

Fra Fysikkens Verden

Nr. 2 – 2013
75. årgang

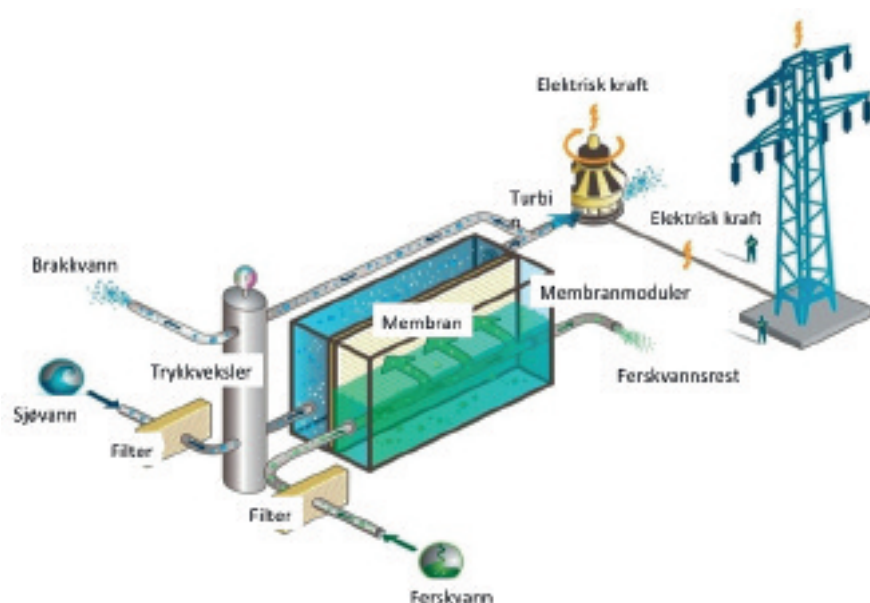
Utgiver:
Norsk Fysisk Selskap

Redaktører:
Øyvind Grøn
Emil J. Samuelsen

Redaksjonssekretær:
Karl Måseide

Innhold

Thelin, Sivertsen, Holt og Brekke:	
Saltkraft – fornybar energi.....	38
Ø. Grøn og A.I. Vistnes:	
Corioliskraften.....	43
Redun Renstrøm:	
Bohrs vei til kvanteteori for atomet	47
E.J. Samuelsen og D.W. Breiby:	
Braggs lov i 100 år	54
Fra Redaktørene	34
FFV Gratulerer.....	34
Per Osland 70 år	
Undervisningspris til K. T. Hetland	
Nytt fra NFS	36
Norsk Fysisk Selskap 60 år	
Redaktørskifte i FFV	
Didaktikk på avveier	
Fysikknytt.....	59
Pioneranomalien er oppklart	
Krystallografi utan krystall	
Hva skjer	61
Fysikkolympiaden 2012/2013	
Bokomtale	62
Pål Brekke og Fredrik Broms:	
Nordlyset – en guide	
Trim i FFV.....	63



Saltkraftverk basert på osmotisk trykk
(Se artikkel: Saltkraft - fornybar energi...)

Fra Redaktørene

I år feires at det er 100 år siden Niels Bohr presenterte sin atommodell. Dette er et kjærkomment påskudd til å rette oppmerksomheten mot den store fysikeren og det avholdte mennesket Niels Bohr. Han oppnådde langt mer enn å vinne Nobelprisen i fysikk i 1922. Han var også en miljøskaper som i 1921 fikk etablert Institut for teoretisk fysik (senere kalt Niels Bohr Institutet) ved Københavns Universitet, hvor han blant annet inspirerte unge fysikere i arbeidet med å konstruere kvantemekanikken og å gi en fysisk beskrivelse av atomære prosesser.

Foruten nobelprisarbeidene fra 1913, der den nye atommodellen ble presentert, publiserte Bohr i årene 1918–1922 tre banebrytende arbeider der han la grunnlaget for å forstå grunnstoffenes periodiske system med utgangspunkt i atomfysikken. Grunnstoff nr. 107, bohrium, er oppkalt etter Niels Bohr. Videre presenterte Bohr i 1936 dråpemodellen for atomkjernene og brukte den til å utarbeide en forståelse av atomkjerners fisjon.

Omkring 1927 kjempet Niels Bohr og Werner Heisenberg sammen for å forstå hvilke konsekvenser kvantemekanikken har for vår oppfatning av materiens natur. I denne sammenhengen kom Heisenberg frem til usikkerhetsrelasjonen(e), mens Bohr formulerte komplementaritetsprinsippet: At materien har egenskaper, for eksempel et objekts partikkel- og bølgenatur, som det ikke er mulig å observere samtidig. For Bohr var dette et prinsipp som også kunne ha gyldighet utenfor fysikkens område.

Etter andre verdenskrig arbeidet Bohr iherdig for å danne et åpent samfunn med fri flyt av nye resultater innenfor naturvitenskapene.

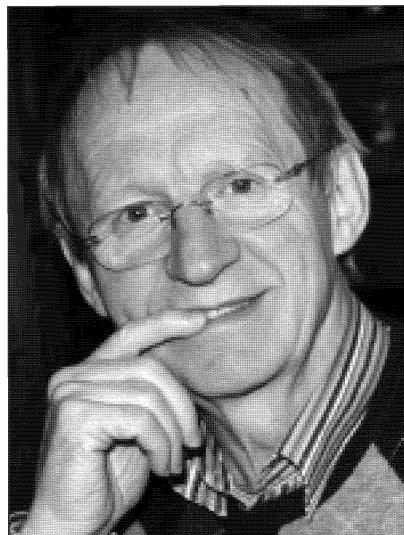
Bohr hadde også en stor porsjon humor og likte å fortelle underfundige historier. Han fortalte at han hadde en nabo ved landstedet sitt med en hesteko over inngangsdøren. Den skulle bringe lykke. "Men du tror da vel ikke på det", ble det sagt. "Nei da," svarte naboen, "men de sier at den virker selv om man ikke tror på den."

Øyvind Grøn

∞

FFV Gratulerer

Per Osland 70 år



Presidenten i Norsk Fysisk Selskap og Norges fremste eksponent for teoretisk elementærpartikkelfysikk de siste tiår, professor Per Osland ved Universitetet i Bergen, fylte 70 år den 10. januar i år. FFV stiller seg i rekken av gratulanter!

Per Osland er sivilingeniør i fysikk fra Almenavdelingen ved NTH i 1968. Det var starten på en omfattende, og tildels omflakkende, karriere som fortsetter med uforminsket styrke tross den nylige emeritiseringen. Etter en lisensiatgrad fra NTH om spredning, produksjon, og annihilation av hadronisk materie på kjerner, tok han dr.philos-graden ved Universitetet i Trondheim (nå NTNU) i 1975, med en avhandling om *Aspects of hadron-nucleus interactions*. Avhandlingen gir et forvarsel om en framtidig karriere med vidstrakt internasjonalt samarbeid med fokus på beregning av eksperimentelle konsekvenser av moderne teoretiske modeller for elementærpartikler. Allerede i 1975 hadde Per hatt lengre forskningsopphold ved CERN i Genève, og ved *International Centre for Theoretical Physics* i Trieste. Etter doktorgraden ble disse oppholdene fulgt av postdoktorstillinger ved Nordisk Institutt for Teoretisk Fysikk (NORDITA) i København, ved Harvard-universitet (i tre perioder), og ved DESY i Hamburg.

I 1987 fikk Universitetet i Bergen en ny professor i teoretisk elementærpartikkelfysikk, en professor med usedvanlig stor internasjonal erfaring og

bredt kontaktnett. Både før og etter tilsetningen i Bergen har Per vist stor vitenskapelig produktivitet; vi registrerer i alt 183 oppføringer i databasen *inspirehep.net* med arbeider mellom februar 1970 og mars 2013. To viktige bidrag er artiklene *Quantum Chromodynamics and Jets in positron-electron* (1979) og *Measurement of SUSY masses via cascade decays for SPS 1a* (2005).

I den første analyseres observerbare effekter av den da nye teorien for sterke vekselvirkninger (kvantefargedynamikk, QCD) når positroner og elektroner med høy energi annihilerer hverandre og bruker energien til å produsere hadroniske partikkelskurer (jets). Ifølge kvantefargedynamikk skyldes sterke vekselvirkninger utveksling av gluoner, partikler som i mange henseende ligner på fotoner. I artikkelen vises det hvordan emisjon av et høyenergetisk gluon vil lede til en tredje, bred partikkelskur i prosessen, i tillegg til to skurer som skyldes emisjon av kvarker. Man kunne også beregne egenskaper ved den romlige retningsfordelingen av de tre skurene. Forutsigelsene i denne artikkelen er i overensstemmelse med senere eksperimenter; den var derfor med på å etablere kvantefargedynamikk som akseptert teori for sterke vekselvirkninger.

I den andre artikkelen analyseres muligheten for tunge supersymmetriske partnere til de observerte elementærpartiklene, og hvordan disse under visse forutsetninger vil kunne observeres gjennom kaskader av henfall i kollisjonseksperimenter. Forutsigelser er utfordrende på grunn av det store antall ukjente parametre i modellene. Eksperimentene på CERN har hittil ikke kunnet påvise at supersymmetri eksisterer, men muligheten forblir tiltrekkende. Den lokale gruppen som søker eksperimentelt etter supersymmetri i ATLAS-detektoren, er takknemlig for tett samarbeid med Per Osland gjennom mange år.

Teoretiske beregninger i partikkelfysikk kan bli svært lange og kompliserte, og krever stor grad av konsentrasjon og pinlig nøyaktig arbeidsinnsats. De av oss som har hatt glede av å samarbeide tett med Per kan gå god for hans spesielle kvaliteter på dette området. Enda flere har sikkert registrert at den samme metodikken blir brukt også når det er andre typer oppgaver som skal løses. Gjennom årene har Per lagt ned svært mye arbeid for fysikkens felleskap som medlem (og ofte som leder) av utvalg og komiteer i evalueringspaneler og som koordinator av prosjekter. Internasjonalt er han synlig gjennom medlemskap i mange arbeids- og studiegrup-

per for den videre utvikling av partikkelfysikken og som medforfatter av flere innflytelsesrike rapporter fra slike, ikke minst som styreleder for divisjonen for høyenergi-partikkelfysikk i det Europeiske Fysiske Selskap. Det er derfor ikke uten grunn at Per Osland er valgt til president for Norsk Fysisk Selskap!

I kombinasjon med dette har Per veiledet et meget stort antall master- og doktorstudenter i Bergen. Det er vanskelig å skjønne hvordan han har hatt tid til alt han har gjort. En delforklaring framkom for ganske få år siden, da Per opplyste at han nå skulle på sin første ferie... Det å ha 19 års erfaring utenlands mellom sivilingeniøreksamen og fast jobb gjør opplagt noe med arbeidsvanene. Studenter som forventer tilbud om fast tilsetning nesten før de har begynt med den avsluttende oppgaven, bør merke seg at det finnes andre gode og spennende alternative karriereveier. Men det er veier og valg som krever støtte og lojalitet fra de som er med på reisen.

Det var en bereist og språkmektig familie som etablerte seg i Bergen for ca. 26 år siden. En av oss minnes et besøk hos familien Osland i Hamburg noen år tidligere. Datteren (ca. 4 år) kommuniserte med sin mor på italiensk, med sin far på tysk om dagens opplevelser i barnehagen, men på engelsk om opplevelsene i USA måneden før – og på dansk-norsk med oss.

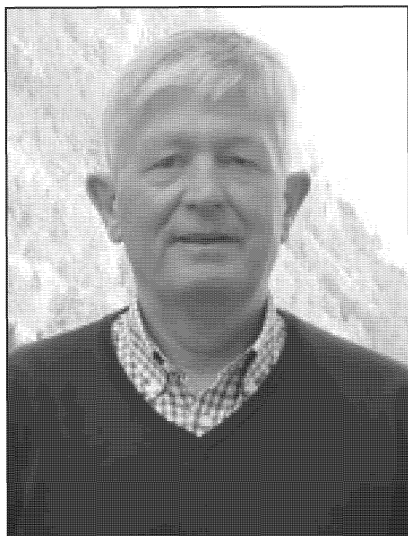
Vi ønsker Per Osland fortsatt mange gode og aktive år framover, men kanskje med litt mer tid til ferie og familie!

*Anna Lipniacka, Kåre Olaussen, Are Raklev og
Ingjald Øverbø*

∞



Undervisningspris til Karl Torstein Hetland



The European Physical Society Physics Education Division Award for Secondary School Teaching 2013 er tildelt lektor Karl Torstein Hetland ved Dalen vgs. i Telemark. Prisen deles ut 5. august under *The International Conference on Physics Education* i Praha.

Hetland, som underviser i fysikk i videregående skole, har vært en drivkraft i organisering av konferanser om fysikkundervisning arrangert av Norsk fysikklærerforening. Han har organisert og gjennomført flere prosjekter som har gitt økt kompetanse i fysikk både for lærere og elever. Ett eksempel er Energinettverket som er et unikt prosjekt der grunnskole og videregående skole samarbeider om undervisning i temaet fornybar energi. Over 50 skoler og 2000 elever fordelt på 18 lokale nettverk, er med i dette prosjektet. Elever fra den videregående skole er ofte lærere for elevene i ungdomsskolen, for eksempel arrangerer elevene en "energiday" med mange aktiviteter. Hetland har også hatt ansvar for et prosjekt som ble satt i gang i forbindelse med Polaråret 2007/2008 hvor 200 lærere var med på ulike kurs og ekspedisjoner bl.a. på Svalbard og på Finnmarksvidda. Nærmere 4000 elever ble undervist i polare temaer som følge av at lærerne deres deltok på slike kurs.

Vi gratulerer Karl Torstein Hetland med prisen!

Morten Trudeng
leder for Norsk fysikklærerforening

∞

Nytt fra NFS

Norsk Fysisk Selskap 60 år

Norsk Fysisk Selskap (NFS) er 60 år i år. Ifølge Thormod Henriksens historiske oversikt i anledning 50-årsmarkeringen i 2003 (som er å finne på NFS sin nettside), ble NFS stiftet 8. juni 1953. Selskapet hadde ved starten 56 medlemmer. I dag er medlems-tallet vokst til rundt 1200, hvorav medlemmer av Norsk fysikklærerforening utgjør en signifikant del.

NFS er nok i dag mest synlig via arrangement av fysikermøter og produksjon av *Fra Fysikkens Verden*. Vi er stolte av bladet, hvor Karl Måseide og redaktørene gjør en imponerende innsats. Selskapet er også i stand til å yte en beskjeden støtte til faglige møter arrangert av selskapets faggrupper og av studentorganisasjoner.

Det er en utfordring å arrangere attraktive fysikermøter. Hovedgrunnen ligger nok i to forhold. 1) Forskingen er etter hvert blitt mer internasjonal, og mange prioriterer heller et møte i utlandet hvor man kan treffe medarbeidere. 2) Flyreiser er relativt sett blitt billigere, noe som forsterker prioriteringen av utenlandsmøter. Dette er ikke noe nytt. Fra og med 2001 har vi arrangert et tradisjonelt stort fysikermøte kun annethvert år, mot hvert år tidligere.

Fysikermøtene har likevel fortsatt en stor verdi, noe som skyldes følgende aspekter: 1) De kan være en ypperlig arena for å møte internasjonalt framstående fysikere i et lokalt, norsk miljø. 2) De byr på gode anledninger for PhD-studenter og yngre fysikere til å presentere sine arbeider i et noe større miljø enn de har på eget arbeidssted. 3) Sist, men ikke minst, gir fysikermøtene anledning å diskutere fysikk med aktive fysikklærere.

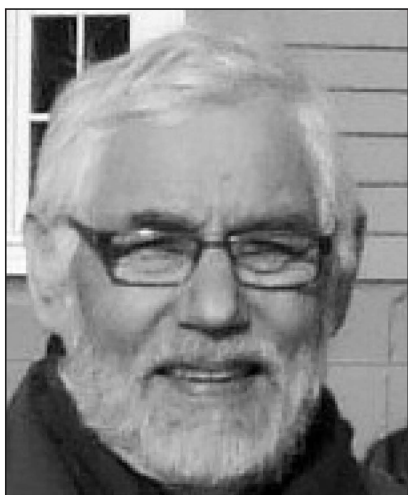
NFS forvalter nå følgende priser: *Norsk Fysisk Selskaps Undervisningspris*, *Vinghøg-prisen i elektrooptikk* (tidligere Simrad-prisen) og *Martin Landrøs pris for fremragende mastergradsoppgave i fysikk*. Den siste prisen er ny. Disse prisene deles alle ut på fysikermøtene. Norsk Hydros Birke-landpris i fysikk er blitt til *Yaras Birkelandpris i fysikk og kjemi*. Den alternerer mellom kjemi (odde årstall) og fysikk (jamne årstall) og deles ut ved et eget arrangement i regi av en komité nedsatt av Det Norske Videnskaps-Akademi. NFS er representert i utvalgskomiteen for fysikk.

I tillegg til NFS sine internasjonale kontakter

mot *European Physical Society* (EPS) og *International Union of Pure and Applied Physics* (IUPAP), har selskapet de siste årene også engasjert seg på to andre hold. For det første samarbeider NFS med *European Physical Journal* (EPJ) og har derved medlemskap i EPJ *Scientific Advisory Board*. Dette omfatter også det nye tidsskriftet EPL som er i ferd med å etablere seg med en anstendig "impact factor". For det andre ble de første nordiske fysikermøter arrangert i København (2009) og i Helsinki (2011) med NFS som medarrangør. Det neste møtet i serien finner sted i Lund i juni, og det forventes at Norge vil arrangere et slikt møte i 2015.

Jeg vil avslutte med å rette en stor takk til de miljøer bestående av mange entusiastiske personer, som har arrangert fysikermøter siden Thor-mod Henriksens oversikt i 2003. Det er Oslo (Sundvolden) i 2003, Bergen (Ulvik) i 2005, Tromsø i 2007, NTNU (Røros) i 2009, Oslo i 2011 og Bergen nå i 2013.

Redaktørskifte



Marit Sandstad har sluttet som redaktør for FFV. Selskapet vil med dette rette en stor takk til henne for innsatsen fra 2010 og fram til 2013, og ønske henne lykke til med innspurten i PhD-studiet i kosmologi. Samtidig vil vi ønske Emil J. Samuelsen (*professor emeritus*, NTNU) velkommen som ny redaktør. Øyvind Grøn fortsetter, og vi ønsker Øyvind og Emil til lykke med samarbeidet framover!

