Fra Fysikkens Verden

Nr. 2 – 2011
73. årgang

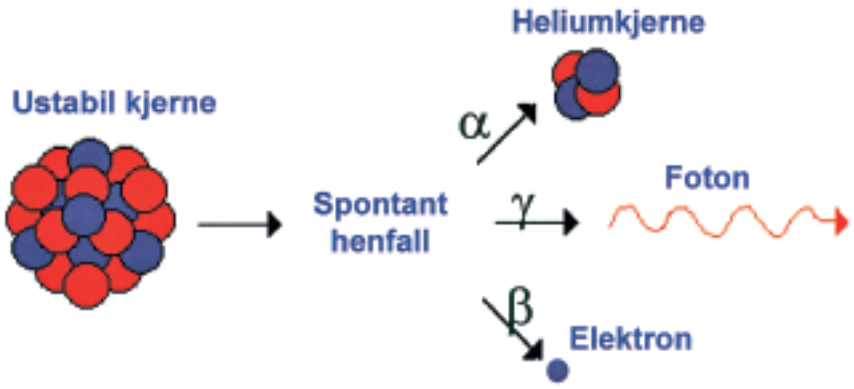
Utgiver:
Norsk Fysisk Selskap

Redaktører:
Øyvind Grøn
Marit Sandstad

Redaksjonssekretær:
Karl Måseide

Innhold

Thormod Henriksen:
Stråling og kreft 40
Thormod Henriksen:
Radioaktive utslipp og helse . . . 46
Jon Samseth:
Ulykker ved kjernekraftverk – Fukushima 49
Rypdal, Kozelov og Živković:
Dirigerer planetene jordas klima? 54
D. W. Breiby og E. J Samuelsen:
Talboteffekt med røntgenstråling . 59
Emil J. Samuelsen:
Materialeigenskap som kan vere normal, gigantisk eller kolossal . . 63
Fra Redaktørene 38
FFV Gratulerer 38
Mogens H. Jensen
Fysikknytt 39
Relativistiske effekter bekreftet
Hva skjer. 67
Fysikkolympiaden 2011
Kommentar 68
Strålebehandling av kreft
Nye Doktorer 69
PhD Krister Mangersnes
PhD Marit Dalseth Riktor
PhD Heidi Kristine Toft
Trim i FFV 71



Radioaktivitet gir tre typer stråling
(Se artikkler om stråling og helse)

ISSN-0015-9247

Fra Redaktørene

Fysikkrelaterte nyheter som toppsak i riksdekkende media dag etter dag. Det høres ut som alle fysikeres drøm. I mars var dette virkeligheten og det var heller mareritt enn drøm det dreide seg om. Katastrofen i Japan har satt kjernekraft ettertrykkelig på dagsorden. En blanding av mangelfull informasjon, lavt kunnskapsnivå og medias hang til dramatikk gjorde de første dagenes dekning av ulykken ved Fukushimas atomkraftverk til et kaotisk hysteri som de fleste vel hadde problemer med å navigere i.

Som fysikere er det vel ikke til å unngå at spørsmålene dukker opp fra våre omgivelser. For de av oss som ikke selv er eksperter på stråling og kjernefysikk, er det viktigste vi kan gjøre å hjelpe til med å navigere fram til pålitelige og gode kilder. Dette er en viktig del av formidlingen både nå og ellers.

Etter hvert har kjernefysikere og strålingseksperter også fått spalteplass og sendetid, og et mer oversiktelig bilde har trådt fram. Det er i hvert fall noe å være glad for midt i all elendigheten.

Vi i Fra Fysikkens Verden ønsker i dette nummeret å bidra litt til formidlingen på området. I dette nummeret trykker vi derfor en oversiktsartikkel om saken av Jon Samseth og to artikler av Thormod Henriksen om ulike sammenhenger mellom stråling og helseeffekter der den lengste omhandler forholdet til kreft. Vi håper dette kan være til glede for dere både for egen del, men kanskje også når dere skal formidle videre til deres omgivelser.

I forrige nummer åpnet vi også for debatt om klima. Det har vi fått, og i dette nummeret trykker vi en artikkel av Kristoffer Rypdal m.fl. om planetenes innvirkning på jordens klima. Vi håper diskusjonsklimaet og den faglige debatten kan fortsette her i Fra Fysikkens Verden.

Marit Sandstad

∞

FFV Gratulerer

Randersprisen til Mogens H. Jensen

Institutt for energiteknikk (IFE) har tildelt Gunnar Randers' Forskningspris for 2011 til Professor Mogens H. Jensen, Niels Bohr Institutet, København, *"for hans banebrytende grunnforskning på komplekse materialsystemer"*.

Mogens H. Jensen har levert enestående bidrag til løsning av mange problemer innen moderne fysikk, spesielt for faseoverganger og kritiske fenomener, samt kaosteori, turbulens og komplekse systemer. Hans forskning har ført til økt grunnleggende forståelse på flere felt innen materialvitenskap, komplekse materialer og prosesser innenfor biologiske systemer.

Jensen har i mange år hatt gode relasjoner med norske forskningsmiljøer gjennom felles forskningsprosjekter, som "referee" for Forskningsrådet, som opponent ved doktordisputaser, samt som medlem av programkomiteen og foreleser ved mange "Advanced Study Institutes", "Geilo Skolene".

Gunnar Randers' Forskningspris ble etablert i 2001 og deles ut annethvert år til forskere utenfor Norge for å belønne innsats til fremme av utviklingen innen grunnleggende materialvitenskap, innovasjon eller teknologiske gjennombrudd på dette området. Prisvinneren skal også ha samarbeidet med norske fagmiljøer og ha bidratt til fremme av norsk forskning på feltet.

Prisen er på 100 000 kroner, et kunstverk og et diplom. Kong Harald fortok den høytidelige

overrekkelsen av forskningsprisen på IFE, Kjeller, i forbindelse med et arrangement den 5. mai, 2011.

Arne T. Skjeltorp
juryformann

∞

Fysikknytt

To relativistiske effekter bekreftet i Gravity probe B-eksperimentet

Den 4. mai 2011 ble sluttresultatet av *Gravity Probe B-eksperimentet* annonsert av NASA, og 18. mai kom et preprint (ArXiv: 1105.3406 på Internett: *http://xxx.lanl.gov/*) som kommer i *Physical Review Letters.* Resultatet er at Einsteins generelle relativitetsteori besto også denne testen.

Eksperimentet dreide seg om å måle to relativistiske effekter. Den ene kalles den geodesiske draeffekten, og har sammenheng med jordrotasjonens virkning på rommets krumning. Den andre er omtalt med tre forskjellige betegnelser: *treg draeffekt* (inertial dragging effect), *gravitomagnetisk effekt* og *Lense-Thirring-effekten,* og dreier seg om at en akselerert eller roterende massefordeling drar med seg rommet.

Det er to typer definisjoner av "rom" i relativitetsteorien, og de supplerer hverandre. På den ene siden defineres et rom som et sett av samtidige hendelser. Men i den relativistiske kosmologien snakker man også om at *rommet ekspanderer.* Rommet må altså kunne bevege seg. Man innfører da referansepartikler som definerer rommets bevegelse. Dette er frie partikler.

Ofte snakker man også om lokale inertialsystemer eller treghetssystemer. Et treghetssystem er et referansesystem der Newtons første lov gjelder. Det betyr at en partikkel i ro som ikke påvirkes av krefter, forblir i ro. I Newtons fysikk, og i den spesielle relativitetsteorien, regnes gravitasjon som en kraft. En partikkel i fritt fall er påvirket av tyngdekraften, og et referansesystem som følger en slik partikkel er ikke et treghetssystem ifølge disse teoriene.

Men *i den generelle relativitetsteorien regnes ikke gravitasjon som en kraft.* Et legeme i fritt fall er ifølge denne teorien ikke påvirket av noen krefter. En astronaut i en satellitt er i et referansesystem i fritt fall. Hvis han slipper en partikkel svever den fritt og holder seg i ro i dette referansesystemet. Den er heller ikke påvirket av noen kraft ifølge den generelle relativitetsteorien. Newtons første lov gjelder i en satellitt. Ifølge den generelle relativitetsteorien er referansesystemer i fritt fall treghetssystemer.

Dette betyr at rommets bevegelse også defineres av hvordan treghetssystemer beveger seg. Rommet "renner" inn i et svart hull. Den trege draeffekten betyr at rommet også roterer i samme retning som en massefordeling roterer. Den roterende massen drar med seg treghetssystemene. Men det er en svært svak kobling mellom den roterende massen og rommet. Jorda roterer en gang i døgnet og får treghetssystemene ved jordoverflaten til å rotere i samme retning, men de bruker 30 millioner år på en runde.

Gravity probe B går i bane over begge polene. Satellitten innenholder 4 gyroskoper med akser som pekte mot stjernen IM Pegasi. Den geodetiske draeffekten forskyver gyroskopaksene i nord-syd retning, og den trege draeffekten i øst-vest retning. Målingene ble utført fra 28. august 2004 til 14. august 2005. Relativitetsteorien forutsier at i denne perioden skulle den geodetiske effekten endre retningen til gyroskopaksene med 6606 millibuesekunder og draeffekten med 39,2 millibueskunder.

Eksistensen av disse effektene er nå utvetydig påvist. Målingene med Gravity Probe B ga en endring av gyroskopaksenes retninger på 6602 millibuesekunder i nord-syd retning og 37,2 millibuesekunder i øst-vest retning. Effektene har den størrelsen og retningen relativitetsteorien forutsa. Den geodesiske effekten ble bestemt med 0,28 % usikkerhet og draeffekten med 19 % usikkerhet. Målingene kunne ha falsifisert relativitetsteorien, men det skjedde ikke.

