene er tatt med. Vi ser at det er høyest sannsynlighet for $r = 0,05$ og ikke for $r = 0,00$.

I sin fellesrapport skriver de at sluttresultatet av den felles analysen av alle observasjonsdataene er at $r < 0,12$ med 95 % sannsynlighet. Sannsynlighetsfordelingen for r toppes ved $r = 0,05$, og er i disfavør av $r = 0,00$ med en faktor på 2,5. Dersom $r = 0,00$, er det 8 % sannsynlighet for at avviket fra null i figur 1 representerer en statistisk fluktusjon.

Den favoriserte verdien av r er altså ikke lik null,

men $r = 0,05$. Forskerne skriver at sjansen for at dette er en statistisk fluktusjon ikke er liten nok til at man kan innkassere sannsynlighetstoppens avvik fra null som en oppdagelse av gravitasjonsbølger fra universets inflasjonsfase.

Bidraget fra galaktisk støv til polarisasjonsmønsteret i den kosmiske bakgrunnsstrålingen er så stort at man ikke ser noe overbevisende spor fra de opprinnelige gravitasjonsbølgene som BICEP2-teamet annonserte at de hadde funnet i 2014.

Forskningen på dette området kommer til å fortsette for fullt. Flere forskningsgrupper er i gang med å observere polarisasjonsmønsteret i den kosmiske bakgrunnsstrålingen, og BICEP-teamet forbereder nå en tredje generasjon av observasjoner, BICEP3. Man regner med å finne ut om det er noe spor fra de kosmiske gravitasjonsbølgene i bakgrunnsstrålingen i løpet av noen få år.

Referanser

1. Ø. Grøn: *Gravitasjonsbølger fra Big Bang?* Fra Fysikkens Verden **76**, Nr. 2, 51–55 (2014)
2. Planck: *Gravitational waves remain elusive*. Pressemelding fra ESA, 30. januar (2015)
3. Ron Cowen: *Gravitational waves discovery now officially dead*. Nature, 30. januar (2015)
4. Planck- og BICEP-teamene: *A Joint Analysis of BICEP2/Keck Array and Planck Data*. Preprint ArXiv: 1502.00612 (2015)
5. Ø. Grøn: *Gravitasjonsbølger fra Universets begynnelse*. Naturen. Nr. 3. 99 (2014)
6. Planck preprint: *Planck intermediate results. XXX. The angular power spectrum of polarized dust emission at intermediate and high Galactic latitudes*. Preprint ArXiv: 1409.5738.
7. Planck preprint: *Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters*. ArXiv: 1502.01589, (2015)

Øyvind Grøn

Kommentar

Lungenes resnsesystem og radon

Thormod Henriksen skrev i FFV Nr. 4-2014 en veldig informativ artikkel om *Lungenes resnsesystem og radondoser*.⁽¹⁾ Blant annet kommenterer han en artikkel av S. Darby et al. om radon og kreftfare.⁽²⁾ Undertegnede er svært interessert i denne problematikken, idet vi, i et laboratoriekurs ved UiB, gjennomfører målinger av radonkonsentrasjoner.

Artikkelen til Darby et al. inneholder et svært viktig poeng som ikke kommer fram i Henriksens diskusjon. Den viser nemlig at kreftrisikoen forbundet med radon kan deles med 25 for ikke-røykere, sammenlignet med risikoen for røykere. Som kjent er røykere mye mer utsatt for lungekreft enn ikke-røykere. Ifølge denne artikkelen har røykere i utgangspunktet omtrent 10 % risiko for å få lungekreft i løpet av livet, mens tallet for ikke-røykere er 0,4 %. Artikkelens data viser at relativ risiko øker med 10 % pr. 100 Bq/m³ for både røykere og ikke-røykere. Med LNT-modellen (Linear No Threshold) som de bruker, betyr dette at kreftrisikoen øker fra 10 til 11 % for røykere, mens den bare øker fra 0,4 til 0,44 % for ikke-røykere (med store usikkerheter).