Per Osland
president i NFS

∞

Didaktikk på avveier

På *European Physical Society* (EPS) sitt årsmøte (Council) i Strasbourg i april, presenterte en representant for vår søsterorganisasjon, *Deutsche Physikalische Gesellschaft* (DPG) en skrekkehistorie. En ny måte å undervise fysikk på er utviklet i Karlsruhe-området, fremmet av fysikdidaktikere. Opplegget refereres til som KPK, Karlsruhe Physikkurs, og blir brukt i mange videregående skoler både i Baden-Württemberg og i andre deler av landet. Det er også noen steder i bruk på lavere nivå. Lærebøkene er oversatt til andre språk som svensk (kan finnes ved å søke på "kpk svensk fysik") og kinesisk. Da kan det vel ikke være feil?

DPG trodde i mange år at fenomenet ville finne en naturlig død. Men, etter 20 år er det fortsatt i bruk, og de har sett seg nødt til å komme med en ekspertuttalelse (på tysk: "Gutachten"). Den kan leses på Internett.⁽¹⁾ Uttalelsen er (på vegne av DPG) signert av 13 professorer.

Med det hederlige mål å forenkle presentasjonen, er flere begrep blitt redefinert. "Kraft" er erstattet av "impulsstrøm", "varme" er satt identisk med "entropi", og Maxwells likninger er symmetrisert ved å innføre magnetisk ladning. Ett argument som blir brukt (resultat av "forskning") er at jenter lettere lærer fysikk ved dette opplegget.

EPS sin avdeling for undervisning (PED) vil se på saken og eventuelt komme med anbefalinger.

Referanse

1. Internett:

http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen_gutachter/index.html

Per Osland

∞

Saltkraft – fornybar energi med osmotiske membraner

Willy Røstum Thelin *, Edvard Sivertsen *, Torleif Holt * * og Geir Brekke * * *

Saltkraft er en fornybar energikilde som potensielt kan gi et betydelig tilskudd til verdens strømproduksjon. På verdensbasis er potensialet anslått til 1700 TWh, noe som tilsvarer tolv ganger den totale strømproduksjonen i Norge.

Saltkraft har vært diskutert i litteraturen så langt tilbake som til 1950-tallet. Sidney Loeb, som av mange regnes som den første pioneren innen temaet, publiserte flere arbeider på 1970-tallet. Grunnet blant annet mangel på egnede membraner på den tiden, samt begrenset forståelse for osmotisk membrantransport, var framskrittene de påfølgende ti-årene relativt beskjedne. SINTEF-forskerne Thor Thorsen og Torleif Holt hadde imidlertid stor tro på at saltkraft hadde et betydelig kommersielt potensiale under forutsetning av dedikert teknologiutvikling, med spesielt fokus på utvikling av membraner med egnede egenskaper for osmotisk transport. I 1997 ble det første saltkraftprosjektet etablert med Statkraft som industripartner. Etter dette har Statkraft og SINTEF jobbet kontinuerlig med utvikling av saltkraftteknologi basert på bruk av osmotiske membraner i en prosess som kalles trykkretardert osmose (engelsk: pressure retarded osmosis, PRO). Statkraft sin innsats og investeringsvilje, rettet mot akademika, anvendt forskning og leverandørindustrien, har bidratt til å øke interessen rundt saltkraft på verdensbasis. Spesielt de siste årene har FOU-aktiviteten resultert i betydelige framskritt som har bragt teknologien nærmere kommersialisering. Statkraft arbeider i dag med planer for bygging av verdens første fullskalaanlegg med en installert effekt i størrelsesorden 2 MW.

* SINTEF Byggforsk,

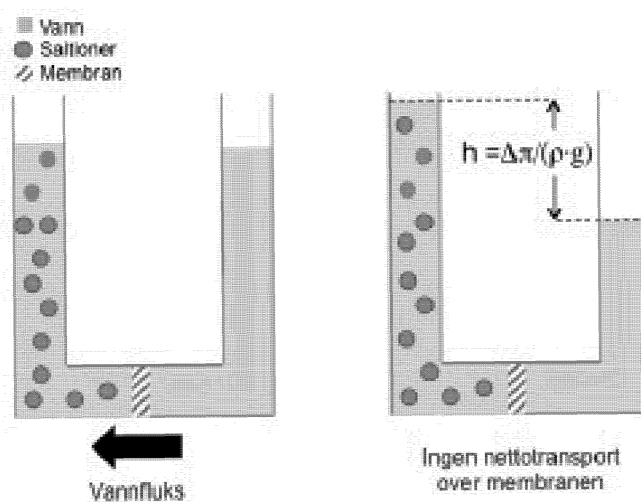
** SINTEF Petroleumsforskning,

*** Statkraft Development AS.

Osmose

Osmose er det underliggende fenomenet som vil utnyttes i saltkraftanlegg basert på trykkretardert osmose. Med osmose forstås transport av vann gjennom en halvgjennomtrengelig hinne, gjerne kalt en semipermeabel membran. Fenomenet, som har vært kjent i flere hundre år, oppstår når to løsninger med forskjellig konsentrasjon av oppløst stoff er atskilt av en membran som ideelt sett kun tillater transport av vannmolekyler, mens salter og andre oppløste stoffer vil holdes tilbake. Vannet vil da transporteres gjennom membranen fra siden med lav konsentrasjon til siden med høy konsentrasjon.

Hvis en tenker seg at ferskvann og sjøvann er adskilt av en membran i et kar slik som vist i figur 1, vil transport av vann gjennom membranen medføre at trykket i saltvannsløsningen øker. Den



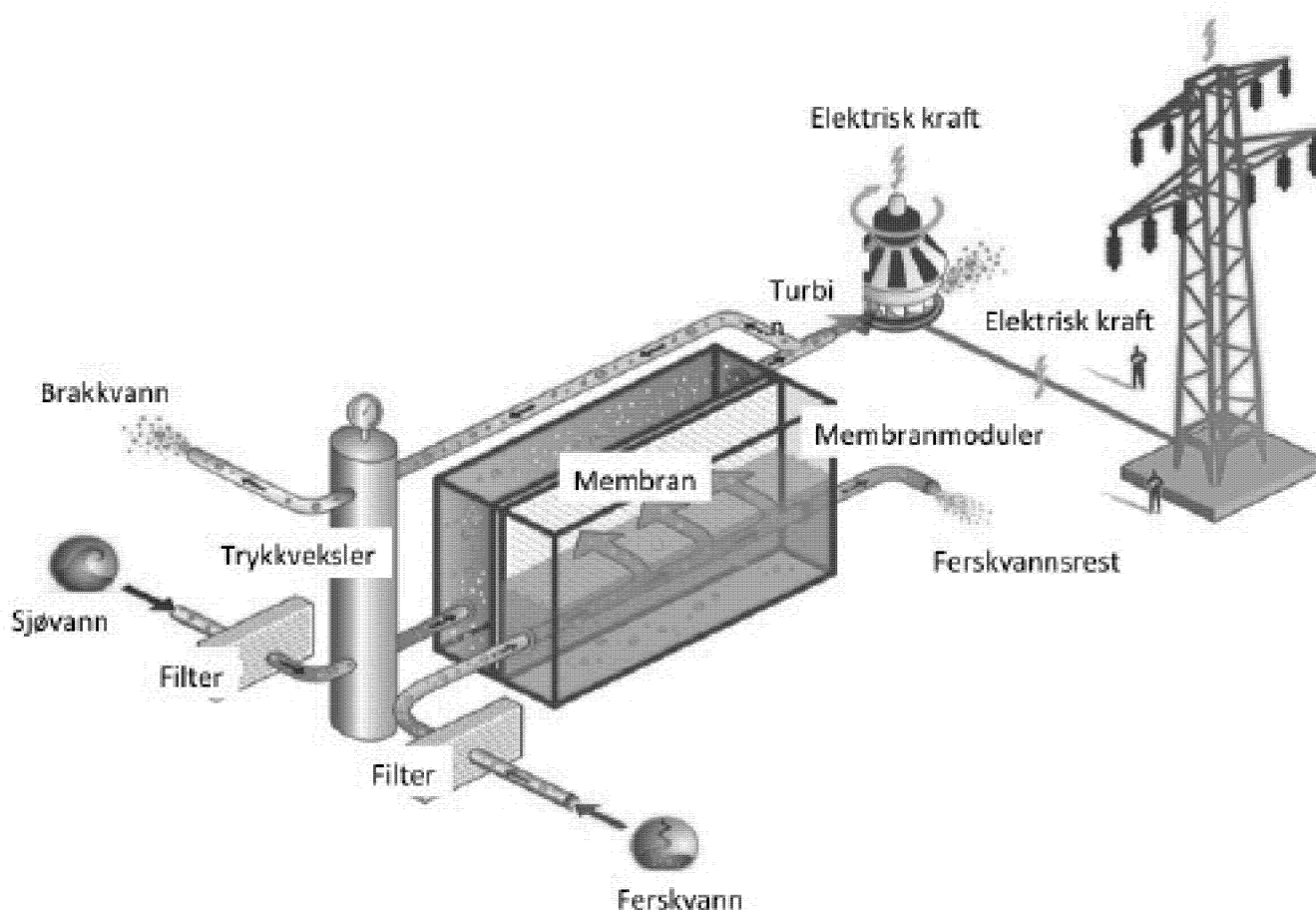
Figur 1. Illustrasjon av osmotisk vanntransport. I figuren til venstre vil en ha transport av vann fra ferskvannskammer til saltvannskammer på grunn av den osmotiske trykkforskjell mellom de to løsningene. Figuren til høyre viser situasjonen når den osmotiske vanntransporten har stoppet opp på grunn av at den statiske trykkehøyden (h) tilsvarer den osmotiske trykkforskjellen ($\Delta\pi$) mellom de to løsningene. ρ er løsningens tetthet, og g er tyngdens akselerasjon.

økende nivåforskjellen mellom de to løsningene vil bremse transporten av vann gjennom membranen. Ved likevekt er det ingen netto transport av vann gjennom membranen, og den statiske trykkehøyden tilsvarer da den osmotiske trykkforskjellen mellom de to løsningene.

Osmotisk trykk hører med blant de såkalte kolloidative egenskapene til stoffet når dette løses i vann. Osmotisk trykk kan beskrives termodynamisk, og kan derfor bestemmes ved beregninger. I et system av ferskvann og vanlig sjøvann tilsvarer det osmotiske trykket ca. 27,5 bar, eller en trykkehøyde på 275 meter for det vannet som passerer membranen. Energipotensialet kan prinsipielt utnyttes ved flere tekniske metoder, hvorav trykkrelatert osmose (PRO) er antatt å være den metoden som har størst potensial for kommersialisering.

Trykkretardert osmose (PRO)

Det er blandingsentropien mellom to løsninger med ulikt saltinnhold, som for eksempel sjøvann og elvevann, som i prinsippet kan utnyttes for produksjon av elektrisk strøm. Dette forutsetter imidlertid at blandingen foregår slik at arbeid faktisk kan ekstraheres i en teknisk prosess. En måte å gjøre dette på er å la blandingsprosessen foregå over en semipermeabel membran i en prosess kalt trykkretardert osmose. På grunn av forskjellen i osmotisk trykk over membranen vil vann transporteres fra ferskvannssiden til sjøvannssiden, og netto volumøkning på sjøvannssiden på grunn av vanntransporten gjennom membranen kan sendes til en turbin for produksjon av elektrisk energi. Prinsippet for prosessen er illustrert i figur 2. Beteg-



Figur 2. Illustrasjon av saltkraftanlegg basert på trykkretardert osmose. Inngående vannstrømmer filtreres før de sendes inn på membranmodulen der vann vil transporteres gjennom membranen fra ferskvannssiden og over i sjøvannet. I PRO vil transporten finne sted mot en trykkgradient slik at volumet som tilsvarer netto transport av vann gjennom membranen kan sendes gjennom en turbin for generering av elektrisk strøm. Den resterende trykksatte brakkvannsstrømmen vil trykkveksle med inngående sjøvann til membranmodulen, slik at trykksetting av inngående sjøvann kan foregå med lavest mulig friksjonstap.

nelsen "osmose" henviser her til at transporten av vann skjer spontant på grunn av saltgradienten over membranen, mens "trykkretardert" sikter til at denne vanntransporten er begrenset på grunn av et høyere trykk på sjøvannssiden av membranen. Strømproduksjonen tilsvarende produktet av vannmengden som transporteres gjennom membranen og trykkforskjellen over denne. Det forhøyede driftstrykket på sjøvannssiden av membranen er således en forutsetning for strømproduksjon.

Reversibel blanding

Alt ferskvann kan i prinsippet betraktes å inneholde "lagret" energi som potensielt kan utnyttes når det blandes med saltvann i havet. Denne blandingsenergien utnyttes ikke når en elv renner ut i havet. For å muliggjøre utnyttelse av den latente blandingsenergien må blandingsprosessen utføres delvis reversibelt, slik at arbeid faktisk kan utføres.

I en reversibel prosess er alle drivkreftene nesten i balanse, og bare en liten endring i kraftbalansen får prosessen til å gå i motsatt retning. En fullstendig reversibel prosess vil gå uendelig langsomt og vil ikke ha tap som skyldes f.eks. friksjon, elektrisk motstand, diffusjon og varmeledning. Således kan ingen virkelige prosesser være fullstendig reversible, men vi kan regne på reversible prosesser for å angi potensialet for å utføre arbeid. Det reversible arbeidet fra en prosess, W_{max} , er gitt ved endringen i Gibbs frie energi:

$$W_{max} = -\Delta G \quad (1)$$

Endringen i Gibbs frie energi ved en blandingsprosess kan uttrykkes ved:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2)$$

der ΔH er blandingsentalpien, ΔS er blandingsentropien og T er absolutt temperatur. Varmedeutviklingen ved blanding av ferskvann og saltvann er neglisjerbar, så vi kan sette $\Delta H = 0$. Blandingsentropien kan da uttrykkes ved:

$$\Delta S = \sum(n_i S_i)_{etter\ blanding} - \sum(n_i S_i)_{før\ blanding} \quad (3)$$

der n_i og S_i er henholdsvis antall mol og partiell molar entropi for vann og salt. Hvis 1 mol ferskvann blandes med n mol saltvann, gir ligning (3):

$$\Delta S = (1 + nx_{1,H_2O})S_{2,H_2O} + nx_{1,NaCl}S_{2,NaCl} - nx_{1,H_2O}S_{1,H_2O} - nx_{1,NaCl}S_{1,NaCl} - S_{H_2O}^0 \quad (4)$$

Her er $x_{1,i}$ molfraksjonen av henholdsvis vann og salt i saltvannet før blanding. $S_{i,j}$ er partiell molar entropi til vann og salt før (1) og etter (2) blanding, og $S_{H_2O}^0$ er entropien til rent vann. Hvis antall mol saltvann er mye større enn én ($n \gg 1$), vil ikke de partielle molare entropiene i saltvannet endre seg ved blandingsprosessen, dvs.:

$$S_{2,i} \approx S_{1,i} \quad (5)$$

Med ligning (5) innsatt i (4) fås:

$$\Delta S = S_{2,H_2O} - S_{H_2O}^0 \quad (6)$$

For en ideell løsning kan entropien til en komponent uttrykkes ved $S_i = S_i^0 - R \ln x_i$. For vann gir dette fra ligning (6):

$$\Delta S = -R \ln x_{H_2O} \quad (7)$$

Ved innsetting i ligning (2), sammen med $\Delta H_{mix} = 0$, får vi:

$$\Delta G = RT \ln x_{H_2O} \quad (8)$$

Med et saltvann på 33 g NaCl/l vil konsentrasjonene av NaCl og vann være henholdsvis 0,565 og 54,9 mol/l. Ved 20°C gir dette $\Delta G = -49,6$ J/mol, eller -2,76 kJ/kg ferskvann. Denne energimengden kan ekstraheres som nyttig arbeid fra en innretning som blander ferskvann og saltvann reversibelt.

Det osmotiske trykket, $p_{osmotisk}$, kan også beregnes ved bruk av van't Hoff's ligning:

$$P_{osmotisk} = 2RT \Delta c_{salt} \quad (9)$$

der Δc_{salt} er konsentrasjonsforskjellen mellom de to løsningene. For 33 g/l NaCl (564,6 mol/m³) fås 27,5 bar som tilsvarer høyden av en vannsøyle på 275 m. Hvis en tenker seg at 18 g vann (1 mol) løftes 275 m utgjør det en økning i potensiell energi på 48,5 J/mol som er svært likt blandingsenergien estimert ovenfor.

Blandesonen til saltvann og ferskvann kan regnes som adiabatisk, dvs. det er ingen varmeutveksling med omgivelsene og at $dq = 0$. Siden blandingsentalpien er tilnærmet lik null, og det ekstraheres arbeid (dw), men ikke varme fra blandingen, fås fra energibevarelsesloven:

$$dE = c_p dT = dq + dw = dw \quad (10)$$

der dE er endringen i totalsystemets indre energi og c_p er systemets varmekapasitet.

Ekstraksjon av arbeid vil ifølge ligning (10) medføre enn viss nedkjøling. Anta f.eks. at ett mol vann blandes reversibelt med tre mol saltvann. Med

52,5 J/mol ferskvann, og en varmekapasitet på 4,18 J/g, vil de 72 g med fortynnet saltvann bli nedkjølt med 0,17 °C. I en virkelig prosess optimalisert for energiproduksjon per blandingsenhet vil halvparten av det reversible arbeidet tas ut. Dette medfører at blandingen nedkjøles mindre enn 0,1° C.

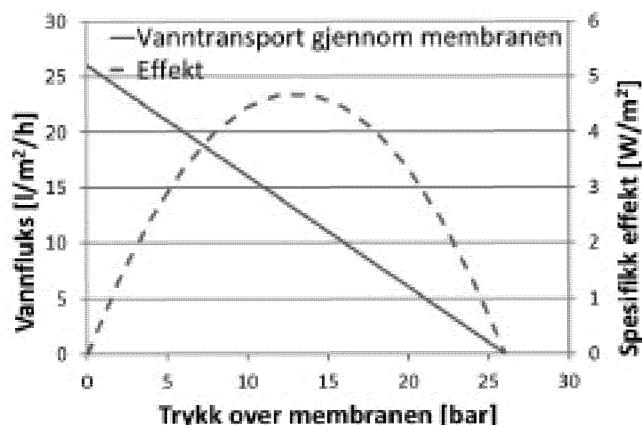
Utnyttbart potensial

Som tidligere nevnt vil energiproduksjonen i et saltkraftanlegg tilsvare produktet av den mengde vann som transporteres gjennom membranen og trykkforskjellen over membranen. Figur 3 viser at den spesifikke energiproduksjonen, dvs. produsert strøm per arealenhet installert membran, vil maksimeres hvis en drifter anlegget med et trykk på sjøvannssiden tilsvarende halvparten av den osmotiske trykkforskjellen mellom løsningene. Siden membraner vil utgjøre en betydelig del av investeringskostnaden ved bygging av et saltkraftanlegg, vil det være lite aktuelt å designe for høyere driftstrykk, og således mer reversibel blanding. Dermed vil en i praksis maksimalt kunne utnytte 50 % av den reversible blandingsenergien. For typisk konsentrasjon og temperatur i Atlanterhavsvann vil dette innebære optimalt driftstrykk rundt 12 bar.