Øyvind Grøn

∞

Stråling og kreft

Thormod Henriksen *

I denne artikkelen skal vi diskutere sammenhengen mellom stråling og kreft i lys av nyere strålebiologisk forskning. Denne forskningen kullkaster de risikoberegninger som nå brukes og setter et stort spørsmåltegn ved de grenseverdier som settes av strålevernmyndighetene både i Norge og i andre land.

Store stråledoser kan gi kreft

UV og ioniserende stråling gir DNA-skader som kan føre til kreftutvikling. Dette er kjent fra dyreforsøk. Vi vet også at atombombene i Hiroshima og Nagasaki, der stråledosen ble gitt med stor dosehastighet, førte til en del tilfeller av kreft. Videre vet vi at gruvearbeidere som fikk store radondoser over lang tid kunne utvikle lungekreft.

Klokkemalerne

Vi vil trekke frem en gruppe som tydelig viser sammenhengen mellom stråling og kreft, nemlig de såkalte "dial painters". Unge kvinner brukte isotopene Ra-226 og Ra-228 i en blanding med BaBr eller ZnS, og malte visere og tall på klokker. Når isotopene desintegrerte, sendte de ut α-partikler som ga lys i malingen slik at klokkene kunne sees i mørket.

Klokkemalerne hadde et arbeidsmiljø med betydelig stråling, men ekstra ille var det for de kvinnene som i tillegg slikket på penselen for å gjøre den skarp. De fikk i seg betydelige radiummengder som førte til spesielle kreftformer. Av en gruppe på 2400 fikk 64 beinkreft og 32 fikk hode–halskreft. Dette var trolig et resultat av slikking på penslene, fordi ingen fikk denne type kreft etter at det ble strengt advart mot slikking i 1926. I ettertid er et betydelig arbeid gjort for å bestemme de stråledoser som jentene fikk.(1)

Det ble ikke observert kreft for radiuminntak under 100 μCi (tilsvarer 3,7 MBq). En fant ingen krefttilfeller for doser under 10 Gy! (Om enheter og doser, se ref. 2, 3 og 4.)

Vi konkluderer med at *stråling i store doser kan gi kreft.* Problemstillingen blir å finne sammenhengen mellom stråledose og kreft. Dette har vært viktig siden slutten av 1950-årene da en skulle introdusere retningslinjer for bruk av stråling i medisin og i samfunnet ellers.

Sammenheng mellom dose og kreft

Det er betydelig interesse for å finne sammenhengen mellom stråledose og kreftforekomst. Det er også viktig å få informasjon om det er en nedre terskel, eller om all stråling, hvor lite det enn er, kan føre til kreft.

I 1950-årene var den strålebiologiske forskningen preget av den såkalte "targetteorien". En antok at biologiske effekter var et resultat av et "hit" (treff). Dette treffet var primært en ionisasjon (en energiavsetning). Det er videre klart at antall treff øker lineært med dosen, og følgelig kan det være grunn til å hevde at biologiske effekter også øker lineært med dosen.

Lineær dose-effektkurve uten terskel (LNT-modellen)

FN-komiteen UNSCEAR (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) ble dannet i 1955. På et større møte i 1958 diskuterte de sammenhengen mellom dose og effekt ved de minste stråledosene. Diskusjonen var særlig knyttet til små doser og mulige terskler for effekt. Det ble hevdet følgende: "*There may or may not be a threshold dose.*" Videre hevdet de: "*Linearity has been assumed primarily for purposes of simplicity.*" De kunne ikke, og ville ikke, trekke noen bestemt konklusjon i 1958.

Ideen med en lineær dose-effektkurve uten nedre terskel, ble så brukt av ICRP (*International Commission on Radiation Protection*) allerede året etter. De så bort fra alle problemer som er knyttet til små

* Fysisk institutt, Universitetet i Oslo

doser, og at det er umulig å dokumentere skadelige effekter når dosene er små.

Den arbeidshypotese som ICRP hadde i 1959 er senere betraktet som vitenskapelig dokumentert og er brukt av strålevernmyndigheter for å beregne risiko og fastsette grenseverdier. Den brukes stadig av massemedier og organisasjoner av ulike slag.

LNT-modellen (*linear no threshold*) er en rett linje gjennom null dose. Den kan da brukes i sammenheng med "*kollektive doser*" der en summerer enkeltdosene til alle individer i en gruppe. Hvis gruppen er stor, for eksempel alle i Norge, vil dette gi store stråledoser med dertil hørende negative konsekvenser.

For eksempel sier LNT-modellen at bakgrunnstrålingen i Norge gir ca. 1000 kreftdødsfall pr. år. Omkring 250 av disse skyldes bruk av stråling innen diagnostikk. LNT-modellen blir benyttet når det gjelder å fastsette grenseverdier for radon i boliger og for radioaktivitet i mat og drikke. Det ultimate målet er null. Etter hvert som vi har fått mer kunnskap om de biologiske prosesser som fører til kreft, har det vært vanskelig å forene den med LNT-modellen.

Vi har et forsvarssystem som aktiveres når det oppstår celleskader (skader på DNA). Vi vet nå at *forsvarsmekanismene kan stimuleres av stråling.* Vi skal gå gjennom noen av de mekanismer vi kjenner for kreftutvikling og de forsvarsmekanismer vi har.

Kreft og forsvarsmekanismer

Kreft starter med en skade på DNA i en celle. Vi har til enhver tid mange celler i kroppen med DNA-skader. Slike DNA-skader dannes for det meste via de vanlige livsprosessene (da kalles de *endogene* skader), men også ved ytre påvirkninger (*eksogene* skader). De endogene skadene kommer fra oksygenomsetningen, der det meste ender som CO_2, mens en liten del (ca. 5 %) danner "*reactive oxygen species*" (gjerne kalt ROS) som kan gi DNA-skader.

De eksogene skader skyldes UV-stråling, ioniserende stråling og kjemiske stoffer. Vi kjenner til en lang rekke stoffer som i dyreforsøk gir kreft, og som vi derfor tror også gir kreft hos mennesker hvis mengden (dosen) er stor nok.

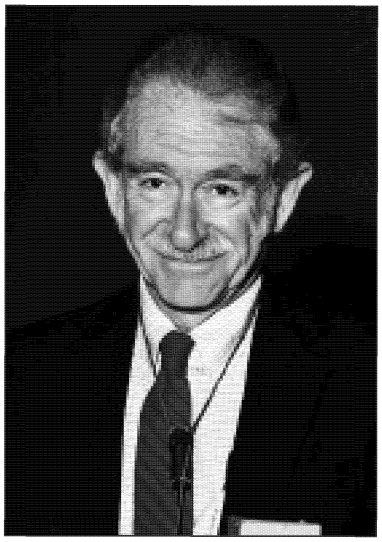
Så lenge de skadde cellene i kroppen holder seg i ro vil det ikke utvikles kreft. Men når skadde celler trigges inn i cellesyklus kan det starte en kreftutvikling. Da må forsvarsverkene i celler og vev aktiveres. Forsvarsverkene har to muligheter:

1) Reparere DNA
2) Drepe cellen.

En død celle kan ikke utvikle seg til kreft, mens en reparasjon kan gå feil og gi en levende celle med en mutasjon.

Livsprosessene gir så mange DNA-skader at vi ikke ville leve opp hvis vi ikke hadde forsvarsmekanismer som kan hjelpe oss. La oss derfor gi et kort resymé av forsvarsmekanismene. Vi nevner de i kronologisk orden slik de ble oppdaget – og legg merke til at alt dette har skjedd etter at LNT-modellen ble formulert.

Reparasjonsmekanismer (1960)



Mortimer Elkind

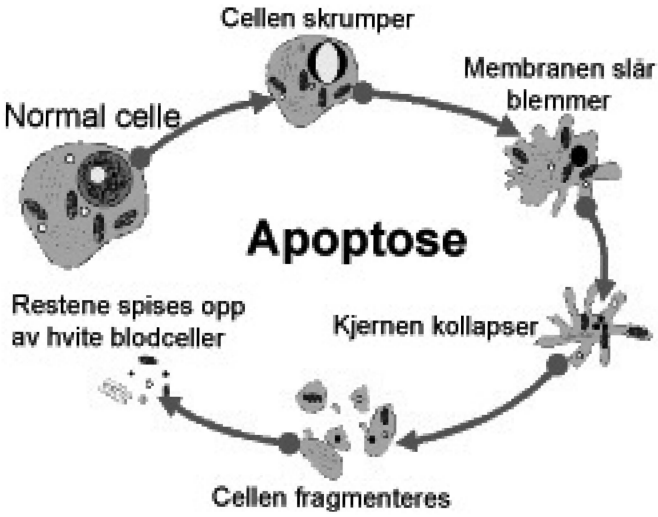
M. Elkind og H. Sutton oppdaget i eksperimenter med kinesiske hamsterceller at disse har et forsvar mot stråleskader. De sammenlignet resultatene av en bestråling på 10 Gy med de samlede resultater fra to bestrålinger, hver på 5 Gy, men med en pause mellom. Det viste seg at noen celler ble reparert i pausen. Senere har en funnet at det er proteiner (enzymer) som styrer reparasjonene. De er virksomme både for å stoppe cellene i cellesyklusen ved bestemte sjekkpunkter, og de tilkaller "reparasjonsarbeiderne" (også proteiner/enzymer) som da kan gjennomføre selve reparasjonen eller trigge cellens selvmordsystem (det kalles apoptose).