Tidligere antakelser om kreftrisiko følger omtrent det Darby et al. fant for røykere. Henriksen vet sikkert hvilke data man benyttet for den tidligere antakelsen, men jeg skulle tro at tidlige undersøkelser blant gruvearbeiderere var viktige.⁽³⁾ Så vidt jeg kan se samsvarer i alle fall dødeligheten som ble funnet i disse undersøkelsene godt med antakelsene som har vært gjort om årsdoser, nemlig ca. 5 mSv per 100 Bq/m³ ved kontinuerlig eksponering.⁽⁴⁾ Darby et al. finner altså at dette tallet skal deles på 25 hvis man ikke røyker. I LNT-modellen skal man altså si at årsdosen er så liten som 0,2 mSv per 100 Bq/m³ for ikke-røykere!

Jeg har ikke sett underlagsmaterialet for hvordan Statens Strålevern har kommet fram til ca. 300 ekstra dødsfall per år i Norge på grunn av radon. Likevel, siden LNT-modellen er så enkel, og fordelingen av radonkonsentrasjonen i husluften kan beskrives med en passende log-normalfunksjon, så har jeg på egen hånd kommet fram til at anslagene for antall ekstra dødsfall hadde vært mye høyere dersom det ikke hadde vært tatt hensyn til den lave kreftrisikoen for ikke-røykere. Av en eller an-

nen merkelig grunn, så kommer det ikke fram at av de 300 ekstra dødsfallene er det noe slikt som 270 røykere! Siden andelen av røykere i befolkningen er på vei nedover, så burde også antall ekstra dødsfall i befolkningen også være på vei nedover. Men dette tallet har nok sunket mye mer på grunn av tiltak mot røyking enn på grunn av tiltak mot radon i inneluft!

Selv ved bruk av LNT-modellen blir altså Strålevernets anbefalinger høyst merkverdige, idet de gir en universell grense for grupper med svært forskjellig risiko for å få kreft. Det ser heller ut som at man kanskje også burde vurdere tiltak mot *for lite* radon, idet data Henriksen presenterer tyder på at det fins en optimal konsentrasjon av radon mellom 50 og 100 Bq/m³. Undertegnede er fra før av preget av Henriksens syn på LNT-modellen, og avstår fra ytterligere diskusjon.

Referanser

1. Thormod Henriksen: *Lungenes resnsesystem og radondoser*. Fra Fysikkens Verden, **76**, Nr. 4, 110–117 (2014)
2. S. Darby et al.: *Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies*. BMJ, doi:10.1136/bmj.38308.477650.63. (2004)
3. Wikipedia: *Health Effects of Radon*. http://en.wikipedia.org/wiki/Health_effects_of_radon (6/2-2015)
4. T. Henriksen: *Stråling og helse*. Fysisk institutt, Universitetet i Oslo, ISBN 82-992073-2-0 (1993)

Bjarne Stugu
Institutt for fysikk og teknologi, UiB

∞

HUSK Å BETALE
KONTINGENTEN!

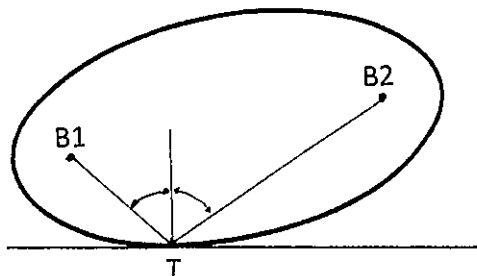
Trim i FFV

Løsning på FFVT 4/14

Ellipsetangenten

I oppgaven var det gitt tre punkter: brennpunktene B1 og B2 for en ellipse, og et tredje punkt T. Oppgaven gikk ut på å konstruere ellipsetangenten gjennom punktet T.

En ellipse kan tegnes ved å la blyanten følge en slakk friksjonsløs tråd festet i B1 og B2. La planet stå loddrett, og la en liten gjenstand (en ring f.eks.) henge i tråden. Den vil komme til ro i trådens laveste punkt, T. Likevekt i tyngdefeltet krever at horisontalkomponentene av de to snorkreftene som påvirker ringen er like store og motsatt rettet. Det vil si at de to vinklene mellom tråden og vertikallinjen er like store, slik at vertikallinjen halverer vinkelen mellom trådene. Med andre ord vil tangenten til ellipsen gjennom ringens opphengspunkt stå vinkelrett på denne halveringslinjen.