Som nevnt ovenfor så vil om lag 50 % av den reversible blandingsenergien utnyttes når driften av anlegget optimaliseres med tanke på størst mulig spesifikk energiproduksjon. Videre vil det tapes energi ved drift av prosessen. Hvis en antar 20 % av den energien som produseres i blandingsenheten tapes i prosessen i form av friksjonstap i rør, pumper, trykkvekslere, turbiner, etc., vil en kunne utvinne 20 J per mol ferskvann transportert gjennom membranen. Med dette som basis er mulig energiproduksjon fra et saltkraftverk plassert ved utløpet av noen utvalgte elver oppsummert i tabell 1.

Tabell 1. Potensiale for kraftproduksjon i saltkraftvert.

Eksempel på elver	Vannføring (m ³ /s)	Kraftproduksjon (MW)
Liten lokal elv	10	11
Namsen	290	320
Glomma	720	800
Rhinen	2200	2440
Mississippi	18000	20000



Figur 3. Vanntransport gjennom membranen og kraftproduksjon som funksjon av hydraulisk trykk over membranen. 1 bar = 10⁵ Pa.

FOU utfordringer

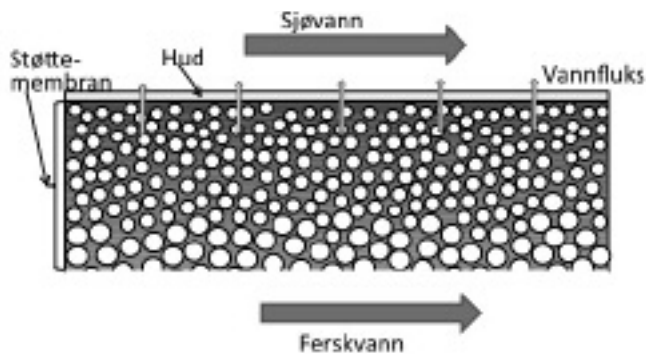
Figur 2 viser en skisse av et PRO-anlegg og angir hovedkomponentene; inntakssystemer for sjøvann og ferskvann, forbehandling av begge vannstrømmene, energigjenvinningssystem og fødepumper, membranelementer, turbin, samt hjelpesystemer for membranvask og tilbakespyling av membranen.

De enkelte komponentene må optimaliseres for PRO for å få kostnaden på produsert energi ned på et akseptabelt og konkurransedyktig nivå. Enkelte av komponentene, som for eksempel fødepumper, inntakssystemer, ventiler og røropplegg, vil være tilsvarende som for enkelte konvensjonelle membranapplikasjoner. Andre komponenter må i større grad skreddersys for PRO, slik som for eksempel energigjenvinningssystemet og membranelementene.

Forskning og utvikling har i stor grad fokusert på utvikling av en PRO-membran med tilfredsstillende ytelse, siden dette er en forutsetning for en konkurransedyktig strømproduksjon. I den senere tid har en betydelig forbedring i membran ytelse funnet sted, og fokuset er nå derfor blitt rettet også mot andre utfordringer knyttet til PRO anlegg. Noen fremtidige FOU utfordringer er diskutert nedenfor.

Membrankarakteristikk

Figur 4 viser en skisse av tverrsnittet av en typisk PRO-membran. Membranhuden som typisk har en tykkelse i størrelsesorden 0,5 m, utgjør selve separasjonssjiktet der saltet vil holdes tilbake. Hudene ligger på toppen av en porøs støttestruktur og utgjør mekanisk styrke for separasjonssjiktet. En PRO-membran kan karakteriseres med tre parametre, henholdsvis vannpermeabiliteten (A), saltper-



Figur 4. Illustrasjon av tverrsnittet til en PRO-membran. En PRO-membran vil typisk bestå av en osmotisk hud, som vil sørge for separasjonen av vann og salt, samt en støttestruktur som har som funksjon å gi membranen mekanisk styrke. Typisk vil den konsentrerte løsningen strømme langs hudsiden av membranen, og den fortynnede løsningen vil strømme langs overflaten av støtte-membranen på motsatt side. På grunn av den osmotiske trykkforskjellen over membranen vil det foregå en transport av vann gjennom membranen fra lav til høy konsentrasjon.

meabiliteten (B) og strukturparameteren (S), hvor de to førstnevnte er knyttet til transport- og separasjonsegenskapene til membran-huden. Strukturparameteren beskriver i hovedsak den effektive diffusjonsdistansen i støtte-membranen, og inkluderer membranens tykkelse og porøsitet, samt porenes tortuositet (kronglethets-faktor). Lav strukturparameter, sammen med kombinasjonen av høy vann-permeabilitet og lav saltpermeabilitet er viktige forutsetninger for høy ytelse i PRO.

Membranforurensing og krav til forbehandling

Ferskvann i elver og vann inneholder både oppløst og kolloidalt/partikulært materiale som kan forårsake tilsmussing av membranen og tilstopping av kanalene i membranelementet, også kalt membran-fouling. En eller annen form for forbehandling av inngående vann må derfor påregnes for å fjerne de største partiklene og redusere det generelle forurensingspotensialet til fødevannet.

Dedikerte studier som tar opp foulingproblematikken med vann fra naturlige kilder pågår i regi av Statkraft og SINTEF. Hensikten er å generere kunnskap om hvordan ulike forurensinger vil påvirke membranytelsen over tid, og hva effekten av ulike forbehandlingsalternativer og vedlikeholdsregimer er. Foreløpige resultater indikerer at materielle og strukturelle egenskaper til støttestrukturen på "baksiden" av membranen har stor effekt på forurensingen av membranen.

Membranelement

Både hulfiber og ark-membraner kan benyttes i PRO, og foreløpig pågår utvikling av begge typer. De to hovedtypene membrankonfigurasjon har ulike fordeler og ulemper når man vurderer spesifikk kraftproduksjon, produksjonskostnader, pakningstetthet, trykktap, fouling-egenskaper og muligheter for rengjøring og vedlikehold. Hulfiber er spesielt attraktivt i PRO siden den høye pakningstettheten gjør at kravet til spesifikk kraftproduksjon kan reduseres noe sammenlignet med ark-membraner. Dette er gunstig med tanke på membranutvikling, men også ut fra drift av et PRO-anlegg, da lavere fluks vil gi mindre fouling-belastning. Videre vil eksisterende hulfiberelementer kreve mindre modifiseringer enn ark-membraner pakket i konvensjonelle spiralelementer, for å imøtekomme kravet om gjennomstrømning på begge sider av membranen.

Litteratur

1. B.E. Logan and M. Elimelech: *Membrane-based processes for sustainable power generation using water*. Nature, **488**, 313–319 (2012)
2. E. Sivertsen, W. Thelin, T. Holt, and G. Brekke: *Designing osmotic power plants*. Modern Energy Review, **4**[2], 73–76 2012
3. E. Sivertsen, W. Thelin, T. Holt, and G. Brekke: *Oceans and oceans of energy*. Annual Perspectives Wellershof & Partners Ltd. **1**,[1] 84–87 (2012)

∞

God sommer!

Corioliskraften

Øyvind Grøn * og Arnt Inge Vistnes **

Coriolisakselerasjon opptrer for legemer som beveger seg i et roterende referansesystem, og den er rettet vinkelrett på hastigheten. Når rotasjonen er mot urviserne avbøyes legemenes bevegelser mot høyre. Akselerasjonen er oppkalt etter den franske ingeniøren Gustave Gaspard Coriolis (1792–1843) som var den første til å gi en korrekt utledning av den, men den ble omtalt kvalitativt nesten to hundre år tidligere.

Corioliskraften

Newtons første lov sier at et legeme som ikke er påvirket av krefter, enten vil forbli i ro eller bevege seg med konstant fart langs en rett linje. Ikke-akselererte referansesystemer, kalt treghetssystemer eller inertialsystemer, er definert ved at i slike systemer gjelder Newtons første lov. Den gjelder ikke i et roterende referansesystem.

Matematisk sett er det en komplisert sammenheng mellom fiktive krefter som synes å virke i et akselerert referansesystem, og virkelige krefter i et inertialsystem. Av de fiktive kreftene er vi mest fortrolig med den såkalte "sentrifugalkraften". Vi kjenner den godt fra karuseller og når vi kjører fort gjennom en sving. Vi vet også at sentrifugalkraften ikke har noen motkraft og bare føles i roterende referansesystemer.

Corioliskraften er en annen fiktiv kraft. Det matematiske uttrykket for corioliskraften er:

$$\vec{F}_c = -2m\vec{\omega} \times \vec{v}$$

for et legeme med masse m og hastighet $\vec{v}$ i forhold til det roterende systemet. Det akselererte systemet dreier seg med konstant vinkelhastighet $\vec{\omega}$ i forhold til et inertialsystem. Vi ser av dette uttrykket at på jordoverflaten er corioliskraften alltid vinkelrett både på jordas rotasjonsakse og hastigheten sy-

stemet beveger seg med. Hastigheter parallelle med jordas rotasjonsakse gir ikke noen corioliskraft.

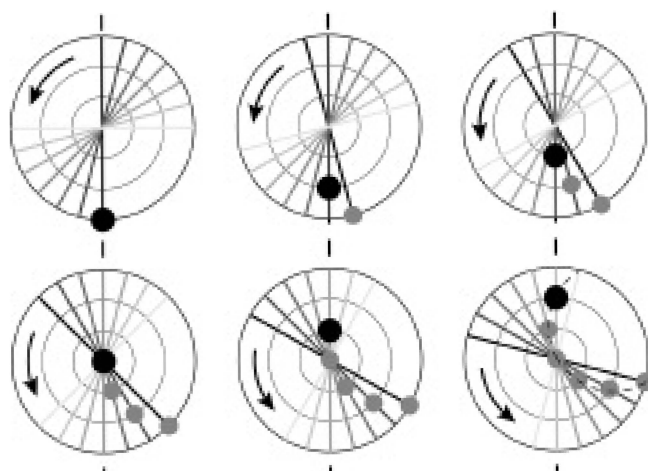
Fysikken bak, kvalitativt

Det er fullt mulig å trenge bak matematikken og forstå mekanismene bak corioliskraften. Det kan da være nyttig å skille mellom tre ulike retninger i to ulike koordinatsystemer:

Referansesystem S1: Hastigheter angis i forhold til overflaten på jorda. De tre ortogonale retningene her er nord-sør (ns), øst-vest (øv) og vertikalt oppover (v).

Referansesystem S2. Hastigheter angis i forhold til jordas akse i et sylindrisk aksesystem. De tre ortogonale retningene på et vilkårlig sted er radielt, tangentielt og parallelt med rotasjonsaksen.

Hastigheter radielt på akse vil gi en fiktiv kraft i tangentiell retning, det vil si øst-vest. Akselerasjonen har rett og slett opphav i at jorda roterer mens bevegelsen foregår. Det kan lett vises ved å trille en kule over en gramfonplate mens plata roterer. I forhold til rommet platespilleren befinner seg i, triller kula rett fram. Men i forhold til gramfonplata, vil kula tegne en krum bane. Dette er anskueliggjort i figur 1. Merk at denne effekten



Figur 1. Triller vi en kule (sort) rett over en gramfonplate som roterer, vil banen kula får på platen (grå markeringer) se krum ut, og kan gi inntrykk av at det har virket en kraft på tvers av hastigheten.

* Høgskolen i Oslo og Akershus og Fysisk institutt, UiO.

** Fysisk institutt, Universitetet i Oslo.

bare blir tydelig dersom gramfonoplata roterer en anseelig vinkel i løpet av tiden kula bruker på bevegelsen over plata.

En hastighet i øst-vest-retning vil også i helhet være en hastighet i tangentiell retning. Er hastigheten rettet vestover, roterer systemet raskere enn jorda. Da vil systemet få en ekstra sentrifugalkraft som vil svekke gravitasjonen noe, og altså gi en tilsynelatende radielt rettet kraft utover fra jordaksen. Dersom hastigheten er rettet østover, vil systemet rotere saktere enn jordas rotasjon, og vi får mindre sentrifugalakselerasjon enn om vi var i ro på jordoverflaten. Det vil gi en tilsynelatende akselerasjon radielt mot jordas akse. Hastigheter i øst-vest-retning vil altså gi en corioliskraft som peker radielt ut eller inn mot jordaksen. For at effekten skal bli nevneverdig, må systemet enten bevege seg med en hastighet av samme størrelsesorden som den farten vi allerede har når vi står i ro på jorda (1670 km/t ved ekvator!), eller så må bevegelsen foregå over så lang tid at den kan bli synlig likevel. Igjen er det først og fremst ved bevegelser som tar i størrelsesorden ett døgn at effekten kommer til syne.

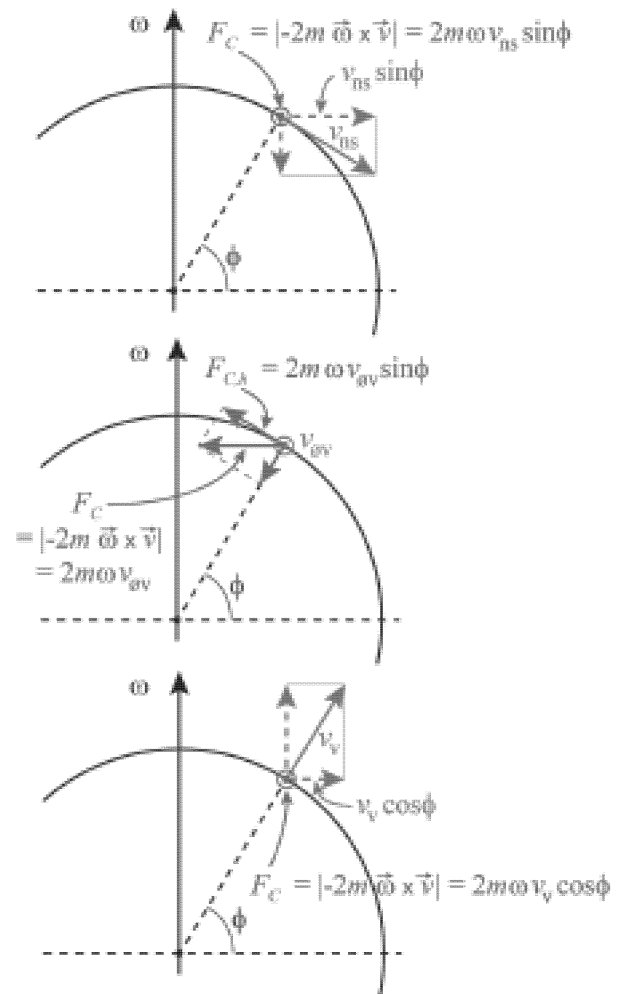
Hastighetskomponentene

Hemmeligheten med å forstå corioliskraften slik vi opplever den, er å dekomponere hastigheter og krefter fra overflatekoordinatsystemet, S1, til jordas sylinderaksesystem, S2, og tilbake igjen. Dette er vist i figur 2.

En hastighet i nord-sør-retning (i S1) vil ha en komponent parallelt med jordaksen (i S2), som ikke gir noen corioliskraft, og en komponent radielt ut fra/inn mot aksen. Den radielle hastighetskomponenten er $v \sin \theta$, hvor θ er breddegraden på det stedet vi betrakter. Denne komponenten gir en øst-vest-corioliskraft lik $F_c = 2m\omega v \sin \theta$.

En øst-vest-hastighet på jordoverflaten (i S1) er samtidig i helhet en tangentiell bevegelse i sylinderkoordinatsystemet S2. Den gir en radielt rettet corioliskraft $F_c = 2m\omega v$. Denne radielt rettede kraften har en komponent langs jordoverflaten og en komponent loddrett på jordoverflaten. Den horisontale komponenten får størrelsen $F_{c,h} = 2m\omega v \sin \theta$, som er mindre enn selve corioliskraften.

For kuriositetens skyld bør det nevnes at corioliskraften i dette tilfellet har en komponent med samme eller motsatt retning som gravitasjonen. Det betyr at en pendel som svinger i øst-vest-retning i prinsippet vil ha en ørliten forskjell i tiden den bruker fra øst til vest i forhold til tiden den bruker



Figur 2. Hastighet på jordoverflaten (rød) kan dekomponeres i hastigheter i et sylinder-referansesystem med akse i jordaksen. I de tre tilfellene ser vi på hastigheter i nord-sør retning, i øst-vest retning og i vertikal retning. Dekomponering i hastigheter gitt i sylinderkoordinater gjør det enklere å se hvilken retning corioliskraften (blå) får. Corioliskraften er nemlig vinkelrett på både jordas rotasjonsakse og den hastighetskomponenten som ikke er parallell med jordaksen. For øvrige detaljer henvises det til teksten.

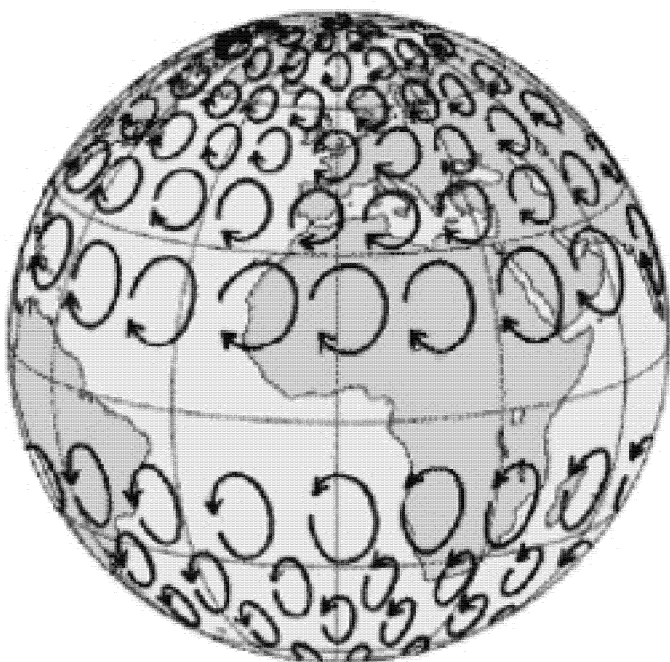
på motsatt bevegelse. I praksis er denne effekten så liten at den er vanskelig å måle.

For ordens skyld tar vi med en vertikal hastighet et sted på jordoverflaten. Igjen kan den dekomponeres i en retning parallell med jordaksen og en radielt rettet hastighetskomponent med størrelse $v \cos \theta$. Corioliskraften er da rettet øst-vest. Ved ekvator er denne corioliskraften aller størst og lik $F_c = 2m\omega v \cos \theta$. Den dreier bevegelsen likt enten vi er på den nordlige eller den sydlige halvkule. Imidlertid er dette en corioliskraft vi normalt ikke tenker på fordi det er sjelden eller aldri at vi har vertikale bevegelser nær ekvator som varer et døgnstid eller så.