Det er derfor lett å forstå at hvis noen av de enzymer som deltar i disse viktige prosessene enten ikke er til stede, eller er svekket, kan det være fare på ferde.

Apoptose (1972)

John F.R. Kerr, Alastair R. Currie og Andrew Wyllie ved University of Aberdeen, publiserte i 1972 et berømt arbeid: "*Apoptosis: A Basic Biological Phenomenon with Wide-ranging Implications in Tissue Kinetics*" i *British Journal of Cancer.*

Apoptose er et forsvarssystem som vil drepe skadde celler – det kalles også for "*programmed cell death*". Det består av en kaskade av prosesser som fører til en destruksjon av den skadde cellen, som forsøkt vist i figur 1.



Figur 1. En ren skjematisk fremstilling av apoptose. Den skjer i flere trinn der membranen slår blemmer og kjernen kollapser. Når cellen fragmenteres spises bitene opp av hvite blodlegemer. Denne prosessen skjer uten betennelsesreaksjoner.

Apoptose er viktig for fosterutviklingen, men er også effektiv til å ødelegge celler som representerer en trussel mot organismen (som en skadet celle).

Det er en rekke stimuli som er i stand til å trigge apoptose. "Arbeiderne" i denne prosessen består av proteiner (enzymer), og "arbeidsplassen" er ved et sjekkpunkt i cellesyklusen. Apoptose er en av de mekanismer som beskytter organismen mot kreft fordi den dreper celler med DNA-skader som ikke kan, eller ikke bør, repareres. Det gikk nærmere 20 år før vi riktig forsto betydningen av apoptose, men i dag betraktes den som et viktig ledd i forsvarsmekanismene.

Adaptiv respons (1984)

I 1984 fant G. Olivieri, J. Bodycote og S. Wolff, ved University of California i San Fransisco, et forsvarssystem som blir kalt "*adaptiv respons*". Hjørnesteinen i adaptiv respons er at *stråling i små doser vil stimulere forsvarsmekanismene.*

Sheldon Wolff og medarbeidere brukte humane lymfocytter (hvite blodceller) som ble dyrket i et medium som inneholdt thymidine (en byggestein for DNA) som var merket med tritium, H-3. Isotopen H-3 er radioaktiv, og den ble bygd inn direkte i cellenes DNA fordi thymidine er en byggestein for DNA. Cellene ble således utsatt for en kronisk bestråling med lav dosehastighet. Så ble de bestrålt med røntgen til en dose på 1,5 Gy, og mengden av kromosomaberasjoner (skader på kromosomene som kan observeres i mikroskop) ble målt.

Det uventede resultatet var at antall kromosomskader var *mindre* etter eksponering fra begge kildene (tritiums β-partikler + røntgenstråler) enn etter eksponering med røntgen alene. Små mengder stråling kan altså trigge forsvarssystemet og gi økt reparasjon.

Ut gjennom 1990-årene er det publisert en lang rekke arbeider som viser adaptiv respons. En har sett dette for flere biologiske effekter enn for kromosomskader.

Adaptiv respons er vist for små doser (10–100 mGy) som senere har vært etterfulgt av større doser. En snakker ofte om en "*priming*" dose og en "*challenge*" dose. Når en gir en priming dose er det noe likt en vaksinasjon. Det stimulerer en rekke prosesser – noen negative, men også noen positive. Den lille dosen trigger reparasjonsprosesser og apoptose.

Cellesyklus og forsvarsmekanismer

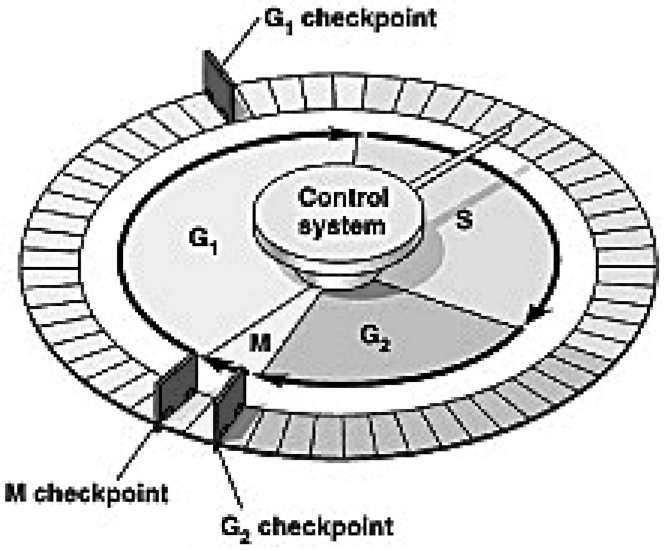
Kreft oppstår når en av de skadde cellene passerer alle forsvarsmekasnismer. Når cellen deler seg, blir det 2 celler – videre blir det 4, 8, osv. Etter 20 delinger har vi ca. 1 million kreftceller, og hvis de var samlet i én klump ville det være mulig å diagnostisere den.

Før cellen deler seg må den gå gjennom en syklus som vi kaller *cellesyklus.* Det er vanlig å betegne trinnene i denne syklusen som G_1, S (der DNA dobles), G_2 og M (mitosen, der delingen skjer).

Langs cellesyklusen er det sjekkpunkter. Der kontrolleres det at DNA er uten skader. Cellene slipper ikke forbi disse kontrollpunktene hvis de er skadet. Dette kan illustreres på mange måter, og én er vist i figur 2.

Vi nevnte at "vaktmannskapet" ved sjekkpunktene består av proteiner (enzymer) og reparasjonsarbeiderene er enzymer. Vi skal ikke gå inn på detaljer i dette, men vil nevne at ett av de viktige proteinene er p53. Siden dette har spilt en bety-

delig rolle i moderne kreftforskning skal vi se litt nærmere på det.



Figur 2. En illustrasjon av cellesyklus med kontrollpunkter. De er antydet som en "vegg" som cellene ikke kan passere. Det er cellesyklus regulerende proteiner (enzymer) som stopper og kontrollerer. De avgjør om cellene skal repareres eller dø (apoptose). Apoptose er fatalt for cellen, men positivt for organismen, fordi en død celle ikke kan gi kreft. (Figuren er hentet fra Internett: *http://www.tutorvista.com/answers/what-is-thier-a-cell-cycle/145710*)

Proteinet p53 – en del av vaktmannskapet

Proteinet fikk dette enkle navnet fordi molekylvekten ble bestemt til 53 kD (kilodalton). Det ble oppdaget i 1979 av David Lane i England og Arnold Levine i USA, og ble i 1993 kåret til "*molecule of the year*".

Dette molekylet er en av de "vaktmenn" som kan aktivere DNA-reparasjon og holde cellene i G_1-fasen til reparasjonen er gjennomført. Det kan også trigge apoptose hvis DNA-skadene er så store at reparasjon ikke er mulig. Det får skadde celler til å begå selvmord.

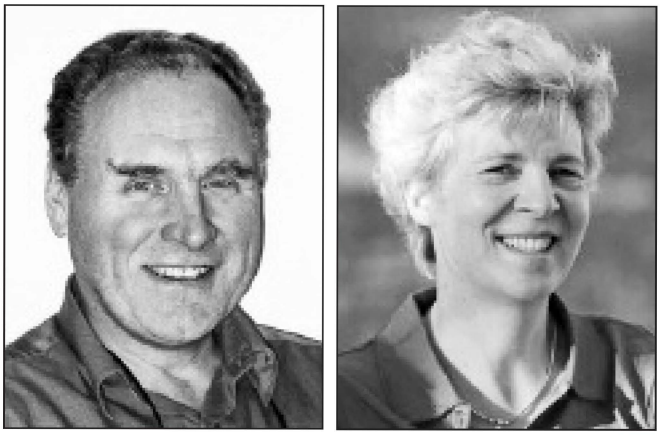
Til vanlig er p53-nivået lavt i cellene. Det er bundet til et annet protein og er dermed inaktivt. Når det oppstår en DNA-skade skjer det en rekke prosesser som ender med at p53 frigjøres og kan delta i kontrollen ved G_1-sjekkpunktet.

Koden (dvs. genet) til alle proteiner ligger i DNA-molekylet. Hvis det oppstår en skade på genet til p53 (TP53-genet) vil proteinet ikke være aktivt i tilstrekkelig grad, og da kan det være fare for en kreftutvikling. Det viser seg da også at i mer enn 50 % av alle humane krefttilfeller finner en mutasjon i genet som koder for p53.

Vi kaller et slikt gen for "*tumor suppressor gen*". Det er oppdaget flere slike gener knyttet til ulike typer av kreft. Det er viktig at disse genene er intakte når celler med DNA-skader går inn i cellesyklus fordi de er en del av forsvarssystemet.

Forskning ved Universitetet i Oslo

Forskning i biofysikkgruppen ved UiO er nær knyttet til dette området. Med *Erik Pettersen* og *Nina Jeppesen Edin* i spissen arbeider gruppen med cellulære mekanismer for strålevirkningen. De har fått resultater som har gitt verdifull informasjon om våre forsvarsmekanismer. Disse viser at små stråledoser gitt med liten dosehastighet er gunstig, ja, til og med nødvendig, for å beskytte oss.