Konstruksjonen med passer og linjal er derfor enkel: Halver vinkelen mellom trådene T-B1 og T-B2, og konstruer ellipsetangenten gjennom T normalt på denne halveringslinjen.

FFVT 1/15

Mørkets gjerninger

På et bord ligger en vanlig kortstokk med 52 kort der 13 av kortene har bildesiden opp, de øvrige har bildesiden ned. Rommet er mørkt, så du kan ikke se om et kort har bildesiden opp eller ned.

Din oppgave i mørket er å få delt kortene i to bunker slik at hver bunke har like mange kort med bildesiden opp!

∞

De 10 språkvettreglene

1. **Det er ingen skam å sette punktum**
En leservennlig periode har sjelden mer enn 22–25 ord.
2. **Har du flere ting på hjertet, så si én ting om gangen**
Server momentene porsjonsvis, og avslutt gjerne setningen før du begynner på en ny.
3. **Vær høflig mot leseren**
Tenk på leseren når du skriver, og velg ord som du vet han forstår. Må du bruke et vanskelig ord, så bør det forklares.
4. **Bli ikke smittet av substantivsjuken**
Skriv ikke: Kari foretar innhøsting av epler – når du like gjerne kan skrive: Kari høster (inn) epler.
5. **Vær gjerne høyrevridd når du skriver**
Sørg for at (hoved)verbet kommer langt ut til venstre i setningen, og spre resten av setningsinnholdet ut til høyre.
6. **Du skal ikke pynte deg med ord**
Motstå fristelsen til å bruke sjeldne fremmedord, moteord eller vitenskapelig klingende ord.
7. **Vær ikke redd for den konkrete uttryksmåten**
Mener du en spade, så skriv spade.
8. **Sløs ikke med ord og bokstaver**
En kort uttryksmåte er i regelen bedre enn en lang.
9. **Vær ikke redd for det personlige tonefallet**
Personord som du, De, dere, jeg, vi er tillatt i skrift også.
10. **Bruk ørekontrollen**
Venn deg til å lese høyt for deg selv det du har skrevet. Det kan hjelpe deg til å sile bort de mest papirknitrende uttrykkene.

Vis språkvett!

∞

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

B



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 høyskoler med fysikk i sine fagkretser. Andre kan også abonnere på bladet. Blant disse er elever og biblioteker 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, fysikklærere, 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 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.

MANUSKRIPTER leveres i en form som forfatteren mener er direkte publiserbar. 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 spaltebredde på 8,6 cm. De bør være på elektronisk form i et standard grafisk format og med god oppløsning. Vi kan unntaksvis 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 korrekturene.

Norsk Fysisk Selskap

STYRE

President:

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

Visepresident:

Professor Are Raklev
Fysisk institutt, UiO
e-post: a.r.rachlow@fys.uio.no

Styremedlemmer:

Forsker Thomas Gjesteland
Inst. for fysikk og teknologi, UiB
Førsteamanuensis Børge Hamre
Inst. for fysikk og teknologi, UiB
Professor Jan Petter Hansen
Inst. for fysikk og teknologi, UiB
Professor Håvard Helstrup
Høgskolen i Bergen
Professor Eli Olaug Hole
Fysisk institutt, UiO
Professor Jon Samseth
Høgskolen i Oslo og Akershus, Lillestrøm
Lektor Morten Trudeng
Asker videregående skole

Selskapets sekretær:

Studiekonsulent Kjersti Gausvik
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. Samuelsen
Inst. for fysikk, NTNU
e-post: emil.samuelsen@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 Morten Førre
Inst. for fysikk og teknologi, UiB

Ekspedisjons 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 120 kr. (Studenter 60 kr.)
Løssalg 40 kr. pr. nummer.