Vi ser altså at corioliskraften varierer mye med hvor vi er på jordoverflaten og hvilken retning hastigheten har. Til tross for dette, vil en horisontal komponent v av hastigheten alltid føre til en corioliskraft lik $2m\omega v \sin\theta$ i horisontalplanet. Størrelsen av denne horisontale komponenten avhenger ikke av hvilken retning horisontalkomponenten av hastigheten peker, bare av breddegraden.

Jordoverflaten representerer et roterende referansesystem som brukes når meteorologer og andre beskriver bevegelser av luft i atmosfæren. Da gir coriolisakselerasjonen en avbøyning av bevegelsen mot høyre i forhold til bevegelsesretningen på den nordlige halvkula og til venstre på den sørlige.

Corioliskraften er vinkelrett på legemets hastighet og gjør derfor ikke noe arbeid på det og endrer ikke dets bevegelsesenergi. Hvis bare en konstant corioliskraft virker på et legeme, vil det bevege seg i en sirkelbane kalt coriolis-treghetssirkelen. Sentripetalakselerasjonen skyldes corioliskraften. Ifølge Newtons 2. lov i et roterende referansesystem, er da $2m\omega v \sin\theta = mv^2/r$. Følgelig er sirkelens radius $r = v/2\omega \sin\theta$, som er illustrert i figur 3. En hastighet på 10 m/s svarer til at coriolistreghetssirkelen ved Gjøviks breddegrad (ca. 61°) har en radius på 80 km.



Figur 3. Illustrasjon av coriolis-treghetssirklene på jorda. (Figuren er hentet fra ref. (1).)

Historikk

Allerede i 1651 beskrev to italienske fysikere, G.B. Riccioli og F.M. Grimaldi, avbøyningen av banen til legemer som beveger seg i et roterende referansesystem.⁽²⁾ De skrev at hvis en kule skytes i retning mot en av jordas poler, vil jordas døgnlige rotasjon gjøre at kula svinger til siden (kulas bane avbøyes), for på breddegrader nærmere polene beveger jordoverflaten seg langsommere, mens nærmere ekvator beveger jordoverflaten seg raskere.

Dette ble tatt opp igjen av briten G. Hadley i 1735. Den svenske meteorologen Anders O. Persson har imidlertid påpekt at deres argumentasjon bare leder til halvparten av den korrekte verdien av coriolisakselerasjonen.⁽³⁾ I 1776 utledet P.L. Laplace det korrekte uttrykket for akselerasjonen. Men ifølge Persson var Laplaces utledning basert på et feilaktig fysisk resonnement, og det var dermed nærmest et lykkelig sammentreff som gjorde at han fikk korrekt resultat. G.G. Coriolis betraktes derfor som den første som utledet uttrykket for denne akselerasjonen ut fra en korrekt argumentasjon. Han presenterte sin utledning i 1835.

Coriolisakselerasjon og atmosfærens bevegelser

I lang tid ble coriolisakselerasjonen betraktet kun i sammenheng med mekaniske problemer, og ifølge Persson var amerikaneren W. Ferrel den første som undersøkte betydningen av coriolisakselerasjonen for bevegelser av væsker og gasser ved jordoverflaten. Det forutsettes her at beskrivelsen refererer til jordas medbevegende, roterende referansesystem. I 1856 skrev Ferrel at atmosfærens bevegelser styres av fire mekanismer: 1) variasjoner av tetthetsfordelingen på grunn av ulike oppvarming ulike steder, for eksempel over land og sjø, 2) strømmer av luft fra områder med høyt trykk til områder med lavt trykk, 3) sentrifugalakselerasjonen og 4) coriolisakselerasjonen.

I en artikkel publisert i *Astronomical Journal* i 1856, skrev Ferrel at hvis et legeme beveger seg i en hvilken som helst retning ved jordoverflaten, påvirkes det av en kraft som skyldes jordrotasjonen, og som avbøyer bevegelsen mot høyre på den nordlige halvkulen og mot venstre på den sørlige.

Ferrel identifiserte også treghetssirkelen, dvs. den tilsynelatende sirkelbanen som et legeme følger når det bare er påvirket av corioliskraften. I 1858 presenterte Ferrel en detaljert matematisk analy-

se av coriolisakselerasjonens betydning for atmosfærens bevegelser, og viste at den begrenser utvekslingen av luft mellom lavere og høyere breddegrader. Oppvarming av luft nær ekvator får luften til å stige, og det vil da bli en luftstrøm sørover fra områder med kaldere luft ved høyere breddegrader. Denne luftstrømmen avbøyes mot vest og deretter videre mot nord. På den måten hindres transport av luft mot ekvator. Effekten er svakere nærmere ekvator siden corioliskraften i horisontalplanet er null ved ekvator der $2\omega v \sin \theta = 2\omega v \sin 0 = 0$.

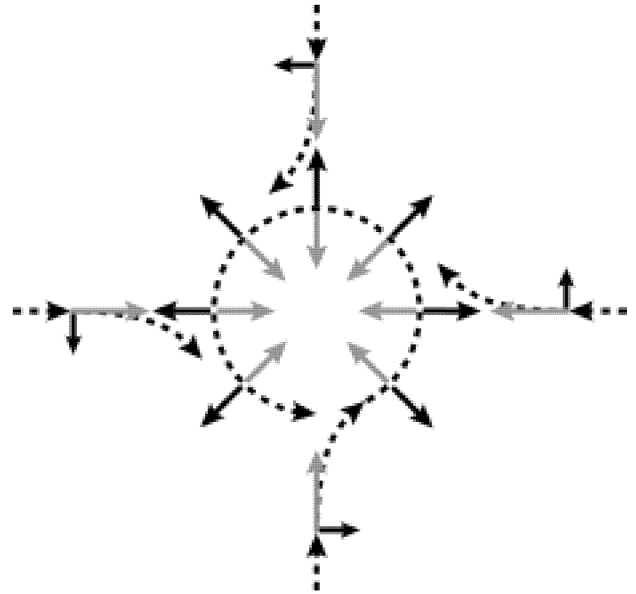
Utover i 1860-årene ble Ferrels resultater lagt merke til i Europa. Teorien for atmosfærens bevegelse på en roterende jord ble utarbeidet mer detaljert, og det ble klart at breddeavhengigheten til corioliskraften gjør at en partikkel som bare påvirkes av denne kraften, ikke følger en lukket sirkel, men en sirkelliknende bane der radien øker langs banen (figur 3). Merk at coriolistreghetssirkelene ikke representerer baner til luftpartikler i atmosfæren siden slike partikler påvirkes av flere krefter, for eksempel trykkkrefter, men tjener mer til å illustrere hvordan styrken av corioliskraften avhenger av breddegraden.

Coriolisakselerasjonen har avgjørende betydning ved dannelsen av sykloner. Dersom jorda ikke hadde rotert, ville det ikke vært noen slik akselerasjon, og da ville et lavtrykk raskt bli fylt igjen. Men coriolisakselerasjonen avbøyer luftas bevegelser slik at det dannes rotasjonsbevegelser som vist i figur 4. På denne måten oppstår virvler i atmosfæren, for eksempel "lavtrykk ved Island", som vist i figur 5.

Virvelen i badekaret

Vi har i blant møtt folk som har lurt på om vannet roterer oftere mot enn med urviserne på grunn av corioliskraften, når det renner ut av et badekar. Dette spørsmålet ble drøftet for noen år siden av D. van Domelen.⁽⁴⁾

La oss først finne hvor liten rotasjon vannet må ha når det strømmer ut av utløpet for at coriolisakselerasjonen skal greie å reversere rotasjonsretningen. Vi betrakter da en væskepartikkel som beveger seg mot avløpet med hastigheten $v = 1,0$ m/s i avstanden $r = 0,10$ m fra avløpet. T er antall sekunder i ett døgn. Da er jordas vinkelhastighet $\omega = 2\pi/T = 7,3 \cdot 10^{-5}$ s. Coriolisakselerasjonen til væskepartikkelen er maksimalt lik $a_C = 2\omega v = 1,5 \cdot 10^{-4}$ m/s². Partikkelen bruker $t = 0,1$ s på å komme frem til avløpet. I løpet av

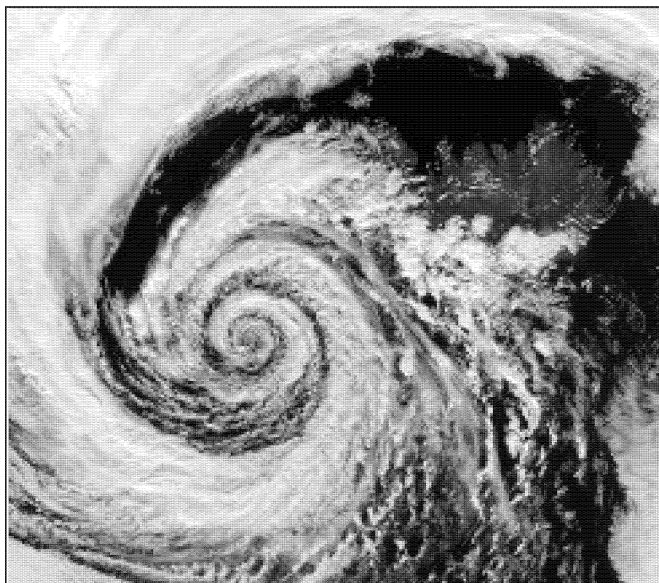


Figur 4. Luft som beveger seg mot sentrum av et lavtrykk, avbøyes mot høyre på jordas nordlige halvkule. Dette gir opphav til en rotasjonsbevegelse mot urviserne. De grå pilene viser trykk-kreftenes retninger, de sorte viser retningene til corioliskraften på en partikkel som beveger seg langs de stiplede banene i pilenes retninger. Ved høytrykk ville de grå pilene pekt ut fra sentrum og ført til en utoverrettet bevegelse. Igjen ville corioliskraften avbøyd bevegelsen mot høyre, og det ville ført til en dreining med urviserne. Så på den nordlige halvkule roterer lavtrykkene mot urviserne og høytrykkene med. På den sørlige halvkulen er det omvendt. (Tegningen er basert på en figur hentet fra ref. (1).)

denne tiden gir coriolisakselerasjonen partikkelen en forflytning $l = \frac{1}{2}a_C t^2 = 7,5 \cdot 10^{-7}$ m på tvers av bevegelsesretningen. Hvis partikkelen bommer på sentrum av utløpet med mer enn dette, vil rotasjonen ikke skifte retning.

Dersom en partikkel i 0,1 m avstand fra sentrum av utløpet beveger seg med en hastighet på 1 m/s med en retning slik at den bommer på sentrum med avstanden $l = 7,5 \cdot 10^{-7}$ m, har den en vinkelhastighet omtrent lik $\omega = 7,5 \cdot 10^{-5}$ s, som bare er litt større enn vinkelhastigheten til Jordas døgnlige rotasjon. Det betyr at corioliskraften bare kan reversere en rotasjon av vannet som er så langsom at vannet ville brukt omtrent 20 timer på en runde. På ny ser vi at corioliskraften i praksis bare spiller inn på prosesser som foregår over en tid sammenlignbar med jordens rotasjonstid.

Det er ikke lett å unngå langt større rotasjonsbevegelser i vannet enn dette når man tar ut propen av utløpet til badekaret. Dette er årsaken til at vannet nesten alltid danner en virvel når det renner ut av badekaret. Konklusjonen er at i vanlige



Figur 5. Her vises et satellittbilde av et lavtrykk ved Island. Drivkraften er oppvarming av luften over en varm havstrøm som har gjort luften lettere slik at den har begynt å stige. Dermed minsker trykket i et område som utvikler seg til å bli sentrum for en syklon. Det settes i gang en bevegelse av den typen som er vist skjematisk i figur 4. Trykk-krefter og corioliskrefter danner en virvel der luftpartiklene beveger seg i spiralbaner innover mot syklonens sentrum. (Figuren er hentet fra ref. (1).)

situasjoner er coriolisakselerasjonen så liten at den ikke vil ha noen merkbar innflytelse på hvilken vei vannet roterer når det renner ut av badekaret.

Referanser

1. Wikipedia:
http://en.wikipedia.org/wiki/Coriolis_effect Nedlastet i april 2013
2. C.M. Graney: *Coriolis effect, two centuries before Coriolis*. *Physics Today* **64**, 8, 8–9 (2011)
3. A.O. Persson: *The Coriolis Effect: Four centuries of conflict between common sense and mathematics, Part I: A history to 1885*. *History of Meteorology* **2**, 1–24 (2005)
4. D. van Domelen: *The Coriolis Effect*. (1996)
Internett:
<http://www.dvandom.com/coriolis/index.html>
Nedlastet i april 2013.

∞

Niels Bohrs vei til en kvanteteori for atomets struktur: 1911-1913

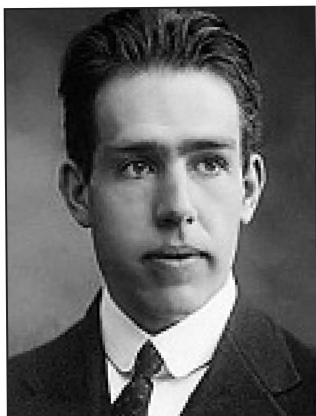
Reidun Renstrøm *

2013 markerer 100-årsjubileum for Niels Bohrs kvanteteori for atomet. I denne artikkelen følger vi Bohr fra han i september 1911 reiser til Cambridge for å studere metallenes elektronteori under ledelse av J.J. Thomson til han i mars 1913 sender første kapittel av trilogien "On the Constitution of Atoms and Molecules" til Ernest Rutherford for gjennomlesning.

Innledning

Omtrent alle fysikklærebøker på universitetsnivå introduserer atomfysikk i en historisk sammenheng. Hovedpunktene i denne versjonen er at Rutherford i 1911 foreslo, på bakgrunn av eksperimentelle resultater, en planetmodell for atomet med elektroner i sirkelbevegelse rundt en positivt ladd kjerne. Rutherfords modell skapte en krise i fysikken fordi klassisk fysikk forutsier at elektroner i sirkelbevegelse vil emitte stråling kontinuerlig mens de følger en spiralbane inn mot kjernen. Denne motsetningen mellom teori og eksperimentelle fakta motiverte Bohr til å reise til Rutherford i Manchester for å utarbeide sine ideer sammen med han.

* Universitetet i Agder.



Figur 1. Niels Henrik David Bohr (1885–1962).

Bohr løste problemet fordi han mente at nøkkelen til å forstå atomets indre struktur var å tolke atomenes linjespektre i lys av Einsteins nye fototeori. Hver linje, sa Bohr, representerer en bestemt energi og dermed en bestemt energiforskjell i atomet, altså må atomets energi være kvantisert. Denne historien er feil; likevel er den blitt en standard versjon om Bohrs atommodell.⁽¹⁾

100-årsjubileet for Bohrs atommodell er en fin anledning til å gjøre den virkelige historien om Bohrs vei til kvantemodellen for atomet kjent for fysikere, studenter og lærere. Hovedkildene til denne fremstillingen er brev skrevet av Niels Bohr til sin bror, Harald, og til Ernest Rutherford, og et notat som han skrev til Rutherford i juni-juli 1912. Disse finnes i "*Niels Bohr, Collected Works*".⁽²⁾

Til Cambridge for å diskutere metallenes elektronteori

13. mai 1911 forsvarte Niels Bohr med stor suksess sin doktoravhandling, "*Studier over metallernes elektrontheori*", som var en grundig gjennomgang og kritisk analyse av andre fysikers elektronteorier for egenskaper til metaller. Bohr fant feil i noen av teoriene, blant annet påpekte han at det teoretiske grunnlaget for J.J. Thomsons beregninger av metallenes absorpsjonsevne ikke var riktig.

Det var naturlig for Bohr å fortsette studiet av elektronteorier for metaller, og da han fikk stipend fra Carlsbergfondet for et utenlandsopphold, valgte han å reise til Cambridge for å studere under ledelse av Thomson. Seint i september 1911 satt han på fergen over Storebælt på vei til England og skrev til sin forlovede: *Jeg reiser ud med alt mitt dumme vilde mod*. Den 26 år gamle post-doktorstudenten håpet inderlig at Thomson ville lese avhandlingen

(som hadde fått en røff engelsk oversettelse) og innse hvor viktig det var å få den publisert.

Det første møtet med Thomson svarte til forventningene, og Niels skrev til broren Harald: *Aa Harald! Det gaar meg saa storartet ... Du skulle vide hva det var for mig at tale med en saadan Mand*. Han avslutter brevet med å skrive: *Men først og sidst er jeg saa glad og taknemlig, at jeg ikke kan sige det, fordi min Afhandling er ferdig og at jeg kunde give Thomson den*. Men direktøren for *Cavendish Laboratories* var ikke interessert i å lese avhandlingen eller diskutere gamle feil i en teori han ikke lenger var opptatt av, med en entusiastisk dansk student han nesten ikke forstod hva sa.

Bohrs entusiasme blir etter hvert erstattet av en voksende skuffelse. I oktober skriver han til Harald: *Jeg har det så udmærket, ...men han (Thomson) er meget vanskelig at komme til at snakke med. Han har endnu ikke haft Tid til at læse min Afhandling, og jeg ved endnu ikke om han vil gaa ind på min Kritik...naar man har talt et Øjeblik med ham, kommer han til at tænke paa et eller andet af hans egne Ting, og saa gaar han fra en midt i en Sætning*. Bohr forteller at han kun en gang i et par minutter for en ukes tid siden fikk anledning til å påpeke sin kritikk av Thomsons beregninger for metallenes absorpsjonsevne, men at Thomson ikke har nevnt det siden. Bohrs dårlige engelsk skapte vanskeligheter for han også i laboratoriet. En stakkels udlænding, der ikke engang kender ordene for de ting, han ikke kan finde, er virkelig dårlig stillet.⁽³⁾ På tross av problemene med å få Thomson interessert i å diskutere metallenes elektronteori, skriver Bohr at han har det storartet og at han har meldt seg inn i en fotballklubb.

Thomson sørget for at avhandlingen ble sendt til tidsskriftet *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* for mulig publisasjon. Nå var det bare for Bohr å vente på komiteens avgjørelse. I et brev datert 12. februar 1912, skriver han til Harald at han ennå ikke har hørt noe fra bedømmelseskomiteen: *Jeg vilde jo snart blive glad for at faa min Afhandling offentliggjort*.

Til Manchester for å lære om radioaktivitet

I november 1911 var Bohr i et selskap i Manchester hos en venn av sin avdøde far. En annen gjest var Ernest Rutherford, som ledet verdens førende senter for eksperimentell forskning i radioaktivitet i Manchester. I samtalen med Rutherford uttrykte

Bohr at han var interessert å lære noe om radioaktivitet, og Rutherford svarte med å ønske han velkommen til Manchester.