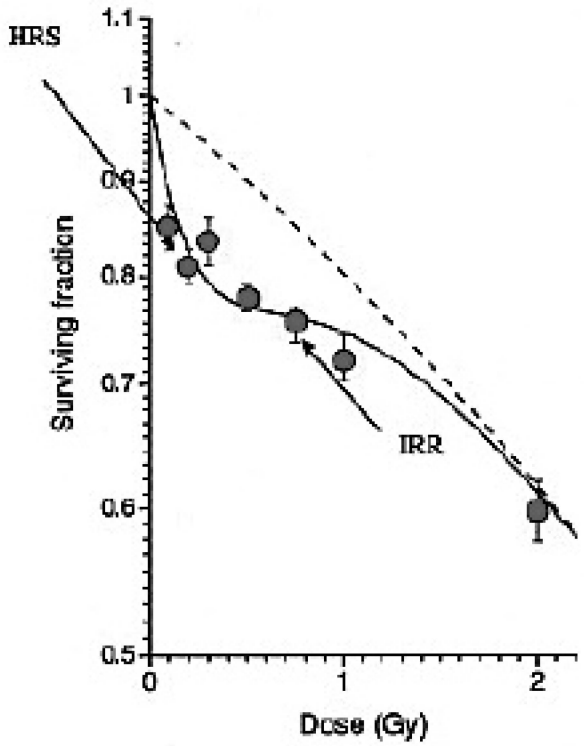
Erik O. Pettersen og Nina F. Jeppesen Edin

Vi skal gi et lite glimt av denne forskningen hvor det arbeides med celler som vokser i monolag i laboratoriet og bestråles med Co-60 γ-stråling. De observerer celler som overlever bestrålingen. Når dosehastigheten er på 40 Gy pr. time får de resultater som vist i figur 3.

Som vanlig plottes overlevelse som funksjon av dose. "Normalt" pleier overlevelseskurven å følge en lineær-kvadratisk kurveform (stiplet); men her er et eksempel på avvik som medfører det en kaller hypersensitivitet (HRS). Kurven avtar kraftig før den igjen følger den stiplede linjen. Grunnen til dette er at et sjekkpunkt i G_2-fasen ikke er på plass i starten av bestrålingen. Det betyr at celler som kommer hit kan passere selv med skader. De møter da sin skjebne i mitosen.

Oslo-gruppen fant at hvis dosehastigheten reduseres til 0,3 Gy pr. time *forsvinner* denne hypersensitiviteten. Da etableres sjekkpunktet og

forsvaret styrkes. Det betyr at dosehastigheten spiller en betydelig rolle.



Figur 3. Figuren gjelder T-47D celler (de er tatt fra en human brystkreft). Cellene er bestrålt med Co-60 med en dosehastighet på 40 Gyh^{-1}. De observerer overlevelse (survival) som funksjon av dose. I et område opp til ca. 0,5 Gy avtar kurven raskt (det kalles det hypersensitive området, forkortes til HRS). Dette området har en sentral plass i forskningen.

Vi nevner at hypersensitivitet ble oppdaget i 1993 av Brian Marples og Michael Joiner i arbeid med kinesiske hamsterceller. Nå har en funnet dette for omtrent 80 % av alle celletyper. Det nye sjekkpunktet i G_2-fasen ble oppdaget av B. Xu og medarbeidere i 2002.

Betydningen av en "priming" dose

Vi nevnte i forbindelse med "adaptiv respons" at en liten dose gitt *før* den store dosen kunne endre resultatet i betydelig grad. I tråd med dette fant Oslo-gruppen at en liten "priming"-dose førte til at hypersensitiviteten (HRS) ble borte. Det betyr at den lille dosen etablerer det forsvarssystemet som hindrer hypersensitivitet. Virkningen var kortvarig når dosehastigheten var stor, men forbausende langvarig (flere år) når primingdosen ble gitt med liten dosehastighet.

Oslo-gruppen har gjort en lang rekke eksperimenter som viser at små stråledoser gitt med liten dosehastighet etablerer et forsvar som hindrer kreftceller i å utvikle seg. Strålingen frigjør et protein som påvirker dannelsen av G_2-sjekkpunktet. Gruppen har nå identifisert dette.

Hvis sjekkpunktet i G_2-fasen ikke er til stede, vil de celler som allerede er i G_2-fasen ikke bli stoppet (kontrollpunket mangler "vaktmannskap"). Vi skal ikke gå videre med flere detaljer, men oppmuntre spesielt interesserte til å gå til de publiserte arbeidene.[5,6]

Oppsummering

Vi har på en summarisk måte gitt innblikk i noen av de forsvarsmekanismer levende organismer har utviklet for å beskytte seg mot kreft. Det viser seg at stråling i små mengder, gitt med liten dosehastighet, har en positiv effekt for vårt forsvarssystem. Stråling kan hindre en kreftutvikling av DNA-skadde celler. Det gjelder celler med både endogene og eksogene skader. Det betyr at "litt" stråling er både nødvendig og ønskelig for å optimalisere vårt forsvarssystem. Denne forskningen viser at LNT-modellen ikke er riktig og at den ikke kan anvendes i forbindelse med risikoberegninger.

Diskusjon

Strålevernmyndigheter i Norge og andre land bruker LNT-modellen i forbindelse med stråleulykker og for radon i boliger. Når en ikke tar noen reservasjoner for terskelverdier, vil LNT innebære helserisiko for doser ned til null. Det betyr i sin ytterste konsekvens at det ville vært gunstig om vi kunne flytte til et sted uten stråling.

LNT-modellen har ført til en urasjonell frykt for stråling. Modellen er ikke endret i tråd med den forskning som er gjort de siste 50 år. Det betyr at grenseverdier fastsettes på sviktende grunnlag, og de kan fort bli vanskelig, eller umulig, å overholde. De er til dels også svært kostbare, og de skaper frykt og engstelse.

Risiko ved stråling

Vi skal til slutt nevne noen eksempler som er tankevekkende med hensyn til risiko og stråling.

Høyaktive områder

Flere steder rundt om i verden, som Ramsar i Iran, Kerala i India, Yangjiang i Kina og Guarapari i Brasil, bor det mange mennesker på områder med

monazittsand som inneholder thorium-serien. Bakgrunnsnivået i disse områdene er betydelig høyere enn i Norge, fra 2 til 50 ganger vårt nivå.

Ifølge LNT-modellen skulle det være betydelig mer kreft i disse områdene enn andre steder, men det observeres ikke. Det ser faktisk ut til at kreftdødeligheten er mindre der enn i kontrollområder, men resultatene er ikke statistisk signifikante.

Taiwan med kontaminerte boliger

I 2006 publserte W.L. Chen og medarbeidere et arbeid med tittelen: *Effects of Cobalt-60 Exposure on Health of Taiwan Residents Suggest New Approach Needed in Radiation Protection.*[7]

Dette er en historie om en del boliger som var blitt kontaminert med Co-60. Omtrent 10 000 mennsker bodde i disse boligene i opp til 20 år. I alt dreier det seg om 1700 boliger som ble bygd i 1983. Doser er målt og akkumulerte γ-doser er beregnet.

I perioden 1983–2003 fikk denne gruppen en samlet, eller kollektiv, dose på 4000 manSv. Ifølge LNT-modellen skulle dette gi omkring 70 ekstra kreftdødsfall i 20-årsperioden. Disse kreftdødsfallene ville da komme i tillegg til de som er forventet i en normal befolking på 10 000 i Taiwan, som er 232.

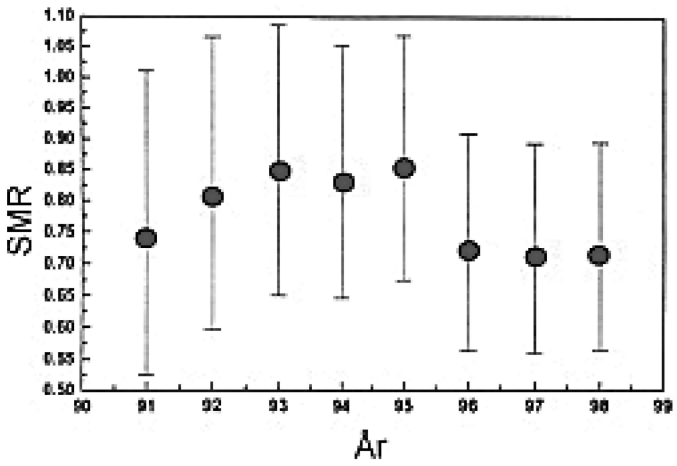
Det observerte antall dødsfall var imidlertid redusert til bare 3 % av det normale. Chen og medarbeidere hevdet at γ-strålingen ga en reduksjon på 97 % i antall forventede krefttilfeller.

Tsjernobyl

Denne ulykken for 25 år siden har fått enorm omtale. Noen hevder at det er tusener av stråleofre etter ulykken.[4] Av frykt for misdannelser, og i tråd med LNT-modellen, ble det foretatt tusener av aborter rundt om i Europa, særlig i Hellas.

Her skal vi se litt nærmere på en russisk gruppe som deltok i oppryddingen etter ulykken, de såkalte "*emergency workers*". Gruppen omfatter ca. 65 000 personer som fikk doser fra 5 til 300 mGy. Disse er fulgt opp med hensyn til helse og er sammenlignet med en kontrollgruppe med tilsvarende aldersfordeling i Russland. Den bestrålte gruppen har så langt vist seg å være både friskere og har mindre forekomst av kreft (faste svulster) enn kontrollgruppen. Dette er vist i figur 4.[8]

Som det fremgår av denne figuren har russiske redningsarbeidere 15 til 30 % lavere kreftdødelighet enn sammenlignbare grupper i Russland for øvrig. Lignende studier av befolkningen i Bryansk (det mest kontaminerte området i Russland) viste også at befolkningen der hadde ca. 5 % mindre antall faste svulster enn befolkningen i andre russiske områder hadde.