I midten av mars 1912 reiste Bohr til Manchester hvor han straks gikk i gang med å ta laboratorie-kurs i radioaktivitet. I et intervju i 1962 sa Bohr: *Da jeg kom til Manchester, tenkte jeg på, hvor dejlig det ville blive at komme ind i radioaktivitetens teknik... Og jeg gik i et par uger til det kursus, de havde.* Det var altså ikke fordi han var opptatt av Rutherfords kjernemodell for atomet at Bohr i mars 1912 reiste til Manchester.

Etter noen uker i Manchester mistet Bohr imidlertid interessen for laboratoriearbeidet Rutherford hadde satt han til, og han brukte mer tid til teoretisk arbeid. Det var fortsatt metallenes elektron-teori som var i fokus for hans tanker, og han oppdaget stadig feil i nye artikler, og det var derfor av stor betydning for Bohr at hans avhandling ble publisert.

I mai 1912 kom brevet Bohr spent hadde ventet på i et halvt år, avgjørelsen fra bedømmelseskomiteen. Svaret var nedslående; ifølge komiteen måtte avhandlingen kortes ned til det halve om den skulle være interessant for publikasjon! Bohr ble fortvilet og usikker på hva han burde gjøre. Skulle han sørge for en bedre engelsk oversettelse og imøtekomme komiteens krav om å korte den ned til det halve? Bohrs tid i England var snart over uten at han hadde oppnådd det viktigste med oppholdet, nemlig å få avhandlingen offentliggjort. Arbeidene Thomson og Rutherford hadde satt han til, kom det heller ikke til å bli noen publikasjoner av. I et brev datert 27. mai skriver Bohr til Harald: *Jeg må dessverre straks sige, at jeg endnu ikke er sikker paa hvor meget der vil komme ud af det, Rutherford har satt mig til. Jeg mener med Hensyn til Offentliggørelse.* I dette brevet skriver Bohr om sin kritikk av eksisterende metallteorier med større entusiasme enn noen gang. Det er ingen ting som tyder på at han etter to måneder i Manchester hadde blitt interessert i Rutherfords kjernemodell for atomet. Men så skjedde det noe som fikk Bohr til å legge avhandlingen på hylla. Denne hendelsen fikk avgjørende betydning for Bohrs vitenskapelige liv og fysikkens utvikling.

I begynnelsen av juni skriver Bohr begeistret til Harald om et arbeid hans venn og kollega, Charles Darwin, hadde utført og skrevet en artikkel om. Darwin hadde beregnet fartstapet til heliumkjerner (α -partikler) når de passerer gjennom tynne gullfolier.

Grunnlaget, eller modellen, Darwin hadde gjort sine beregninger ut fra, var Rutherfords kjernemodell. Eksperimenter med α -spredning utført av fysikerne Hans Geiger og Ernest Marsden fra 1909 under ledelse av Rutherford, viste at noen α -partikler som passerte gjennom tynne gullfolier fikk banen sin avbøyd med 90° og mer. I artikkelen, *The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom*, forklarer Rutherford de store spredningsvinklene ved å anta at atomer har en ladd kjerne. Han skriver: *Consider an atom which contains a charge Ne at its centre surrounded by a sphere of electrification containing a charge Ne supposed uniformly distributed throughout a sphere of radius R ... It will be shown that the main deductions from the theory are independent of whether the central charge is supposed to be positive or negative. For convenience, the sign will be assumed to be positive.*⁽⁴⁾

Hovedpoenget i Rutherfords artikkel er at hvis atomets positive ladning er konsentrert i sentrum, slik den japanske fysikeren H. Nagaoka hadde foreslått allerede i 1904, kan α -partiklenes avbøyning forklares.⁽⁵⁾ Kollisjoner med elektronene i atomet kunne ikke være årsaken til de store avbøyningsvinklene. I Rutherfords modell er elektronene jevnt fordelt omkring den positivt ladde kjernen, og de beveget seg ikke i sirkelbaner. I alle tidligere atommodeller med elektroner, Jean Perrins planetmodell fra 1901, Thomsons modell fra 1904 og H. Nagaokas planetmodell fra 1904, beveger elektronene seg i sirkelbaner. Men Rutherford sier altså ingen ting om elektronenes bevegelse, og derfor ble hans kjernemodell heller ikke betraktet som en fullstendig atommodell.

Rutherfords modell fikk svært liten oppmerksomhet, og på Solvay-konferansen høsten 1911, der atomets struktur ble diskutert, nevnte ikke Rutherford sin egen modell. Bohr har fortalt at Rutherfords modell ikke ble nevnt noen steder. Forklaringen på dette kan være at Rutherfords artikkel først og fremst handlet om en modell som kunne begrunne resultatene fra α -spredningseksperimentene.

Darwins artikkel om α -partiklenes fartstap

Darwin hadde utledet en teori for α -partiklers fartstap når de passerer gjennom tynne metallfolier. Det er atomkjernen som forårsaker spredning av α -partiklene, men det er kollisjoner med atomets elektroner som forårsaker α -partiklenes fartstap.

I Rutherfords modell er elektronene homogent fordelt rundt kjernen, og ut fra Darwins beregninger skulle det være mulig å avgjøre om elektronene var jevnt fordelt over atomets overflate eller volum.

En viktig antakelse i Darwins beregninger var at α -partiklene kolliderer med frie elektroner. Resultatene av hans beregninger viste at atomenes radius avtok med økende atomvekt, og han fikk en altfor stor radius for de letteste atomene. Da Bohr leste artikkelen, forsto han med det samme hvorfor Darwins teoretiske beregninger viste disse svakhetene. Elektronene er ikke frie, men bundet til atomkjernen, og elektronenes bevegelse har betydning for α -partiklernes fartstap! Han skriver om dette til Harald 12. juni: *Det gaar mig ikke saa helt daarligt i Øjeblikket, jeg havde for et Par Dage siden en lille Ide med Hensyn til Forstaaelsen af Absorption af α -Straaler. Det gik til paa den Maade, at en Matematiker her, C.G. Darwin, (Sønnesønn af den rigtige Darwin) lige har offentliggjort en Theori om dette Spørmaal, og jeg syntes, at den ikke alene ikke var rigtig i det matematiske (det var kun temmelig lidt) men noget utilfredsstillende i Grundopfattelsen, og har udarbejdet en lille Theori derom, der selv om den er lille, maaske dog kan kaste lidt Lys over nogle Ting med Hensyn til Atomers Bygning. (...) Du kan tro at det er morsomt at være her, her er så mange at tale med.*

En travel ung mann

Bohr var overbevist om at elektronenes fart og binding til kjernen har betydning for energitapet α -partiklene får i sammenstøtene. I sin egen beregning tar han hensyn til dette ved å betrakte atomet som en harmonisk oscillator, der elektronene er elastisk bundet til kjernen. Krefter utenfra vil sette systemet i vibrerende bevegelser. Langt viktigere enn å utarbeide en forbedret teori for α -partiklers fartstap gjennom atomer, er at Bohr blir opptatt av å utforske "Atomets Bygning" og legger doktoravhandlingen til side. I det neste brevet til Harald, datert 19. juni, skriver Bohr om atomets indre struktur med en entusiasme som tidligere var forbeholdt metallenes elektronteori: *Det kunde være at jeg maaske har fundet ud af en lille Smule om Atomernes Bygning ... Det har altsammen vokset ut av en lille Oplysning jeg fik fra α -Straalernes Absorpsjon.* Bohr har nå fått det veldig travelt. Han skulker laboratoriearbeidet, og det neste brevet til Harald blir først sendt 17. juli: *Det går mig temmelig godt, for jeg tror jo, jeg har fundet ud av nogle*

forskellige Ting; men det er rigtignok ikke gaaet saa hurtigt med at udarbejde dem, som jeg straks var saa dum at tro. Jeg haaber at faa en lille Afhandling færdig og at vise Rutherford den førend jeg rejser, og jeg har derfor så travlt, saa travlt.

Rutherfordnotatet

Bohrs første ideer om atomstrukturen kjenner vi fra en avhandling, kalt Rutherfordnotatet, med tittel *On the Consitution of Atoms and Molecules*. Bohr leverte notatet til Rutherford i juli 1912 for at han skulle lese gjennom det.

Bohr innleder notatet med å slå fast at for å kunne forklare de store spredningsvinklene til α -partiklene, må atomet ha en kjerne, men at det i et slikt atom umulig kan forekomme likevektskonfigurasjoner hvis elektronene ikke er i bevegelse. Det første Bohr gjorde var derfor å sette elektronene i sirkelbevegelse rundt kjerna. Han skriver videre at i denne modellen finnes det ingen stabile baner (ringer) ut fra klassisk fysikk, slik det er i Thomsons modell: *It can very simply be shown, that a ring as the one in question possesses no stability in the ordinary mechanical sense ... the question of stability may therefore be treated from a quite different point of view.* Stabilitetsproblemet skyldes at elektronene i ringen vil frastøte hverandre samtidig som de tiltrekkes av den positivt ladde kjerna.

Modellen Bohr valgte, er altså mekanisk ustabil. I tillegg til å være mekanisk ustabil, hadde Bohrs modell enda et paradoks å by på: Det var umulig å beregne atomets størrelse.

I stedet for å gi opp modellen, innførte Bohr en hypotese som ikke kunne forklares innenfor klassisk fysikk: *for any stable ring (any ring occurring in the natural atom) there will be a definite ratio between the kinetic energy of an electron in the ring and the frequency of rotation. This hypothesis for which there will be given no attempt of a mechanical foundation (as it seems hopeless) is chosen as the only one which seems to offer a possibility to an explanation of the whole group of experimental results.*

Hypotesen er altså at den kinetiske energien til et elektron i en ring er gitt ved $E = K\nu$, der K er en konstant og ν er elektronets omløpsfrekvens. Ut fra denne hypotese (som minner om Plancks uttrykk for energien til grunntilstanden til en oscillerende ladning) og klassisk mekanikk, var det mulig å utlede et uttrykk for sirkelbanens radius, elektronets totale energi W og omløpsfrekvensen. Den totale

energien til et elektron er gitt ved:

$$W = X^2 \frac{me^4 \pi^2}{2K^2} \quad (1)$$

der $X = 1$ når det kun er ett elektron i banen og større enn 1 for flere elektroner, m er massen til elektronet og e er ladningen. Konstanten K gir Bohr ingen bestemt verdi i dette notatet. Ut fra disse likningene kunne Bohr forklare mange eksperimentelt bestemte egenskaper til atomer. Det viktigste i dette notatet er at atomets mekaniske stabilitet ikke kunne forklares innenfor klassisk fysikk. Bohr introduserte en betingelse for stabilitet utenfor den klassiske fysikken, en sammenheng mellom elektronets kinetiske energi og omløpsfrekvensen. Bohr nevner imidlertid ikke problemet med strålingsustabilitet på grunn av elektroner i sirkelbevegelser i dette notatet. Atomenes linjespekter er han heller ikke interessert i å forklare. Det er egenskaper til atomene i normaltilstanden (grunntilstanden) som opptar han.

Bohr i København

24. juli 1912 reiste Bohr fra Manchester tilbake til København. Han giftet seg 1. august med Margrethe, og bryllupsreisen gikk først til Cambridge hvor Bohr gjorde ferdig artikkelen om absorpsjon av α -partikler (publisert i januar 1913), og dro deretter videre til Manchester. I september reiste paret tilbake til København, og Bohr ble vitenskapelig assistent i fysikk ved Universitetet i København.

Arbeidet på laboratoriet tok mye av Bohrs tid, og problemene med atomstrukturen fikk han lite tid til å gruble over. Han skriver til Rutherford 4. november: *Jeg beklager at jeg ikke ennå har hatt anledning til å gjøre ferdig artikkelen min om atomer og kan sende den til deg, men frem til nå har jeg hatt så mye å gjøre med forelesninger og laboratoriearbeid at jeg kun har hatt meget lite tid igjen.*

Rutherford svarer 11. november: *Jeg tror ikke at du behøver å føle deg presset til å fremskynde utgivelsen av din andre artikkel om atomets struktur, da jeg ikke tror det er sannsynlig at noen andre arbeider med dette emnet.* Rutherfords svar tyder på at å videreutvikle hans kjernemodell ikke er et sentralt forskningsfelt ett og et halvt år etter at den ble publisert.

I det neste brevet til Rutherford datert 31. januar 1913, understreker Bohr at hans teori ikke vil inneholde forsøk på forklare linjespektrene.

Han skriver: *Jeg befatter meg overhodet ikke med spørsmålet om beregninger av de frekvenser som svarer til linjene i det synlige spekteret. Jeg har kun forsøkt, på grunnlag av en enkel hypotese som jeg har benyttet fra starten av, å diskutere atomets og molekylens struktur i deres "permanente" tilstand; det vil si at jeg har forsøkt å utlede det angjeldende systems enkle generelle egenskaper uten – i tråd med ditt råd – å begi meg inn på detaljerte beregninger av noe spesielt system annet enn det aller enkleste.*

I et brev skrevet 7. februar til George Hevesy, som Bohr ble kjent med i Manchester, forteller Bohr om innholdet i det arbeidet det haster med å få publisert. Fra innholdet i dette brevet er det mye som tyder på at Bohr nå har antatt at konstanten K er lik $(1/2)h$, og dermed er energiuttrykket for et elektron i en ring med ett elektron, altså hydrogenatomet, gitt ved:

$$W = \frac{2me^4 \pi^2}{h^2} \quad (2)$$

Bohr hadde på dette tidspunktet en klassisk forestilling om mekanismen bak emisjon fra atomet. Han tenkte seg at spektrallinjene fremkom ved at et fritt elektron falt på plass i en bane, roterte om kjernen med en bestemt frekvens og vibrerte med karakteristiske frekvenser vinkelrett på banen. Spekterets linjer hadde samme frekvenser som vibrasjonsfrekvensene. Når strålingen var utsendt, falt elektronet til ro i en enkel sirkulær bevegelse om kjernen.

Thomson og Nagaoka forklarte emisjon av stråling på samme måte i sine modeller. Bohr var ikke opptatt av å undersøke frekvensene i strålingen fra atomene, hans arbeid gikk ut på å forklare egenskaper til atomene i deres permanente tilstand.

Kvantefysikeren Leon Rosenfeld spurte Bohr i et intervju i 1962 om hvordan han oppfattet spektrene før han ble klar over informasjonen de gav om atomstrukturen. Bohr svarte: *Man mente at spektrene var herlige, men at det var umulig at komme videre her. Ligesom når man har med en sommerfugls vinge at gøre er den meget regelmæssig med farver og så videre, men ingen troede, at man kunne nå ind i biologiens kerne ved hjælp av farverne på en sommerfugls vinge.*

Helt siden midten av 1800-tallet hadde mange fysikere utforsket egenskaper ved lyset som blir emittert fra atomer. Det mest interessante resultatet var at det emitterte lyset består av et sett med frekvenser, som enkelte linjer i et spekter og som er

karakteristisk for det enkelte atomet. Men Bohr var altså ikke opptatt av å prøve å forklare denne egenskapen til atomene, først og fremst fordi han ikke trodde linjene i spektrene hadde noe å fortelle om atomets oppbygning.

Balmers formel

6. mars 1913 sendte Bohr et utkast til Rutherford av første kapittel av artikkelen han så lenge hadde lovet. Tittelen var: *On the Constitution of Atoms and Molecules*. Rutherford må ha blitt svært overrasket da han leste artikkelen, for den handlet nesten utelukkende om en forklaring på linjespektrene! Bohr hadde jo understreket flere ganger at han overhodet ikke var opptatt av å forklare frekvensene i strålingen fra atomene. Men han hadde altså plutselig endret oppfatning, og i brevet til Rutherford skriver han: *I det siste har jeg hatt god fremgang i arbeidet mitt, og håper å ha lykket i å utvide de hensyn som benyttes i en rekke forskjellige fenomener, slik som emisjon av linjespekter.*

Hva hadde fått Bohr til plutselig å bli interessert i linjespektrene? I februar hadde den danske fysikeren Hans Marius Hansen kommet på besøk. Han var ekspert på atomspektre, og i samtalen spurte han Bohr om hans teori stemte overens med Balmers formel for frekvensene til linjene i hydrogenspektret. Bohr, som ikke hadde vært opptatt av spektrene og ikke hadde gjort noen beregninger for frekvensene i spektrene, måtte innrømme at han ikke kjente til denne formelen, men han lovet å finne ut av det.

I 1885 hadde Balmer kommet frem til en matematisk formel for de empirisk bestemte frekvensene. Bohr hadde helt sikkert lært formelen på skolen, men altså glemt den. Balmers formel kan skrives på formen:

$$f = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad (3)$$

der f er en linjes frekvens, $R = 3,29025 \cdot 10^{15}$ /s og kalles rydbergkonstanten, og n er et naturlig tall større enn 2.

Bohr har fortalt at straks han så Balmers formel forsto han mekanismen bak utsendelsen av stråling fra atomer. Det er sannsynlig at Bohr så likheten mellom Balmers formel og sitt eget uttrykk for energien til elektronet i hydrogenatomet (2). Differansen mellom to energiuttrykk vil få samme form som Balmers formel! Ved å innføre flere baner med økende kinetisk energi gitt ved $E_n = nKf$, der

$n = 1, 2, 3, 4, 5 \dots$ og $K = (1/2)h$, der h er planckkonstanten, beregnet Bohr differansen mellom energien til to baner, n_2 og n_1 , til å bli:

$$W_{n_2} - W_{n_1} = \frac{2me^4\pi^2}{h^2} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (4)$$

Energitalpet til atomet må være like stort som energien til strålingen.

Bohr var nå et lite, men revolusjonerende skritt fra en formel for frekvensen i strålingen fra hydrogenatomet, å løsrive strålingens frekvens fra mekaniske frekvenser i atomet! Han lot frekvensen til strålingen være gitt ved energiforskjellen mellom to tilstander dividert med planckkonstanten:

$$F = \frac{W_{n_2} - W_{n_1}}{h} = \frac{2me^4\pi^2}{h^3} \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (5)$$

Bohr må ha vært spent da han regnet ut verdien av konstantleddet, og svært lykkelig da det viste seg at den var $3,1 \cdot 10^{15}$ /s, omtrent lik rydbergkonstanten i Balmers formel.

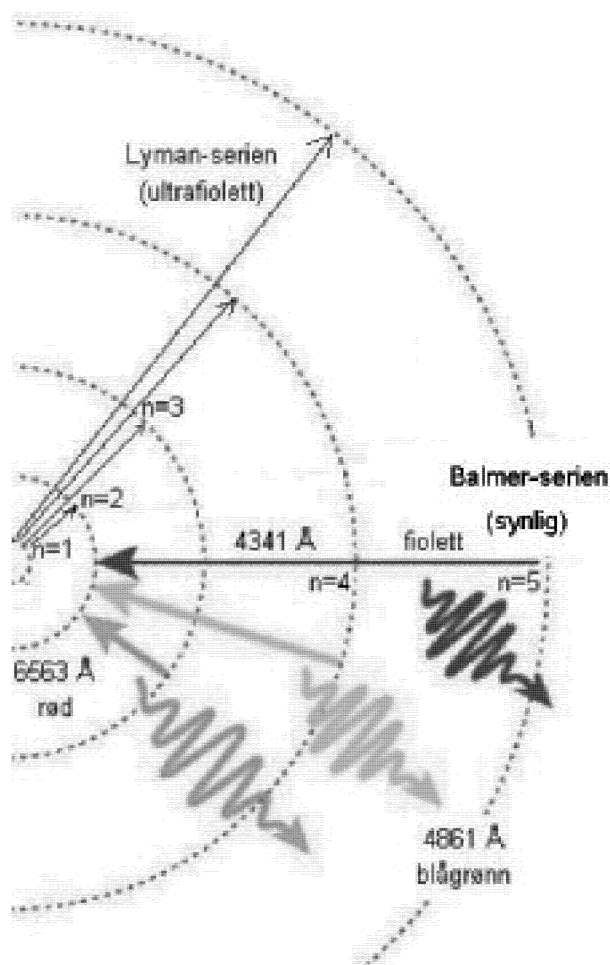
Kapittelet Rutherford fikk tilsendt i begynnelsen av mars handlet nesten utelukkende om en kvanteteori for atomenes linjespekter. Bohr forklarte frekvensene i linjespekteret ut fra en revolusjonerende idé som innebar at strålingens frekvens er løstrevet fra mekaniske frekvenser i atomet. I Plancks teori for oscillerende ladninger, er energien kvantisert, men strålingen som emitteres har samme frekvens som ladningens oscillasjonsfrekvens. I Bohrs teori for atomet er frekvensen gitt ved forskjellen mellom to energitilstander. Det var vanskelig for Rutherford å akseptere.

I sitt svarbrev, datert 20. mars, skriver Rutherford: *Artikkelen din har ankommet trygt, og jeg har lest den med stor interesse, men jeg vil gjerne se grundig gjennom den igjen når jeg har bedre tid. Dine ideer om spekteret og hydrogenets opprinnelsesmåte er svært geniale og later til å fungere godt, men blandingen av Plancks ideer med gammel mekanikk gjør det meget vanskelig å utvikle fysiske ideer om hva som ligger til grunn for dem. Jeg ser én alvorlig vanskelighet med hypotesen din, noe som du selv utvilsomt er fullstendig klar over, nemlig hvordan et elektron bestemmer hvilken frekvens det skal vibrere med når det går over fra én stasjonær tilstand til en annen. Det virker for meg som om du da må anta at elektronet på forhånd vet hvor det kommer til å stoppe.*

Det er ifølge Rutherford, et stort problem i Bohrs teori for atomenes linjespekter. Bohr begrun-

ner sin radikale antakelse i kapittelet på flere ulike måter, som Rutherford kommenterte slik: *Jeg tror at du i din iver etter å være tydelig har en tendens til å komme med konklusjonene dine i forskjellige deler av artikkelen. Jeg synes artikkelen din bør forkortes, og jeg tror at dette kan gjøres uten å måtte ofre tydeligheten. Jeg vet ikke om du er klar over at lange artikler har en tendens til å virke avskrekkende på lesere, som da føler at de ikke har tid til å sette seg inn i dem.* Rutherford skriver videre at han ser frem til å lese de neste kapitlene, men ber Bohr ta til seg hans råd om å fatte seg i korthet. Det hører med til historien at Bohr reiste til Rutherford og kjempet for hvert ord i artikkelen, som ble publisert i juli 1913.

I Bohrs modell er strålingens frekvens bestemt av energiforskjeller i atomet, se figur 2. Men siden Bohr var en standhaftig motstander av Einsteins fotonteori helt fram til 1925, var det ikke fotoner som ble emittert fra atomet, men elektromagnetiske bølger.



Figur 2. Bohrs modell av hydrogenatomet med elektronbaner og spektrale overganger.

Korrespondanseprinsippet

Bohr begrunnet at konstanten K i uttrykket for kineisk energi må være $(1/2)h$ ut fra et prinsipp som senere ble kalt for korrespondanseprinsippet, at kvanteteorien må ha klassisk teori som et grensetilfelle. Han setter uttrykket for kinetisk energi: $W = f(n)h\omega_n$ der f er en ukjent funksjon og ω_n er omløpsfrekvensen i bane n . Men skal Bohr få noe som minner om Balmers formel, må han la $f(n) = C \cdot n$, der C er en konstant. En overgang fra en tilstand hvor $n = N$ til en tilstand $n = (N - 1)$, gir stråling med frekvens:

$$f = \frac{\pi^2 m e^4}{2 C^2 h^3} \left(\frac{1}{(N-1)^2} - \frac{1}{N^2} \right) = \frac{\pi^2 m e^4}{2 C^2 h^3} \cdot \frac{2N-1}{N^2(N-1)} \quad (6)$$

De tilsvarende omløpsfrekvensene for elektronet i banene med $n = N$ og $N - 1$ er:

$$\omega_N = \frac{m e^4 \pi^2}{2 C^3 (N)^3 h^3} \quad (7)$$

og

$$\omega_{N-1} = \frac{m e^4 \pi^2}{2 C^3 (N-1)^3 h^3} \quad (8)$$

Hvis N er stor, skriver Bohr, vil forholdet mellom elektronets omløpsfrekvens før og etter emisjonen være omtrent lik 1, og ifølge klassisk fysikk skulle vi forvente at forholdet mellom frekvensen til emittert stråling og omløpsfrekvensen til elektronet også skulle bli svært nær 1.

$$\frac{f}{\omega_N} = \frac{C N^3 (2N-1)}{N^2 (N-1)^2} \quad (9)$$

går mot $2C$ for store N , og er lik 1 dersom $C = 1/2$. Dette prinsippet, altså at kvanteteorien skal ha klassisk fysikk som et grensetilfelle, fikk stor betydning for kvantefysikkens utvikling.

Mottakelse

For noen fysikere var det utenkelig at Bohrs forklaring på atomenes linjespekter kunne være riktig. Stråling fra atomer burde ifølge Maxwells teori, komme fra elektronenes vibrasjoner; men Bohrs idé innebærer at strålingen fra atomene har en helt annen forklaring. Blant fysikerne som ganske tidlig trodde på Bohrs forklaring, var Albert Einstein. Hans reaksjon var: *Så avhenger altså ikke frekvensen i lyset som sendes ut fra et atom med frekvensen til elektronet i atomet. Dette er et enormt fremskritt.*

Den unge fysikeren Henry Moseley skrev om Bohrs nye atommodell: *Deres teori har en storartet innflytelse på fysikken, og jeg tror at når vi virkelig vet hva et atom er, hvilket vi utvilsomt gjør om et par år, vil Deres teori ha en stor del av æren, selv om den måtte være feil i sine detaljer.*

Bohrs modell viste seg ganske snart å være feil i sine detaljer, men den revolusjonerende ideen om at frekvensen til strålingen fra et atom er gitt ved differansen mellom to energitilstander i atomet gjelder ennå.

Referanser

1. R. Renstrøm: *Kvantefysikkens utvikling*. Avhandling for graden PhD ved Universitetet i Oslo (2011)
2. Niels Bohr: *Collected Works (Vol 1 og 2)*. North-Holland Publishing Co. Amsterdam (1972) og (1974)
3. A. Pais, sitert: *Niels Bohr i hans tid i fysik, filosofi og samfundet*. Spektrum, (1886) s. 138
4. E.J. Rutherford: *The Scattering of α and β Particles by Matter and The Structure of the Atom*. Philosophical Magazine **21**, 669-669 (1911)
5. H. Nagaoka: *Kinetics of a System of Particles illustrating the Line and the Band Spectrum and the Phenomena of Radioactivity*. Phil. Mag., Ser 6, **7**, 445-455 (1904)

∞

Braggs lov i 100 år

*Emil J. Samuelsen og Dag W. Breiby **

Det er i år 100 år sidan William Lawrence Bragg formulerte det som i ettertid går under namnet Braggs lov. Formuleringa er heilt sentral for utviklinga av diffraksjonsbasert utforskning av den indre strukturen i krystallinsk materiale, og er grunnlaget for all vår kunnskap om krystallstrukturar. I 1915 fekk William Lawrence Bragg Nobelprisen i fysikk saman med far sin, William Henry Bragg, "för sina tjänster i analysen av kristallstrukturen genom röntgen", det vil seie for formuleringa av Braggs lov og for strukturbestemming gjort med røntgenutstyr som dei utvikla.

Innleiing og bakgrunn

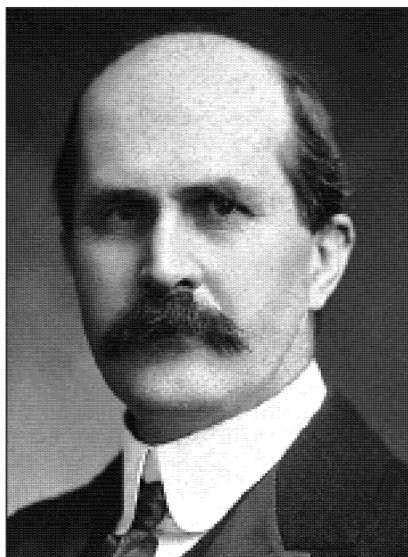
Dei første 10–15 åra av nittenhundretalet var ei særers fruktbar tid for utviklinga av vår forståing og innsikt i korleis materiala er oppbygde. Wilhelm

Conrad Röntgen hadde oppdaga røntgenstrålinga i 1896, og Joseph J. Thomson påviste elektronet i 1897. Max Planck lanserte ideen om energikvantisering i 1900. Hendrik Lorentz, Henri Poincaré, Albert Einstein og andre lanserte idear som førte til framveksten av relativitetsteorien. Framover mot 1910 føregjekk det heftige diskusjonar om atoma si oppbygning, og om kva røntgenstrålinga eigentleg var. Det første spørsmålet fekk sitt svar gjennom Rutherford og medarbeidarars eksperiment i 1909, Bohrs atommodell av 1913 og seinare utvikling av kvantefysikken.

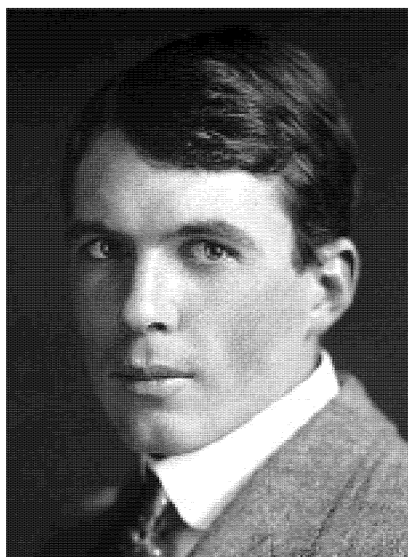
Om røntgenstrålinga var det to hovudidear som tevla, ein at det er ein partikkelstråle og ein annan at strålen er ei bølge av elektromagnetisk natur. Dette spørsmålet blei avklara i 1912. Elektromagnetiske bølger må ha eigenskapar som synleg lys og følgje optiske lover, så ein skulle kunne påvise interferens og diffraksjon, og også refraksjon av strålinga ved overgang mellom materiale og luft eller vakuum. At ein ikkje hadde greidd å påvise målbar refraksjon, kunne forklarast dersom bølglengda var så kort at refraksjonen ville vere

* Institutt for fysikk, NTNU, Trondheim.

ubetydeleg. Når det galdt diffraksjon foreslo *Max Laue* (1879–1960) i 1912, inspirert av Paul Peter Ewald, at eventuell bølgenatur kunne påvisast ved å sende røntgenstrålar gjennom eit gitter som hadde tilsvarande korte repetisjonsavstandar.



Figur 1a. William Henry Bragg (1862–1942)



Figur 1b. William Lawrence Bragg (1890–1971)

I 1912 hadde ein enno ikkje noka klar forståing av den indre strukturen i krystallinske materiale. Men alt i 1850-åra, i tida då den klassiske, makroskopiske krystallografien blei utvikla, hadde mellom andre *A. Bravais* (1811–1863) framsett idear om at krystallar består av geometrisk velordna atomære byggeiningar, det som blir kalla

romleg gitter. Gitterdimensjonane kjente ein ikkje, men intelligente gjettingar gav verdiar av storleik 10^{-9} meter. (Bravais var elles med på den franske Recherche-ekspedisjon til Finnmark og Svalbard 1838–40).

Laue fekk assistentane sine, W. Friedrich og P. Knipping, til å prøve følgjande eksperiment: Dei fekk tak i ein krystall av eit stoff som lett dannar pene velutvikla krystallar, nemleg det blå stoffet kopparvitriol ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), også kjent som blåstein. Dessverre har kopparvitriol ein nokså komplisert krystallstruktur, slik at fortolkinga av måleresultat på dette stoffet ikkje er endefram. Forskarane sende ein stråle av røntgen inn mot ei tynn skive av stoffet. Strålen dei nytta inneheldt eit heilt spektrum av bølglengder. På baksida hadde dei ein fotografisk film, og på filmen fann dei at det var utvikla systematiske flekkar av svertning: Røntgenstrålen var blitt *diffraktert* i krystallgitret! Same resultat vart funne med andre krystallar. Dette var eit uhyre viktige resultat som gav to epokegjerande konklusjonar: Røntgenstrålar er bølger, og atoma i krystallar er ordna i regelmessige romlege gittermønster. For dette arbeidet vart Nobelprisen i fysikk tildelt Max Laue i 1914.

Men Max Laues arbeid resulterte ikkje i tolking av den observerte diffraksjonen i form av strukturinformasjon. Det skulle bli far og son Bragg som gjorde det.

W. H. og W. L. Bragg, og ein nordmann

William Henry Bragg (1862–1942) var professor ved universitetet i Adelaide i Australia då sonen *William Lawrence Bragg* (1890–1971) vart fødd. Familien flytta heim til England i 1908 då William H. Bragg vart professor ved universitetet i Leeds, og W. Lawrence Bragg vart innrullert som student i fysikk ved Trinity College i Cambridge. For å halde dei to personane med same første fornamn frå kvarandre, er det vanleg å kalle faren William og sonen Lawrence.

Ein nordmann skulle komme til å spele ei avgjerande rolle for Bragg-ane sitt epokegjerande arbeid i 1913. Det var *Lars Vegard* (1880–1963), som seinare vart professor i fysikk ved Universitetet i Oslo, og som m.a. har fått "Vegards lov" i legeringsfysikken kalla opp etter seg. Vegard hadde studert i England, og han hadde eit opphald ved universitetet i Würzburg i 1912 der han hadde hørt om Laue sine eksperiment. Frå Würzburg sendte han eit brev til

William Bragg med svært detaljerte skildringar av Laues forsøk.

William Bragg hadde inntil då vore tilhengar av ideen om at røntgenstrålinga var ein partikkelstråle, men brevet frå Vegard gjorde spesielt sonen, Lawrence, overtydd om at ein har å gjere med ein bølgestråle. (I dag veit vi at også partikkelstrålar gir opphav til diffraksjon i krystallgitter etter de Broglies partikkel-bølgerelasjon: Ikkje berre røntgen-strålar blir no nytta i materialforskinga, men også nøytron- og elektron-strålar). Etter brevet frå Vegard gjekk far og son Bragg inn i heftige drøftingar, og Lawrence tok straks til å arbeide teoretisk med dei nye problemstillingane dette førte med seg. Det var altså sonen, W. Lawrence Bragg, som formulerte det som seinare har komme til å gå under namnet *Braggs lov*. Denne historiske framstillinga er etter referanse (1).

Braggs lov

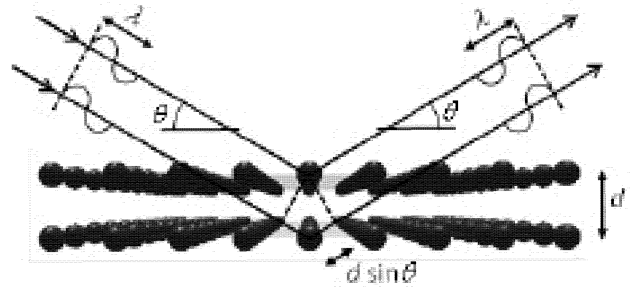
Denne lova er ei matematisk formulering av vilkåra for at diffraksjon frå (tredimensjonale) krystallar kan finne stad:

$$n\lambda = 2d\sin(\theta). \quad (1)$$

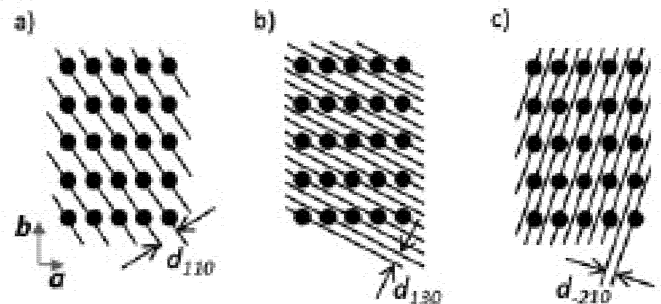
Formuleringa inneheld tre parametar: λ er bølglengd for strålen som blir nytta, θ er halvparten av vinkelendringa 2θ som diffraksjonen gir, d er avstanden mellom plan av atoma i krystallen, og n er heile tal.

Det geniale i utleiinga av denne tilsynelatande enkle formelen er Lawrences konstatering at alle velordna krystallinske strukturar kan oppfattast som *plan* av spreide atom eller molekyl, der d er minsteavstanden mellom slike plan, illustrert i figur 2 og 3.

Utgangspunktet til Lawrence Bragg var nok inspirert av den klassiske krystallografien som var eit velutvikla fagfelt alt frå før 1860. Der nyttar ein dei såkalla *Miller-indeksane* h , k og l for å beskrive ytre flater (hkl) i makroskopiske krystallar, t.d. mineral. Som det framgår av figur 3, kan ein legge mange sett av plan som går gjennom alle krystallgitterpunkta. Skråheten til plana blir definert med indeksane h , k , l , definert slik at eit gitt plan (hkl) kuttar ein del a/h , b/k og c/l av sidekantane a , b , og c av den repeterande einingscella i dei tre akseretningane a , b og c . Den næraste avstanden d mellom plana er avhengige av hkl . Lawrence betrakta diffraksjonen som ein refleksjonsprosess frå



Figur 2. Tolkning av Braggs lov som konstruktiv interferens mellom strålar reflektert frå *plan* av atom med avstand d , her berre to plan: Når gangvegsforskjellen mellom dei to strålane, $2d\sin(\theta)$, er lik multiplum av bølglengda, $n\lambda$, blir interferensen konstruktiv.



Figur 3. Eit gitter av punkt i rektangulært mønster: Ein kan legge sett av plan (linjer) som går gjennom alle gitterpunkta, illustrert med a) (110); b) (130); c) (-210), der a -aksen går horisontalt, b -aksen går vertikalt oppover og c -aksen går ut av papiret. Plana loddrett på a -aksen er (010) og loddrett på b -aksen (100).

setta av alle plan (hkl). Som i optikken skulle ein få "konstruktiv interferens" med sterke refleksar for retningsvinklar θ som gav gangvegsforskjellar for refleksjon frå naboplan som var multiplum av bølglengda, $n\lambda$, og destruktiv interferens elles. Vinkelen θ varierer med hkl . Styrken (intensiteten) av dei diffrakterte strålane måtte bereknast i eit steg for seg.