Figur 4. SMR (Standard mortality ratios) for faste svulster for russiske emergency arbeidere. SMR-verdiene viser at dødelig kreft for disse arbeiderne er mindre enn enn for kontrollgruppen som består av vanlige russere i samme aldersgruppe. For denne gruppen er SMR lik 1,0.

Konklusjon

Forskning med celler i kultur har gitt betydelig informasjon om strålevirkning og forsvarsmekanismer. Vi vet nå at stråling stimulerer mange av de prosesser som er viktige i forsvaret mot kreft. Men vi vet fortsatt ikke nok om optimale doser eller dosehastigheter, – og vi venter med spenning på flere detaljer.

Hvordan moderne strålebiologisk forskning skal få innpass innen strålevern er et spennende tema som jeg ikke skal gå nærmere inn på.

Referanser

1. R.E. Rowland: *Radium in humans. A review of US studies. http://www.osti.gov/accomplishments/documents/fullText/ACC0029.pdf*
2. T. Henriksen: *Radioaktivitet - utslipp - stråling - helse* Fra Fysikkens Verden, **73,** Nr. 2 ??–?? (2011)
3. T. Henriksen: *Stråling og risiko.* Fra Fysikkens Verden, **61,** Nr. 2, 48–52 (1999)
4. T. Henriksen: *Radioactivity and X-rays. Applications and health effects. http://www.fys.uio.no/publikum/temahefter/radioactivity_xrays.pdf*

5. Nina Jeppesen Edin og medarbeidere: *The elimination of low-dose hyper-radiosensitivity by transfer of irradiated-cell conditioned medium depends on dose rate.* Radiation Research, **171**, 22–32 (2009)
6. Nina Jeppesen Edin og medarbeidere: *Mechanisms of the elemination of low dose hyper-radiosensitivity in T-47D cells by low dose-rate priming.* Int. J. Radiat. Biol. **85**, 1157–1165 (2009)
7. W.L. Chen og medarbeidere: *Effects of Cobalt-60 Exposure on Health of Taiwan Residents Suggest New Approach Needed in Radiation Protection.* Dose Response, **5**, (1) 63–75 (2007)
8. V.K. Ivanov og medarbeidere: *Mortalityyt among Chernobyl emergency workers: Estimation of radiation risks.* Health Physics, **81**, 514-521 (2001)

∞

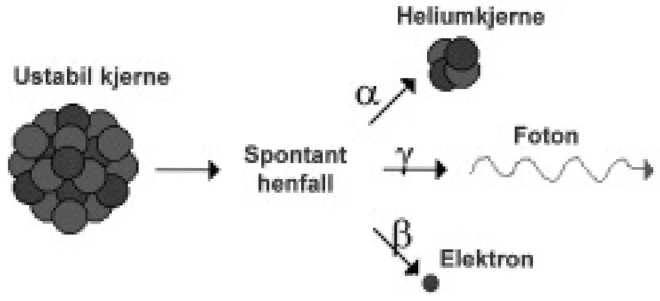
Radioaktive utslipp og helse

Thormod Henriksen *

Vi skal her gi en kortversjon av den informasjonen en bør ha om radioaktivitet, stråling og helse.

Stråling

Det er tre typer av radioaktiv stråling: α-, β- og γ-stråling, se figur 1. Når det gjelder fisjonsprodukter, dvs. utslipp fra reaktorulykker og fra atombombebombeprøver, er det bare β- og γ-stråling vi må ta hensyn til. For radon og radondøtre, er α-partiklene viktige.



Figur 1. En enkel illustrasjon som viser de tre ulike stråletyper en kan ha for radioaktive kilder. De fikk navn etter de tre første bokstavene i det greske alfabetet. α-partikler er heliumkjerner, β-partikler er elektroner og γ-stråling er fotoner.

Radioaktivitet

Radioaktive kilders aktivitet (styrke) måles i *becquerel* (Bq).

1 Bq = 1 desintegrasjon per sekund.

I noen land brukes den gamle enheten *curie* (Ci) som er aktiviteten til ett gram radium. Sammenhengen er:

$$1Ci = 3,7 \cdot 10^{10} Bq$$

Vi måler radioaktivitet i luft i Bqm^{-3}.
Radioaktivitet i vann og mat måles i Bqkg^{-1}.
Nedfall etter ulykker måles i Bqm^{-2}.

Stråletype

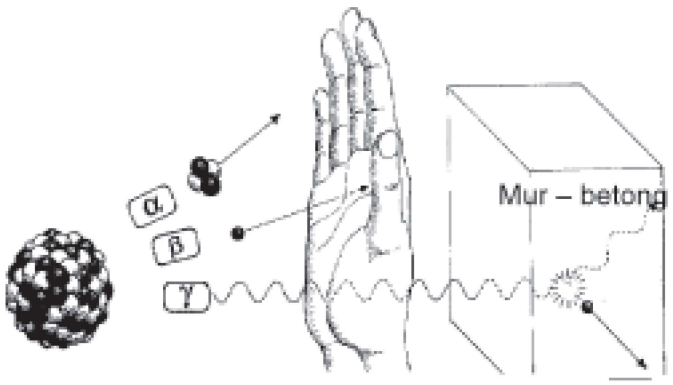
For å vurdere betydningen av en radioaktiv isotop, må vi ha informasjon om isotopens henfallskjema (decay scheme). Det angir stråletype, energi og halveringstid. Kunnskap om dette er nødvendig for å beregne stråledoser.

Rekkevidde

Rekkevidden for utsent stråling er svært viktig. Figur 2 gir informasjon om dette.

Rekkevidden for α- og β-partikler er bare noen få cm i luft og noen få μm i vev. Partiklene stoppes av klær. I kontakt med hud kan de gi skade som likner på solbrenthet.

* Fysisk institutt, Universitetet i Oslo



Figur 2. Tegningen illustrerer rekkevidden til strålingen fra radioaktive kilder.

Det er γ-strålingen som har lengst rekkevidde. Isotopene Cs-137 og I-131 er de viktigste i forbindelse med reaktorulykker. De gir begge γ-stråling med energi på henholdsvis 662 og 364 keV. Strålingen absorberes etter en eksponentiallov, og det laget som reduserer strålingen til det halve kalles et *halvverdilag*. For Cs-137 er halverdilaget i luft ca. 90 m og i vann ca. 9 cm. Det betyr at 0,5 m vann reduserer strålingen med 97–98 %.

Når de radioaktive isotopene er utenfor kroppen, er det bare γ-strålingen som kan gi oss en stråledose. Kommer isotopen inn i kroppen, vil α- og β-partiklene også gi et bidrag til stråledosen.

I forbindelse med radon og radondøtre, er det α-partiklene som er viktigst. Inntak av radioaktive isotoper skjer ved at en spiser mat som inneholder slike isotoper. Et lite bidrag kan komme med luft som pustes inn. For radon er dette viktig.

Stråledoser

Radioaktiv stråling gir ionisasjoner og eksitasjoner, dvs. den avsetter energi i små porsjoner. *Stråledose er definert som absorbert energi.* Den måles i enheten *gray* (Gy), definert som:

$$1\ Gy = 1\ joule\ per\ kg.$$

Forskning har vist at den biologiske virkningen av stråling avhenger av fordelingen av ionisasjoner og eksitasjoner. Den biologiske effekten øker med tettheten av ionisasjoner. Vi sier at effekten øker med *"linear energy transfer"* (LET). En forsøker å ta hensyn til dette ved å innføre en strålingsvektfaktor, w_R. Da angir en dosen i *sievert* (Sv). Vi har sammenhengen:

$$Sv = w_R \cdot Gy$$

Enheten Sv er ubenevnt og kan ikke måles.

Når det gjelder stråling i forbindelse med reaktorulykker (γ-stråling og β-partikler) er fordelingen av ionisasjoner jevn, og $w_R = 1$. Da er dosen i Gy lik dosen i Sv.

For isotoper som sender ut α-partikler (som radon) eller nøytroner, er $w_R > 1$.

Isotoper

I forbindelse med kjernekraftulykker og atombombeprøver sendes det ut en rekke ulike isotoper. I starten er det de kortlivede isotopene som er viktigst. Den aller viktigste isotopen de første ukene etter en ulykke er I-131, som har en halveringstid på 8 dager. På lengre sikt er Cs-137, med halveringstid 30 år, den viktigste. Det er bare disse isotopene vi hører om, men det finnes flere som ikke spiller den samme rollen.

Måling av radioaktivitet

Vi kan måle radioaktivitet ned til ufattelig små mengder av et stoff. Hør bare: Hvis vi tok 1 g I-131 og fordelte det jevnt over hele jorda (over land og hav), ville aktiviteten være 10 Bqm^{-2}, som vi lett kan måle!

Kjente utslipp

Atombombeprøver

De første store utslippene av radioaktive stoffer var knyttet til kjernefysiske bombeprøver. I alt er det sprengt over 500 atombomber i atmosfæren. Noen ble sprengt i store høyder, og da var det stort sett bare fisjonsprodukter som ble ført med vinden. For sprengninger nær bakken, ble det også dannet en mengde andre radioaktive produkter i tillegg. Beregninger som er gjort tyder på et globalt utslipp på ca. 30 millioner Ci, eller $1,1 \cdot 10^{18}$ Bq. Det er ca. 30 ganger mer enn utslippet fra Tsjernobyl.

En annen viktig forskjell mellom bomber og reaktorulykker, er at for bombene nådde aktiviteten helt opp i stratosfæren. Det ga en betydelig større spredning som kunne omfatte store deler kloden. Siden det er liten utveksling mellom stratosfæren og troposfæren, tar det lang tid før de siste restene av isotoper når bakken. For Norge var det bombesprengningene over Novaja Semlja i 1961 og 62, som førte til nedfall. Det var da i alt 87 sprengninger i atmosfæren.

Målingene den gang ble i første rekke foretatt av førsteamanuensis *Anders Storruste* ved Fysisk institutt, Universitetet i Oslo. Han målte aktiviteten i luften og samlet opp nedfallet fra regn i et kar på taket av Fysikkbygningen på Blindern. Storruste fant at ca. 4 dager etter en sprengning ved Novaja Semlja nådde radioaktiviteten Oslo. Hele høsten 1961 ble det målt strålingsverdier som var ca. 30 ganger over det normale. Og i november 1962 ble det målt stråling som var ca. 200 ganger over normalverdien.

Dette nedfallet kom stort sett med regn. Totalt fikk Oslo et nedfall av Cs-137 på 37 000 Bqm^{-2}. Etter Tsjernobyl-ulykken var det midlere nedfallet i Norge ca. 7000 Bqm^{-2}. Men i enkelte områder i Midt-Norge, var det nedfall på over 100 000 Bqm^{-2}.

Nedfallet i Finnmark førte til betydelige mengder Cs-137 i reinsdyrkjøtt. Helt frem til 1970-årene var det jevnt over mer enn 1000 Bq per kg kjøtt. Samer som spiste dette jevnlig, fikk betydelige mengder av Cs-137 i kroppen – i 1965 opptil 700 Bq per kg kroppsvekt. De stråledosene de fikk i toppåret på 1960-tallet, var på 1,5 mSv. I Sør-Norge fikk vi ekstradoser på ca. 0,03 mSv. Dette fikk ingen helsemessige konsekvenser (se artikkelen "Stråling og kreft" i dette bladet).

Windscale (1957)

I oktober 1957 tok det fyr i en grafittmoderert reaktor i Windscale (nå Sellafield) i England. Kjernen brant en hel dag, og det slapp ut ca. $700 \cdot 10^{12}$ Bq med isotoper. Hovedproblemet de første dagene var utslippet av I-131, og det ble da målt opp til 50 000 Bq per liter melk fra en gård som lå 15 km unna. Dette førte til at en for første gang introduserte grenseverdier for salg av radioaktive produkter. Grensen for salg av melk ble satt til $0,1$ μCi (3700 Bq) per liter.

Når en kjenner strålingen fra I-131, kan en raskt gjøre brukbare overslag over stråledosen til skjoldbrukskjertelen. Hvis en for eksempel drikker en liter melk som inneholder 3000 Bq, og antar at all stråling avsettes i skjoldbrukskjertelen, vil den få en dose på ca. 7 mGy, som er langt mindre enn de doser en får ved undersøkelser av skjoldbrukskjertelen. Slike doseberegninger kan være nyttige.

Three Mile Island (1979)

I mars 1979 mistet en kjølingen på en trykkvannsreaktor (PWR) på Three Mile Island nær Harrisburg, i Pennsylvcania, USA. Kjernen smeltet ned i løpet av de 6–7 timene en ikke hadde kjøling. Reaktoren hadde en sikkerhetsinneslutning, og bare små mengder radioaktivitet, ca. 20 Ci ($740 \cdot 10^9$ Bq) I-131, ble sluppet ut. Dette var lite i forhold til utslippene fra Windscale og fra atombombeprøvene.

Nedfallet her var lokalt, men fikk voldsom oppmerksomhet og skapte stor engstelse. Det førte også til at USA stoppet sitt kjernekraftprogram.

Tsjernobyl (1986)

I april 1986 fikk vi Tsjernobyl-ulykken. Den står frem som det store skrekkscenariet, og det er fortsatt vanskelig å se på denne ulykken med nøytrale øyne.

Vi skal ikke gå gjennom Tsjernobyl-ulykken, men bare vise til at det er gjort flere faglige gjennomganger av denne ulykken og de helsemessige konsekvensene av den. Vi henviser interesserte til en rapport fra UNSCEAR, WHO og IAEA fra 2008, som finnes på Internett: *http://www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html*

I Tsjernobyl var det en del akutte stråleskader, og 135 personer ble lagt inn på hospital. Av disse døde 28 i løpet av tre måneder. Store grupper ble evakuert og flyttet til områder med mindre radioaktivitet. Men dette førte til adskillig større helseproblemer enn strålingen forårsaket.

Det var de såkalte "*emergency workers*" som fikk de største stråledosene. V.K. Ivanov og medarbeidere har studert 65 905 russiske arbeidere som fikk doser fra 5 til 300 mSv. Resultatene så langt viser at det er *mindre* dødlighet og *færre* krefttilfeller hos disse arbeiderne enn i en "normal" russisk gruppe.(1) I dag, 25 år etter ulykken, er strålenivået i Pripyat, som er fraflyttet, ca. 5 mGy per år, som er 2-3 ganger det nivået de hadde før ulykken.

Fukushima (2011)

Jordskjelvet og den etterfølgende tsunamien 11. mars i år, førte til reaktorhavariet i Fukushima. Det førte til radioaktive utslipp både til luft og til hav. De viktigste isotopene som ble sluppet ut var I-131 og Cs-137, og det er antydet at utslippet var ca. 10 % av utslippet fra Tsjernobyl.

Utslippet til luft falt ned i nærområdene til reaktorene. De første dagene ble det gjort målinger på personer som hadde vært i området og som muligens hadde fått noe radioaktivt på klærne. Det ble også satt i gang en rekke målinger av strålingen i luften. Da måles naturlig bakgrunnsnivå (γ-stråling fra bakken og kosmisk stråling) samt stråling som

skyldes utslipp fra reaktorene. Måleverdiene ble oppgitt som μGy per time (eller μSvh^{-1}). Det betyr at hvis en oppholder seg på stedet i en time vil stråledosen fra disse kildene være lik måleverdien.

Målinger ble gjort hver time på en lang rekke steder i området rundt reaktorene og i byer rundt om. Dosene som en kan beregne ut fra dette, lå i april på et nivå som var omtrent det doble av den naturlige bakgrunnstrålingen. Fukushima-området hadde de høyeste verdiene som lå på 1,7–1,8 μGyh^{-1}. Hvis dosenivået holdt seg på dette nivået et helt år, ville det gi en årsdose på ca. 15 mSv (15 mGy). Da er strålenivået omtrent 10 ganger det nivået de hadde før ulykken.

Strålingen vil avta etter hvert som de kortlivede isotopene dør ut. I-131 har en halveringstid på 8 dager, og aktiviteten fra I-131 vil bli borte i løpet av omkring 10 halveringsperioder, dvs. 2–3 måneder.

Cs-137 nivået (med halveringstid 30 år) vil holde seg der i mange år, og disse isotopene kan komme inn i matkjeden. Det er satt igang med målinger av radioaktivitet i matvarer. For prøver av grønsaker, frukt, fisk, melk osv. som ble målt i april, var nivået enten ikke målbart eller det lå under de grenseverdiene som er satt av japanske myndigheter.

Kommentarer

Det kan være av interesse å se på strålingen fra disse reaktorulykkene i sammenheng med naturlige høydose-områder som Ramsar i Iran og Guarapari i Brasil. Guarapari er et ferieområde med stort innrykk av turister. Det midlere strålenivået i selve byen der er 2–5 ganger vårt bakgrunnsnivå, men på stranda kan dosehastigheten gå opp i mer enn 100 ganger det nivået de nå har rundt Fukushima. Det er et paradoks at hit reiser det tusener på ferie, mens de i Japan flytter fra området.

∞

Ulykker ved kjernekraftverk – Fukushima

Jon Samseth *

Jordskjelvet i Japan den 11. mars 2011 med den etterfølgjande tsunami, førte til den mest omfattande ulykka ved eit kjernekraftverk verda har sett. Denne ulykka involverte direkte dei tre reaktorane som var i drift ved ulykkestidspunktet og lagringsbassenga for brukt brensel for alle dei seks reaktorane som kraftverket i Fukushima omfattar.

Ein kommersiell reaktor er kort fortalt ein installasjon som produserer damp som blir nytta til å drive ein strømgenerator. Dei enklaste reaktorane som dei i Fukushima, er kokvassreaktorar (BWR) der dampen blir produsert inne i reaktortanken og ført ut direkte til turbinen. Inne i reaktortanken er det stavar med pellets av urandioksid. Vatnet i desse reaktorane har to oppgåver. Den eine er å ta opp varmen og den andre er å bremse ned nøytrona slik at ein kan halde oppe kjedereaksjonen.

* Høgskolen i Oslo og Akershus, NTNU

Reaktorar og jordskjelv

I motsetning til det mange trur, er ein reaktor ikkje konstruert for å tåle eit jordskjelv på eit visst nivå på Richterskalaen. Kravet er derimot at dei skal kunne tåle ei risting i grunnen der reaktoren står. Reaktorane i Fukushima var konstruerte for å kunne tåle ein akselerasjon på om lag 4,4 m/s^2. Den største registrerte akselerasjonen frå sjølve jordskjelvet var på om lag 5,5 m/s^2 på kraftverket. Reaktorane var ikkje laga med tanke på ein tsunami, men det var sett opp ein vegg på 5,7 m mot sjøen. Sjølve bølgja har truleg vore 15 m høg ved kraftverket.