William Bragg, altså faren, presenterte desse resultata i november 1912 for *Cambridge Philosophical Society*. Dei blei trykte i 1913 med Lawrence Bragg som forfatar,⁽²⁾ og 1913 blir rekna som opphavsåret for Braggs lov.

Tilvising til dette arbeidet og to av dei andre tidlege publikasjonane nemnde nedanfor, kan ein finne i referansane (2, 3 og 4). Artiklane er tilgjengelege på internett i scanna form via biblioteknett.

Braggs lov i bruk

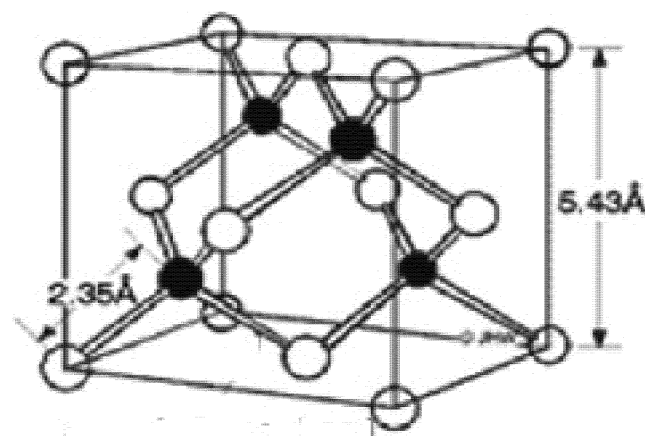
Av dei to Bragg-ane var William eksperimentatoren. Han var ikkje tilfreds med å registrere røntgendiffraksjonen berre på fotografisk film og med "kvit stråle", dvs. eit heilt spektrum av bølgjelengder samtidig, som Laue hadde gjort. Braggs instrument kunne måle styrken av den spreidde røntgenstrålen punkt for punkt som funksjon av spreivingsvinkel med ein ionisasjonsdetektor. Han nytta "karakteristisk stråling" frå palladium, altså "monokromatisk stråling", som har bølgjelengd 0,0576 nm, som han sjølv måtte bestemme.

Utover i 1913 og 1914 utførte dei to ei rekke røntgenstudium av uorganiske krystalliske materiale, mellom anna mange mineral som dei fekk låne frå Geologisk museum i Leeds. Resultata blei publiserte dels med begge som forfattarar, men også i høg grad som separate arbeid av kvar av dei to. Det var nok heldig, eller var det klokskap, at dei starta med det vi i dag vil kalle enkle strukturar, f.eks. kubiske materiale som alkaliehalid NaCl, KBr, KCl og sinkblende ZnS. Dei løyste også strukturen for diamant, som har same strukturen som viktige halvleiarar silisium, Si, og germanium, Ge, (figur 4). Eksempelvis bestemte William krystallstruktur for kvarts SiO_2 , og for svovel S. Lawrence studerte svovelkis FeS_2 , haueritt MnS_2 , fluoritt CaF_2 , natriumnitrat NaNO_3 , kalsitt CaCO_3 , dolomitt $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, og elles Fe- og Mn-karbonat, publisert i 1913 og 1914.^(2,3,4) Ein del av desse strukturane er rett kompliserte. Vi synest det er imponerende i dag å sjå kor god innsikt og forståing forfattarane hadde av symmetri- og romgruppe-beskriving av krystallografien, kanskje spesielt i arbeida til Lawrence.

Interessant er det å konstatere at ein i 1913 enno ikkje hadde innsyn i kva for spreivingsmekanismar som styrer diffraksjonen, og derfor arbeidde ut frå ei gjetting at spreivingssevna var proporsjonal med atommassen. Som kjent er det atomnummeret, dvs. elektrontallet, som styrer spreivingssevna, noko som vart avklara kort tid seinare.

Betydninga av Braggs lov

Det å beskrive diffraksjon i krystallar som ein refleksjon frå krystallgitterplan var ein særskild effektiv og forenklande innfallsport til å finne fram til ei nyttig tolking av diffraksjonsdata. Det gjeld ikkje berre røntgendiffraksjon, men like mykje elektron-



Figur 4. Diamant var ein av krystallstrukturane som tidleg blei bestemt. Til høgre atomplasseringa i den kubiske elementærcella, som har sidekantar $a = b = c = 0,356 \text{ nm}$ og kortaste atomavstand $0,235 \text{ nm}$. I diamant er alle atoma karbon, C, både dei fylte og dei tomme sirklane. Strukturen gjeld også for germanium, Ge, og grått tinn, Sn, likeeins for sinkblende, ZnS, og for GaAs og andre liknande halvleiarar, der fylte og tomme sirklar er ulike atom.

diffraksjon og diffraksjon av termiske nøytronar, og også diffraksjon av laserlys frå "optiske krystallar" av kolloidpartiklar i suspensjon. Men formelen er ikkje spesielt sentral for tolkinga av slike materialstudiar i dag, fordi ein heller beskriv diffraksjonen utifrå kvantemekaniske spreivings-formuleringar, som uttrykker spreivingssevna som funksjon av spreivingsretning gjennom veletablerte formalar.⁽⁵⁾ Likevel tyr ein ofte til Braggs lov for snøgge overslagsvurderingar.

Braggs lov i form av formel (1) er i dag å finne i alle lærebøker i fysikalsk metallurgi og faststoff-

fysikk. Ein kan gjerne seie at dette nok kan føre til at studentane får eit for lettvinnt og overflatisk inntrykk av kva diffraksjon inneber. I dag studerer vi for eksempel også strukturar som er ein-dimensjonale, slik som buntar av polymerkjeder, og to-dimensjonale, som lagdelte strukturar, krys-talloverflater og adsorbantar. Formel (1) er ikkje generelt gyldig for slike tilfelle. Det same gjeld for studium av nanomateriale.

For godt krystalliserte materiale er oppklaring og bestemming av nye strukturar i dag ein automatisert prosess, der hovudbegrensinga ligg i det å skaffe gode krystallar av stoffet. Når det er gjort og prøva er plassert på diffraktometeret, kan ein overlata arbeidet til automatikken, som normalt vil gi svaret etter nokre timars dataopptak og fortolking. Ikkje minst gjeld dette for strukturbestemming for krystallar av store og kompliserte molekyll som protein.

Vi finn det rett å nemne her at i dag blir røntgen brukt til mange andre aspekt i material-forskinga enn oppklaring av krystallstrukturar. For bruk av moderne røntgenkjelder som synkrotronar og røntgenlaserar viser vi til ref. (6 og 7).

Far og son Bragg

Som nemnt i innleiinga delte William H. Bragg og W. Lawrence Bragg Nobelprisen i fysikk for 1915. Det er det einaste tilfelle at far og son har delt ein nobelpris. Lawrence var berre 25 år, og framleis er han den yngste mottakaren av ein nobelpris.

Det er ikkje til å komme forbi at Lawrence lett kunne komme i skuggen for den veletablerte professoren som far hans var. Om hausten 1913 var den andre "Solvay-konferansen" halden i Brussel, og William var invitert for å drøfte "Struktur av materiale", men ikkje Lawrence. Rett nok fekk han tilsendt ei helsing med gratulasjonar frå konferansen, underskriven av celebritetar som Marie Curie, Albert Einstein, Max Laue, Hendrik Lorentz og Ernest Rutherford. Og faren nytta kvart høve til å framheve Lawrences sjølvstendige merittar bak Braggs lov. Trass dette verkar det som Lawrence gjennom heile livet bar på ei kjensle av å vere blitt underkjent, og han var særst snøgg til å korrigere lei som ville framstille det slik at det var faren som hadde vore hovudpersonen bak nobelprisarbeidet.

I 1913 var William H. Bragg professor ved Universitetet i Leeds, og røntgenstudia vi har nemnt blei utførte der. Frå 1915 vart han professor ved University College i London, til 1923, då han vart

knytt til The Royal Institution i London. W. Lawrence Bragg var stipendiat ved Trinity College i Cambridge i 1913. Han vart utkalla til militærtjeneste under den første verdskrigen. Frå 1919 til 1937 var han professor ved Victoria University i Manchester, og deretter var han professor i Cambridge. Også under den andre verdskrigen gjorde han tjeneste for det militære. Lawrence heldt fram med røntgenarbeid også etter krigen. Det heiter at han spela ei viktig rolle ved Cambridge for oppklaringa av strukturen til DNA, publisert i 1953, og også av andre sentrale røntgenarbeid, som på lysozym og hemoglobin.

Referansar

1. Internett: www.nobelprize.org *The Nobel Prize in Physics 1915*
2. W.L. Bragg, in: *Proc. Camb. Phil. Soc.* **17**, Part I, 43 (1913)
3. W.H. Bragg and W.L. Bragg: *Reflections of X-rays by Crystals*. *Proc. Roy. Soc.*, **88**, 428 (1913)
4. W. Lawrence Bragg: *The Analysis of Crystals by the X-ray Spectrometer*. *Proc. Roy. Soc.*, **89**, 468 (1914)
5. J. Als-Nielsen og D. McMorrow: *Elements of Modern X-ray Physics*, 2. utgave, Wiley (2011)
6. Emil J. Samuelsen og Dag W. Breiby: *Røntgenlaser*. *Fra Fysikkens Verden* **71**, 42–47 (2009)
7. Dag W. Breiby og Emil J. Samuelsen: *Talboteffekt med røntgenstråling*. *Fra Fysikkens Verden* **73**, 59–63 (2011)

∞

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

Fysikknytt

Pioneeranomalien er oppklart

For 30 år siden ble det oppdaget at Pioneersondene som er på vei utover i solsystemet, sakket av litt mer enn de skulle. Nå har forskerne funnet årsaken. Det skyldes strålingsreaksjon fordi de sender ut litt mer varme forover enn bakover.

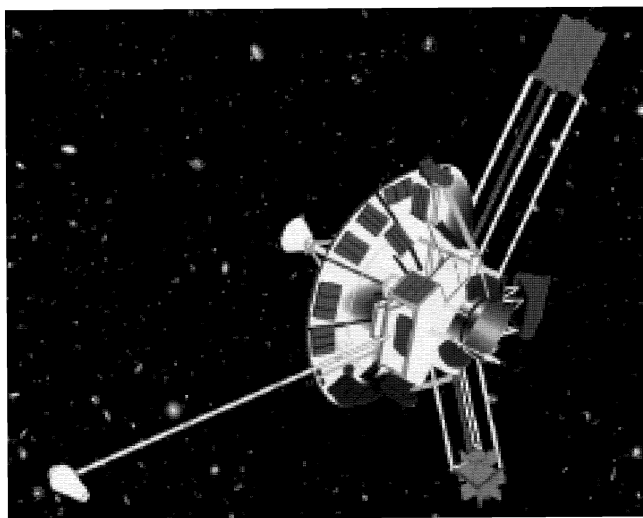
Sonden *Pioneer 10* ble sendt ut fra Jorda i 1972 og søsterfartøyet *Pioneer 11* ett år senere. De skulle utforske den ytre delen av solsystemet. Det var på forhånd gjort svært nøyaktige beregninger av hvilken hastighet sondene skulle ha til enhver tid.

Etter ti år var det blitt klart at begge sondene sakket av i forhold til skjemaet. Dette ble kalt Pioneeranomalien, og den ble offentlig rapportert i en forskningsartikkel i 1998. Effekten var liten. Den ekstra retardasjonen var en ti-milliarddel av tyngdeakselerasjonen. Men observasjonsdataene var så nøyaktige og vedvarende at forskerne ikke kunne fjerne anomalien bare ved å si at det dreide seg om unøyaktigheter i hastighetsmålingene som ble utført ved å benytte dopplereffekten. Denne effekten gir en minskning av frekvensen til et signal som sendes ut fra et legeme som beveger seg bort fra observatøren. Omkring år 2000 var det samlet slike dopplerdata fra Pioneersondene i nesten 30 år.

I disse årene ble alle mulige faktorer som kunne påvirke bevegelsen til Pioneersondene, lagt inn i omfattende simuleringer av bevegelsene til sondene. Men anomalien forsvant ikke. Den holdt seg stabil år etter år og måtte ha en fysisk årsak. Det ble fremsatt mange forslag til forklaringer.

I 1998 ble det oppdaget at farten av universets ekspansjon øker. Det ble spekulert på om denne kosmiske fartsøkningen hadde noe med saken å gjøre, men nøyaktige beregninger viste at det ikke kunne være tilfelle. Andre lurte på om fartsreduksjonen skyldtes at sondene ble bremsset ned av mørk materie. Men dette var vanskelig å verifisere så lenge vi nesten ikke vet noe om den mørke materien. Atter andre spekulerte på om gravitasjonen er litt sterkere i store avstander fra sola enn Newtons gravitasjonslov sier, og det ble undret på om det kunne være en mystisk femte fundamentalkraft som begynte å avsløre sin eksistens ved å bremse ned sondene. Men alt dette forble nokså løse spekulasjoner. Ingen av forklaringene ble akseptert som fullt ut tilfredsstillende.

Den foretrukne forklaringen var ganske prosaisk. Kanskje minskningen av farten skyldtes strålingsreaksjon fordi sondene sender ut mer varme forover enn bakover. Årsaken til dette er at hovedbidraget til strålingsreaksjonen kommer fra to generatorer som produserer varme, og de befinner seg på stenger litt foran sonden i forhold til bevegelsesretningen (figur 1). Det ble satt i gang med grundige undersøkelser for å finne ut om strålingsreaksjonen kunne forklare minskningen av farten.



Figur 1. Illustrasjon av en Pioneersonde. Radioisotopgeneratorer som produserer varme, er sondenes største strålingskilder. Disse er montert på to armer foran sondene i forhold til bevegelsesretningen som er mot høyre på figuren. Det er særlig strålingsreaksjonen fra disse generatorene som har bremsset ned bevegelsen til sondene.

I 2002 ble det publisert en 60 sider lang artikkel i *Physical Review D* der alle mulige aspekter av Pioneeranomalien ble diskutert. Det ble den gang konkludert med at strålingsreaksjonen sannsynligvis ikke kunne forklare anomalien, av to årsaker. Den første var at simuleringer frem til år 2001 tydet på at denne reaksjonskraften hadde en størrelse som bare var en tiendedel av den nødvendige verdien for å forklare anomalien. Den andre var at anomalien syntes å ha konstant størrelse over en periode på 30 år. Man forventet at hvis anomalien skyldtes strålingsreaksjonen, ville den blitt litt mindre med årene etter hvert som utstyret i Pioneersondene ble kaldere og sendte ut mindre stråling.

Men en plagsom tvil ble ikke helt borte. Kunne det være at simuleringene enda ikke var tilstrekkelig gode? Hadde man greid å modellere utstrålingen fra alle delene av sondene på en tilstrekkelig nøyaktig

måte? Et team av forskere besluttet å fortsette undersøkelsene av den termiske rekyl.

Gamle magnetbånd med dopplerdata fra hele Pionersondenes historie ble gravet frem for å bestemme hastighetsutviklingen med enda større nøyaktighet enn tidligere. Videre satset forskerne på å kartlegge rekylvirkningen av strålingen fra hver enkelt del av sondene enda mer detaljert enn de hadde greid frem til år 2002. Strålingen fra hver enkelt liten del av sondene ble simulert på nytt med finere oppdeling av sondene enn før. Nå ble hver sonde delt opp i 3300 deler i analysene. Forskerne hadde etter nøye vurderinger funnet ut at dette var nødvendig for å kunne ta hensyn til detaljene i geometrien til sondenes overflate og temperaturforskjellene på ulike steder når virkningen av strålingsrekyl på bevegelsen ble simulert. Dette arbeidet førte til at simuleringene ble nøyaktigere enn de som lå til grunn for 2002-artikkelen.

Denne gangen fant man en samlet strålingsreaksjon som var omtrent ti ganger større enn man hadde funnet tidligere. Kraften var fortsatt svært liten, ikke større enn strålingsreaksjonen som virker tilbake på en bil når den slår på frontlyktene. Så beregnet man hastighetsendringen dette ville gi.

Deretter gikk man gjennom de komplette dopplerdataene og sammenliknet med resultatet av simuleringene, og da fant man at hastighetsreduksjonen fra strålingsreaksjonen bare ble 20 % mindre enn den observerte.⁽¹⁾ Det ble med andre ord overensstemmelse innenfor en nøyaktighet på 20 %. Da kunne forskerne i 2012 konkludere med at årsaken til Pioneeranomalien var blitt forkåret. *Rekyl fra elektromagnetisk stråling som sondene sender ut, er årsaken til nedbremsingen.*

Referanse

1. Victor T. Toth og S.G. Turyshev: *Finding the source of the Pioneer anomaly*. IEEE Spectrum, desember 2012, side 32-39.

Øyvind Grøn

∞

Krystallografi utan krystall

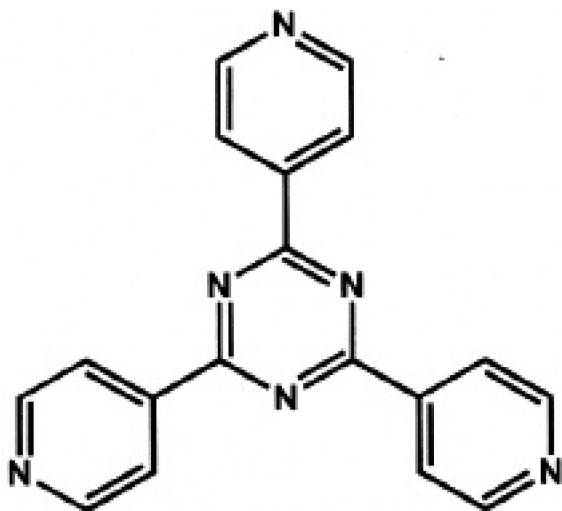
Diffraksjonsstudiar av krystallinsk materiale har vore grunnlaget for utforskinga av atomære og molekylære strukturar heilt sidan Max Laue oppdaga røntgendiffraksjon i 1912, og W. Lawrence Bragg og William H. Bragg kunne gjere dei første strukturbestemmingane i 1913. Først blir den krystallografiske strukturtypen bestemt og deretter strukturen til molekyla som inngår. Sidan 1913 er hundretusenvís av strukturar blitt bestemte, først dei "enklare" uorganiske, men etter kvart meir og meir kompliserte organiske strukturar som hemoglobin, vitaminar og proteinar. I dag er strukturbestemming med røntgen, men også med nøytron- og elektron-strålar, eit velutvikla handverk. Ved synkrotronstråleanlegg, slike som ESRF i Grenoble og MAX-lab i Lund, blir proteinstrukturar studerte og bestemte på løpande band. Begrensinga er ikkje lenger kompleksiteten i strukturane, men heller tilgangen på krystallinske prøver av materiala. For det er blitt ein større kunst å gro krystallar av tilstrekkeleg kvalitet enn å samle diffraksjonsdata.