Ut frå det ein nå veit ser kraftverket ut til å ha klart jordskjelvet, sjølv om det var problem med å få i gang kjølinga ved eit par av reaktorane. Men det var tsunamien som kom 41 minutt seinare, som slo ut det som var av elektriske system og pumper til kjøling.

Det andre Fukushima-kraftverket (Daini) som har nyare reaktorar, fekk ikkje større skader sjølv om bølgja var 14 m der.

INES-skalaen

INES (*International Nuclear and Radiological Event Scale*) er ein skala frå 0 til 7 som er introdusert av IAEA (Det internasjonale atomenergibyrået) for lett å kunne kommunisere omfanget av ei ulykke knytt til nukleære anlegg, altså ikkje bare kjernekraftverk.

Nivå 0 på denne skalaen representer eit avvik frå det ordinære. Nivåa 1–3 blir karakteriserte som "ei hending" og nivå 4–7 representerer ulykker av ulik grad og omfang.

Når det gjeld ulykker, blir nivå vurdert etter konsekvensar for menneske og miljø, og etter om ulike radiologiske barrierar er brotne, sjå nedanfor. Nivå 4 er ei ulykke med lokale konsekvensar, dvs. små utslepp av radioaktivt materiale, og minst eit dødsfall pga. stråling. Nivå 5 er ei ulykke med større konsekvensar. På dette nivået må kjernen i reaktoren vere skadd. Utsleppa er avgrensa, men vil krevje tiltak. Three Mile Island-ulykka i Pennsylvania i 1979, er vurderdert til dette nivået. Nivå 6 er ei alvorleg ulykke som har konsekvensar både for miljø og menneske, og vil krevje mottiltak. Nivå 7 er ei alvorleg ulykke med store utslepp av radioaktivt materiale som vil påverke både menneske og miljø i stor grad. Tsjernobyl er den einaste ulykka før Fukushima som er vurdert til nivå 7.

Ulykka i dei tre reaktorane inklusive lagringsbassenga, er så langt blitt karakterisert som nivå 5 på INES-skalaen. Ulykka knytt til lagringsbassenget i reaktor 4, er vurdert til nivå 3. For heile verket, som omfattar alle reaktorane på staden, er nivået vurdert til 7. Om dette blir den endelege klassifiseringa, vil først bli avgjort når ein har full oversikt over det som har skjedd.

Typar ulykker

I samband med reaktorar er det to typar ulykker som er aktuelle. Den eine er *kritikalitetsulykker* der ein ikkje klarer å kontrollere kjedereaksjonane i reaktoren, og reaktoren "løper løpsk". Den andre typen ulykker knyter seg til *tap av kjøling* og blir kalla LOCA (*Loss of coolant accident*).

Kritikalitetsulykker skjer fort. Den beste måten å sikre seg mot slike ulykker er å lage reaktoren slik at det er fysisk umogleg at slike ulykker kan skje. Lettvassreaktorane, der ein nytter lettvatn både til kjøling og til å bremse ned nøytrona (moderator), er slik. Det skuldast m.a. den såkalla dopplereffekten i uran-238 som er hovudkomponenten i brenslet. Dersom reaktiviteten i reaktoren går opp (startar å gå løpsk) vil brenslet bli varmare. Nøytronabsorbsjonen i uran-238 vil auke med temperaturen. Altså vil fleire nøytron bli absorberte i uran-238, og færre nøytron blir tilgjengelege for fisjon i uran-235 når temperaturen aukar. Dette bidrar til å gjere reaktoren underkritisk når det er ei tilstrekkeleg mengd uran-238 i brenslet. I dagens brensel er det over 95 % uran-238, og dopplereffekten inntrer umiddelbart.

Ein annan viktig mekanisme knyter seg til vatnet i reaktoren. Når dette koker vil det oppstå damp (les tomrom). Sidan tettleiken i damp er liten i høve til flytande vatn, vil moderatoreffekten av vatnet bli minimal, og mange av nøytrona vil "lekke" ut av reaktorkjernen. I tillegg vil enda fleire nøytron bli absorberte i uran-238.

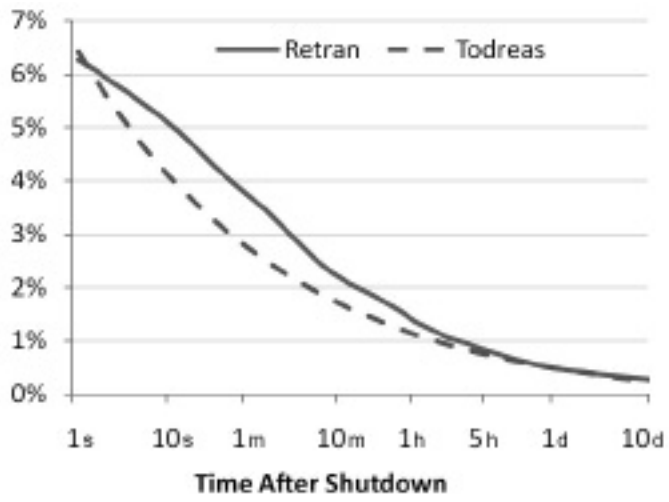
Til saman gjer dette at kritikalitetsulykker ikkje vil kunne skje i kokvassreaktorar, og i praksis heller ikkje i trykkvassreaktorar. Dersom ein nyttar ein annan moderator som t.d. grafitt, må ein utforme kjernen slik at ein ikkje kan få denne typen ulykker. Dette var ikkje gjort i Tsjernobyl-reaktorane, og ulykka der var ei kritikalitetsulykke som derfor skjedde i løpet av nokre få sekund.

I kjernekraftsamanheng har ein derfor fokus på LOCA, altså tap av kjøling. Derfor bygger ein inn ulike naudkjølesystem, ECCS (*Emergency core cooling system*), som skal kunne tre i kraft når den ordinære kjølinga blir borte. Dei første kommersielle reaktorane, som dei i Fukushima, har slike system som i stor grad er aktive ved at dei avheng av eigne pumper og naudstrømsaggregat. I nye reaktortypar blir systema meir og meir passive, og kjølinga skjer ved hjelp av naturleg konveksjon og tyngdekraft. I tillegg er det i reaktorbygget tilgjengeleg store lager av vatn til kjøling i fleire døger.

Varmeproduksjon ved stopp

Dersom ein stopper ein reaktor, vil det framleis bli produsert varme frå nedbrytinga av kortliva fisjonsprodukt i brenslet. Ved stopp utgjer dette om lag 7 % av den termiske effekten til reaktoren. I Fukushima var den minste reaktoren på 1380 MW, og dei andre var på 2380 MW termisk effekt. Resteffekten ved stopp da jordskjelvet kom, var på rundt

100 MW i den minste og rundt 170 MW i dei andre. Sidan årsaka til denne varmeutviklinga er nedbryting av ulike fisjonsprodukt med kort halveringstid, betyr det at effekten avtar meir eller mindre eksponentielt, sjå figur 1. Alt etter eit døger er varmeutviklinga på mindre enn 1 % av den termiske effekten.



Figur 1. Termisk resteffekt som funksjon av tid etter at reaktoren er stoppa. Kurvene er framstilling av to modellar: Retran-modellen og Todreas-modellen. Retran-modellen nyttar eksponentiell nedbryting av 11 grupper radionuklidar, og Todreas-modellen er empirisk med utgangspunkt i korleis reaktoren er blitt kjørt før stopp. I dette tilfellet er det dei to siste åra.

Det kritiske ved ein LOCA (tap av kjøling) er derfor å kunne starte kjølinga umiddelbart og kunne kjøle utan avbrott dei første 24 timane. Det er i denne perioden sjansen for å få skade på reaktorkjernen er størst. I Fukushima starta naudkjølesystemet, men tsunamien slo det ut, og ein miste kjølinga av reaktorane i dei mest kritiske timane. Alle reaktorane fekk derfor skade på reaktorkjernen, og ein reknar med at alle tre reaktorane har heilt, eller nesten heilt, nedsmelta kjernar. Om det er brot på reaktortanken der det er nedsmelta kjernar, er uvisst (mai 2011).

Barrierar

Filosofien knytt til tryggleik, og dermed hindring av utslepp ved ulykker, er basert på ulike barrierar som må brytast for at radioaktivt materiale frå reaktorkjernen kan komme ut.

Den første barrieren er røret som brenslet (urandioksidet) er innekapsla i. Det består av zircaloy, som er ei legering med zirkonium som hovudkomponent. Grunnen til at ein nyttar ei zirkoniumlegering, er at ho absorberer lite termiske nøytronar, har relativt høgt smeltepunkt, har mange viktige mekaniske eigenskapar og er relativt motstandsdyktig mot korrosjon.

Den andre barrieren er sjølve reaktortanken. Tanken er laga av stållegeringar som må vere spesielt gode til å tåle den strålinga dei blir utsette for. Tanken skal kunne tåle særs høge trykk, (75 atm for ein kokvassreaktor), og veggane i tanken er derfor 10 cm tjukke, eller meir.