Det kom derfor som ei openbaring frå det høge då ein kunne lese på redaksjonssidene i *Nature* 28. mars i år om krystallografi utan bruk av krystallar; ja, det var så nær opptil 1. april at ein kunne lure på om det var ein aprilspøk. Men publikasjonen er nok ikkje meint som spøk.⁽¹⁾

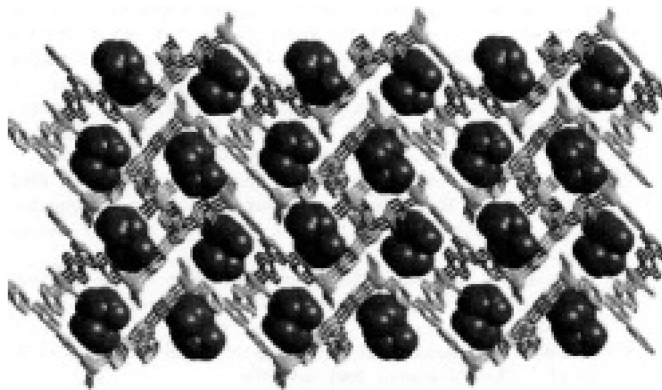
Metoden går ut på å få plassert stoffet ein vil studere inne i porar eller andre holrom i kjente "porøse" krystallar. Slike "vert-gjest"-strukturar er i og for seg ikkje ukjent som material-typar. Men her er ideen at "gjest"-molekyla vil ta same form og orientering i alle holromma dei går inn i. Jamvel med ørsmå stoffmengder i nano- og mikrogramområda, og med mikrofokuserande strålar, er det muleg å få målbare diffraksjonseffektar.

Eksempel på "porøse" vertsmateriale er siliakat kalla *zeolittar*, velkjent for reinsing og separering av kjemiske oppløysingar. Men forfattarane laga mange eigne tilpassa vertar av metall-organiske stoff, som sink-iodid-komplekset $(\text{ZnI}_2)_3(\text{TPT})_2(\text{gjest})_n$, der TPT står for *tris-pyridyl-triazin* (figur 1).

Figur 2 er ein illustrasjon av gjest-molekyl (mørk del) plassert i mikroporar i komplekset. Gjest-molekyla kan bytast ut med andre molekyl ved at krystallen av komplekset får ligge eit par døgn i ei oppløysing med det nye gjest-molekylet. Forskarane prøvde ut metoden med enkelte kjente molekyl, og løyste også fleire nye, ukjente molekylstrukturar.



Figur 1. TPT-molekylet $C_{17}H_{12}N_6$. For strukturen av sinkiodid-TPT-komplekset må ein konsultere referansen.



Figur 2. Vert-gjest-struktur.

Referanse

1. Y. Inokuma, S. Yoshioka, J. Ariyoshi, T. Arai, Y. Hitora, K. Takada, S. Matsunaga, K. Rissanen, M. Fujita: X-ray analysis on the nanogram and microgram scale using porous complexes. *Nature* **495**, 461–467 (2013)

Emil J. Samuelsen

∞

Hva skjer

Fysikkolympiaden 2012/2013

Norsk finale i fysikkolympiaden for elever i videregående skole er igjen blitt avviklet ved Fysisk institutt, UiO. Etter en ukes intenst kurs var det finale

22. mars. *Åsmund Hausken Sande* fra Valler vgs. ble best med 17,5 poeng av 22 mulige. (Også i fjor var vinneren av den norske finalen fra Valler vgs.) *Carl Andreas Julsvoll* fra Oslo Handelsgymnasium ble nr. 2, *Arnoldas Seputis* og *Henrik Klauset Svensson* fra henholdsvis Sandnes vgs. og Nesbru vgs. delte tredjeplassen. *Tobias Torben* fra Spjelkavik vgs. ble nr. 5. Henrik Svensson har også kvalifisert seg til den internasjonale finalen i kjemi og har valgt å delta der. Dermed blir *Gjert Magne Knutsen* fra Sandnes vgs. også med på det norske laget som skal til den internasjonale finalen i København i juli.

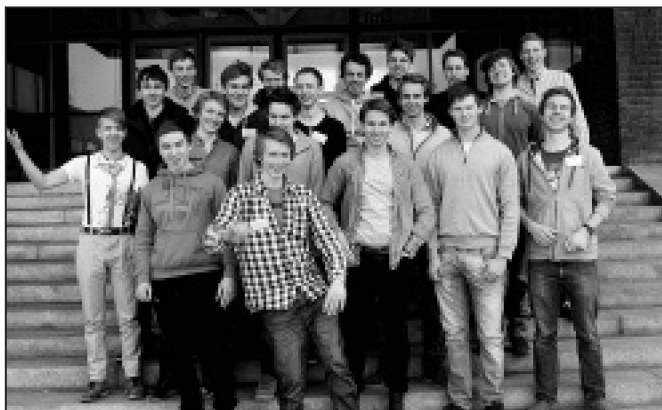
Finaleoppgavene var nok vanskelige, særlig tatt i betraktning av at det er mye nytt stoff og at deltakerne har kort tid til å besvare oppgavene. Imidlertid kunne den kanskje vanskeligste oppgaven løses innenfor pensum i Fysikk 2 i vgs.

For å komme med i finalen må elevene gjennom to uttaksrunder. I første runde deltok 98 skoler med 872 elever, hvorav 24 % var jenter. Andelen jenter som tar Fysikk 2 på landsbasis, er omtrent 30 %. Jentene er mao litt underrepresentert i fysikkolympiaden. Antall deltakere i år var betydelig høyere enn i 2011, men lavere enn ved rekorddeltakelsen i 2010.

Oppgavene i første runde, de fleste flervalgsoppgaver, var som vanlig utfordrende. Men noen fikk likevel til alt, og ellers sprer poengsummen seg godt over hele skalaen. Det er imidlertid en utfordring å lage gode oppgaver til fysikkolympiaden, særlig for første runde. Oppgavene skal både være relevante og spennende, og noen bør være litt annerledes enn oppgaver i lærebøkene. Vi tar derfor gjerne imot forslag til oppgaver.

Andre runde ble gjennomført 7. februar. Dette er en tre-timers prøve som er en del vanskeligere enn den i første runde. Kravene til begrunnelser er også strengere her. Det var 76 (derav 11 jenter) som hadde kvalifisert seg, og det var 64 (10 jenter) fra 47 skoler, som leverte besvarelser fra 2. runde. *Åsmund Hausken Sande* fra Valler vgs. ble best med nesten alt riktig. På de to neste plassene kom *Sondre Sortland* fra Bergen Handelsgymnasium og *Martin Berild* fra Molde vgs.

De 19 beste fra 2. runde ble invitert til en ukes kurs og norsk finale på Universitetet i Oslo, fra 18. til 22. mars. Dette kurset er svært omfattende og intenst. I tillegg til forelesninger, laboratorieøvelser og oppgaveregning, er det populærforedrag hver dag, sosiale tilstelninger, omvisning og orientering om studier ved UiO. Flere av deltakerne har sendt oss hyggelige tilbakemeldinger. Her er et utdrag:



Deltakerne på treningskurset for fysikkolympiaden.

Jeg vil gjerne takke for et fantastisk opphold denne uken på fysikkolympiaden! Det har vært kjempe bra og jeg har lært masse ny, spennende og interessant fysikk, som jeg definitivt kommer til å dra nytte av senere! Fysikktimene og populærforelesningene har virkelig inspirert meg til å fortsette med noe som er sterkt knyttet til fysikkfeltet.

Den internasjonale finalen skal foregå i København fra 7. til 15. juli. Det blir nok et litt spesielt opplegg der siden danskene feirer 100-årsjubileum for Bohrs atommodell.

Finalen består av to konkurransedager, én med teorioppgaver og én med eksperimenter. De andre dagene er det ulike sosiale og kulturelle arrangementer, sightseeing og ekskursjoner. Det er mao et rikholdig program, og møtet med fysikkelever fra alle verdens kanter er en stor opplevelse!

Den norske fysikkolympiaden er støttet av Forskningsrådet, Kunnskapsdepartementet og UiO.

Mer om fysikkolympiaden finnes på våre nettsider: <http://www.mn.uio.no/fysikk/forskning/grupper/skolelab/fysikk-ol/>

Carl Angell

∞

Bokomtale

Pål Brekke og Fredrik Broms: Nordlyset – en guide. Forlaget Press 2013, ISBN 978-82-7547-623-2, (120 sider) 329 kr.

I henhold til pressemeldingen er dette "en rikt illustrert bok som gir svar på alt du ønsker å vite om nordlyset: Når kan man se det? Hvor bør man

reise? Hva slags utstyr trenger man? Og sist men ikke minst: Hvordan tar man sine egne bilder av verdens eldste og mest spektakulære lysshow?"

Ingen av forfatterne har forsket på nordlys. Pål Brekke er solfysiker og arbeider som seniorrådgiver ved Norsk Romsenter. Han har også interessert seg for romværet – effekter av solaktivitet på jorden og dens omgivelser. Fredrik Broms er spesialist på å fotografere nordlyset og astronomiske fenomener. Han er marinbiolog og har drevet marinforskning i Skandinavia og i Arktis. Fredrik Broms står bak de flotte nordlysbildene i boken og praktisk informasjon om å observere og å fotografere nordlyset.

Forfatternes intensjon er at en uten større forkunnskaper skal kunne lese boken og få en fullverdig innføring i temaet nordlys. Forfatterne sier: "Man trenger ikke forstå de fysiske prosessene bak nordlyset for å nyte det vakre synet av det. Imidlertid får opplevelsen en ny dimensjon når man vet om prosessene som får lysgardinene til å skimre over himmelen." Boken er strukturert slik at en raskt kan gå inn på den delen som en er interessert i, uten at en trenger å fordype seg i de forangående kapitler. Forfatternes intensjon er at boken skal kunne brukes både som en fullverdig innføring om nordlys og kunne leses fra perm til perm, og som en felthåndbok der leseren lett kan bla frem og tilbake mellom forskjellige deler. Boken er inndelt i fem kapitler som omtales nedenfor.

Å jakte på nordlyset er en introduksjon hvor en tar for seg endel praktiske forhold: Hvor bør man reise for å se nordlys – Sted og vær, reise alene eller delta i en organisert nordlysreise, og om mørketiden.

Fra myte til vitenskap – å forstå nordlyset tar for seg myter og overtro knyttet til nordlyset, nordlyset i kunst og kultur, Kristian Birkeland og gjennombruddet i forståelsen av nordlyset, og moderne forskning. Her er blant annet EISCAT og Kjell Henriksen Observatoriet på Svalbard omtalt. Det hadde vel vært naturlig at også Nordlysobservatoriet i Tromsø og Andøya Rakettskytefelt ble behørig omtalt. Disse institusjonene har spilt en viktig rolle i nordlysrelatert forskning gjennom mange år.

Hvordan dannes nordlyset begynner med en beskrivelse av solens struktur, solens atmosfære, solflekksyklusen og solstormer. Her er solfysikeren Pål Brekke på hjemmebane; fremstillingen er meget god og lettlest. Når en så kommer nærmere jorden, til vekselvirkningen mellom solvinden og jordens magnetosfære, begynner fremstillingen å bli litt mangelfull. Det er medtatt en knøttliten figur i margin som skal illustrere "solvinden som dytter

på magnetosfæren". Men boken hadde tjent på å ha med en ordentlig skjematisk figur av magnetosfæren med den utstrakte "halen" på nattsiden som omtales noe kryptisk seinere i kapitlet. En slik figur ville også gjøre det enklere å forklare nordlysovalen.

Det nevnes en rekke geomagnetiske indekser, blant andre Kp-indeksen, som kan være til hjelp for å finne ut hvor det kan være mulig å observere nordlys. Det vises kart over hvor nordlysovalen gjennomsnittlig befinner seg ved forskjellige Kp-verdier. Men her har en glemt å merke av Kp-verdiene på figurene.

Under behandlingen av *nordlysemisjoner* – *nordlysets farger* sies det at de eksiterte atomene straks avgir lys på en bestemt frekvens eller farge. Imidlertid så er noen av nordlysemisjonene fra såkalte "forbudte overganger", noe som medfører at lysemisjonen er forbundet med en viss tidskonstant. Eksiterte oksygenatomer som gir emisjonen på 630,0 nm har en levetid på 110 s og kan derfor difundere bort fra nordlysformen, eller nordlysformen kan flytte seg før lysemisjonen finner sted. Derfor vil en ikke se så skarpe romlige strukturer i det røde nordlyset på 630,0 nm som en kan se i det grønne nordlyset på 557,7 nm.

Å *observere nordlyset* tar for seg nordlyssonen og nordlysovalen, geomagnetisk aktivitet og når på døgnet man kan se nordlys gjennom året. Nordlysets forskjellige strukturer og utviklingen av et nordlysutbrudd blir også presentert.

Å *fotografere nordlyset* gir nyttige råd når det gjelder kamerautstyr og hvordan en best kan fotografere nordlyset.

Som nevnt innledningsvis loves det at boken skal gi svar på alt en ønsker å vite om nordlyset, men dette var vel å love litt for mye. Det er ikke så enkelt å sette grenser for hva som bør være med i en slik bok, spesielt når det gjelder å forklare de fysiske prosessene bak nordlyset på en folkelig måte.

Nordlyset er blitt en attraksjon som trekker stadig flere turister til Norge og Island. "Nordlyset – en guide" er definitivt en både nyttig og inspirerende bok for den som vil se på nordlyset. Boken har mange flotte nordlysbilder og en folkelig tekst. Den kan med fordel leses før man begir seg på en "nordlystur" og bør også være med i reisebagasjen.

Johan Stadsnes

∞

Trim i FFV

Løsning på FFVT 1/13

Teaterbesøk

Oppgaven gikk ut på å finne sannsynligheten for at du blir sittende i ro når du er blant N fysikere som setter seg på helt tilfeldige plasser i et teater med $N+M$ plasser, og deretter kommer M matematikere og gjør krav på sine plasser. En fysiker som må flytte seg, tar sin riktige plass og fortrenger kanskje derved en annen fysiker.

Anta at du er den siste fysikeren som setter seg før matematikerene kommer og lager uro. (Det er en uskyldig forutsetning da alle N fysikerne er i en likeverdig situasjon.) Du har da naturligvis $M+1$ plasser å velge mellom. Jeg påstår at én av disse plassene er gunstig i den forstand at du blir sittende i ro dersom du velger den, mens de øvrige M plassene er ugunstige, slik at $p = 1/(M+1)$ helt uavhengig av antall fysikere!

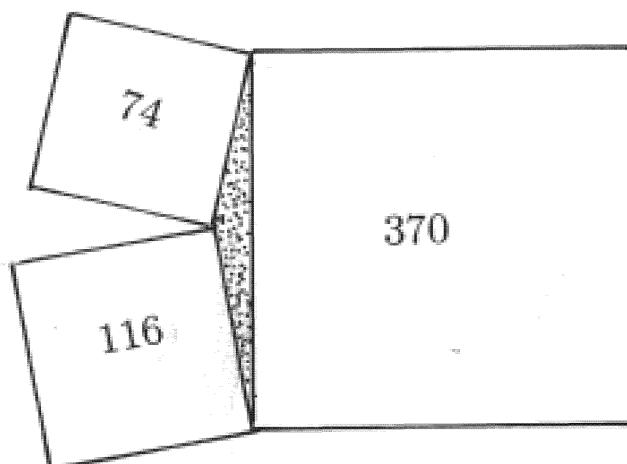
En innser at påstanden er riktig ved å notere at hver ankomst av en matematiker må resultere i at en av de før nevnte $M+1$ plasser fylles med en person, matematiker eller fysiker (eventuelt etter en flertrinnsprosess). Ankomsten av de M matematikere fyller altså M av de $M+1$ plassene, og det gjelder om å ha satt seg på det gjenværende setet!

FFVT 2/13

Innsjøareal

Sidene i en trekantet innsjø er, som figuren viser, også sider i tre kvadratiske jordstykker på henholdsvis 370 km², 116 km² og 74 km².

Bruk Pytagoras til å finne arealet av innsjøen!



∞

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



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. 1900.

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 svart/hvitt med en spaltebredde på 8,6 cm. Av økonomiske grunner vil bilder bare i spesielle tilfeller trykkes i farger. Figurene 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 artiklene. De må være teknisk gode og kan trykkes i farger.

KORREKTUR: Forfatterne får tilsendt korrektur som må returneres snarest. Det må ikke gjøres unødige endringer i korrekturene.

Norsk Fysisk Selskap

STYRE

President:

Professor Per Osland

Inst. for fysikk og teknologi, UiB

e-post: per.osland@ift.uib.no

Visepresident:

Professor Åshild Fredriksen

Inst. for fysikk og teknologi, UiT

e-post: ashild.fredriksen@uit.no

Styremedlemmer:

Professor Jon Otto Fossum

Institutt for fysikk, NTNU

Professor Håvard Helstrup

Høgskolen i Bergen

Professor Ulf R. Kristiansen

Inst. for elektronikk og telekom., NTNU

Postdoktor Eirik Malinen

Radiumhospitalet, Oslo

Førsteaman. Kjartan Olafsson

Inst. for fysikk og teknologi, UiB

Professor Jon Samseth

Høgskolen i Akershus, Lillestrøm

Lektor Morten Trudeng

Asker videregående skole

Selskapets sekretær:

Cand.scient. Trine Wiborg Hagen

Fysisk institutt, UiO,

Pb. 1048 Blindern, 0316 Oslo.

e-post: nfs@fys.uio.no

Bankgiro: 7878.06.03258

Fra Fysikkens Verden

Redaktører:

Professor Øyvind Grøn

Høgskolen i Oslo og Akershus, og

Fysisk institutt, UiO

Professor Emil J. Samuelsen

Inst. for fysikk, NTNU

Redaksjonssekretær:

Karl Måseide

Fysisk institutt, UiO

Redaksjonskomité:

Professor Odd-Erik Garcia

Institutt for fysikk, UiT

Professor Per Chr. Hemmer

Institutt for fysikk, NTNU

Førstelektor Ellen K. Henriksen,

Fysisk institutt, UiO

Professor Morten Førre

Inst. for fysikk og teknologi, UiB

Ekspedisjonens adresse:

Fra Fysikkens Verden

Fysisk institutt, Universitetet i Oslo,

Boks 1048 Blindern, 0316 Oslo.

Tlf.: 22 85 64 28 / 22 85 56 68

Fax.: 22 85 64 22 / 22 85 56 71

e-post: oyvind.gron@hioa.no

e-post: marit.sandstad@astro.uio.no

e-post: k.a.maseide@fys.uio.no