Den siste barrieren er reaktorinneslutninga. Fukushima-reaktorane hadde to inneslutningar. Den indre er normalt fylt med nitrogen, slik at ved lekkasje av hydrogen frå tanken vil ein ikkje få nokon eksplosjon. Inneslutningane skal òg tåle eit visst trykk. I moderne reaktorar er det eiga kjøling av inneslutninga, i tillegg til at dei er utstyrte slik at hydrogenet blir kontinuerleg brent.

Konsekvensar ved tap av kjøling

Dersom ein skulle komme ut for ein LOCA betyr det at reaktorkjernen kan bli for varm. Det vil kunne få to konsekvensar som ein er redde for. Den eine er at reaktorkjernen vil bli så varm at han vil smelte, truleg ved 2500 °C. Dersom den termiske massen er stor nok, vil den kunne smelte seg gjennom botnen i reaktortanken. Dersom denne massen kjem i kontakt med vatn under tanken, vil ein kunne få ein såkalla dampeksplosjon. Då vil store mengder vatn momentant gå over til damp.

Det andre er ein er redd for er danning av hydrogen inne i reaktoren. Zirkonium har den uheldige eigenskapen at det reagerer med damp:

$$Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$$

Denne reaksjonen går raskt når temperaturen kjem opp i 900 °C. Hydrogen diffunderer gjennom metall. Dei tynnaste metallveggane som er i kontakt med hydrogen er dei røra som fører ut og inn av reaktortanken. Hydrogen vil derfor lekke ut gjennom desse og etter kvart samle seg oppunder taket på reaktorinneslutninga. Sidan hydrogen reagerer lett med oksygen til knallgass, representerer dette ein stor eksplosjonsfare.

Ved design av reaktorarar tar ein omsyn til dette. For å redusere eksplosjonsfaren ved hydrogen, kan ein fylle reaktorinneslutninga med nitrogen og/eller ha brennarar i taket som brenn opp (rekombinerer) hydrogenet. I Fukushima nytta ein begge

prinsippa. Men hydrogenbrennaranlegget gjekk på elektrisitet, noko som dei ikkje klarte å få på plass før det var for seint. I Fukushima var det derfor tre hydrogeneksplosjonar som øydela den ytre inneslutninga på tre av reaktorane. I Three Mile Island-ulykka i 1979, var det òg hydrogeneksplosjon, men her var inneslutninga så sterk at ho ikkje vart skadd ved eksplosjonen.

Hydrogenet vil diffundere inn i zircaloykapslinga og danne zirconiumhydrid som gjer at brenselkapslinga blir sprø og lettare blir øydelagt, og det blir danna blærer og sprekker. Dersom kapslinga svell ut (kalla "balooning") får ein mindre rom mellom brenselstavane, og kjølinga blir mindre effektiv.

Fukushimareaktorane

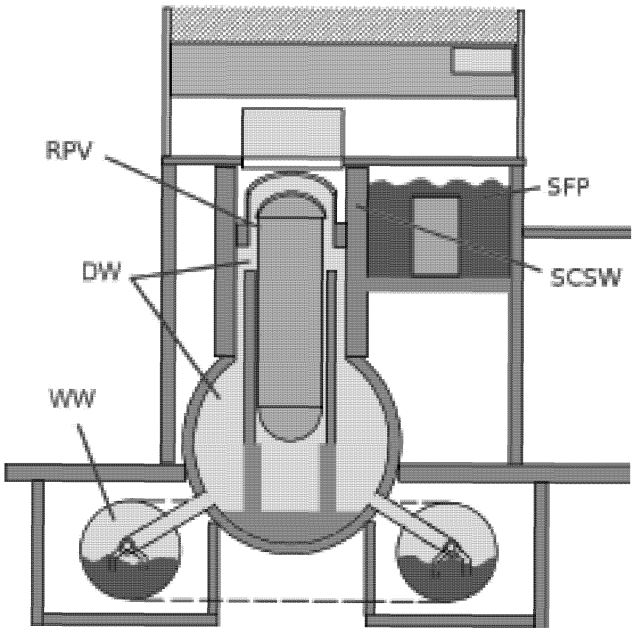
Reaktorane i Fukushima var alle kokvassreaktorar (BWR). Det vil seie at vatnet kokar inne i reaktoren og dampen driv turbinane direkte. Det betyr at ein må ha demineralisert vatn slik at ein ikkje får avsetningar i systemet av mineral som har vorte aktive i reaktoren. Bruk av sjøvatn til kjøling i Fukushima har derfor ført til at desse reaktorane aldri meir kan kjørast.

Reaktorane i Fukushima vart utvikla og konstruerte på 1960-talet, og er av dei første kommersielle kjernekraftreaktorane som vart sette i drift. På det tidspunktet hadde ein lite erfaring med ulykker.

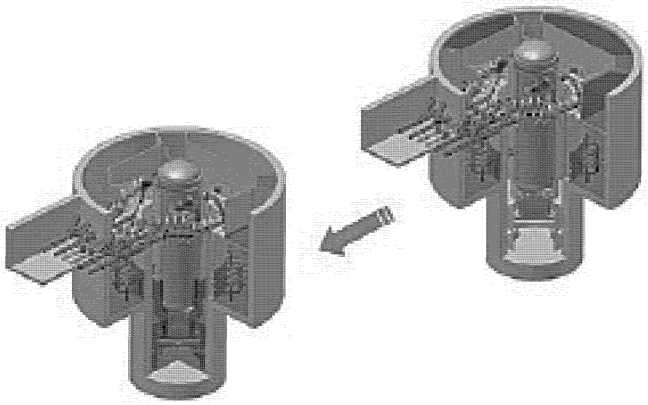
Ei prinsippskisse for denne reaktortypen ser ein i figur 2. Sjølve reaktortanken (RPV) er innerst. Utanpå denne er den indre inneslutninga som ser ut som eit omvendt nøkkelhol på figuren. Normalt er denne fylt med nitrogen. Dersom reaktoren skulle smelte ned, vil massen samle seg under tanken der det ikkje skal vere vatn. Vatnet som er i reaktoren vil ved nedsmelting vere i dampform. Denne dampen vil stige opp og ut i det rommet som er merka DW (drywell). Vidare vil dampen bli kondensert i den torusen som er merka WW (wetwell). På figuren ser ein òg bassenget for brukt brensel (SFP). I minst ein av reaktorane i Fukushima mistenker ein at ein har hatt ein hydrogeneksplosjon i torusen WW.

ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor)

Figur 3 syner ei skisse av den nyaste kokvassreaktoren, ESBWR, som truleg vil bli lisensiert av den



Figur 2. Prinsippskisse for kokvassreaktorane i Fukushima. DW = Drywell (tørrbrønn), WW = Wetwell (våtbrønn), SFP = Spent Fuel Pool (lagerbasseng for brukt brensel), RPV = Reactor Pressure Vessel (reaktortank) og SCSW = Secondary Concrete Shield Wall (skjermingsvegg av betong). Sjå hovudteksten for nærare forklaring.



Figur 3. På figuren er reaktotanken gul, og det blå er vatn. Til høgre ser ein vatnet som ligg i basseng inne i reaktorinneslutninga. Til venstre ser ein vasstankane nesten tømt etter at vatnet har vorte nytta til naudkjøling.

amerikanske kjernekraftkommisjonen, NRC, i 2011. Det som er karakteristisk for denne er at det er store mengder kjølevatn som ligg ferdig til bruk inne i reaktorinneslutninga, og som er nok til å kjøle reaktoren i fleire timar. Fleire av desse kjølesystema baserer seg på tyngdekraft framfor pumper for å kjøle reaktoren. Det er derfor ingen kritiske pumper eller dieselaggregat i denne typen reaktor.

Typar utslepp

Ved utslepp frå ein reaktor er det stoff i gassform som kjem lettast ut. Desse er alle fisjonsprodukt. Det er edelgassane xenon og krypton som blir vurderte til ikkje å utgjere nokon risiko sidan dei fleste isotopar av desse har veldig korte halveringstider og blir fort fortynna i atmosfæren. Gassar som derimot kondenserer ved romtemperatur, som jod og cesium, representerer den største strålefaren sidan dei vil legge seg som støv på bakken og komme inn i drikkevasskjelder. Desse kan òg spreie seg over store avstandar sidan dei lett blir frakta med vinden og kan falle ned saman med nedbør. Dei tre viktigaste isotopane som kan gi opphav til stråleskader ved utslepp, er lista i tabellen.

Tabell 1. Dei viktigaste nuklidane som kan gi opphav til stråleskadar med dei mest sannsynlege nedbrytingsprodukta.

Nuklide	Halvering	Stråling	Sluttprodukt
I-131	8,02 dagar	β, γ	Xe-131 (stabil)
Cs-134	2,06 år	β, γ	Ba-134 (stabil)
Cs-137	30,17 år	β, γ	Ba-137 (stabil)

Uran, plutonium og dei andre aktinidane derimot, er tunge stoff som ikkje så lett kjem ut av reaktoren. Om dei skulle komme ut, vil dei ikkje kunne bli spreidd over store avstandar.

Stråledosar i Japan

Etter ulykka i Japan er det sett i verk eit måleprogram som både dekker land og sjø og ulike matvarer, i tillegg til arbeidarane på verket. Dei første karta er alt publiserte som syner strålingsnivå i området rundt Fukushima. I skrivande stund (mai 2011) er det ingen som er døde på grunn av stråling ved Fukushima-kraftverket. Dei tre arbeidarane som har fått dei største stråledosene vil få ein auka risiko for å få kreft. Ifølgje professor Lester ved MIT (april 2011), vil sannsynet for at dei skal få kreft som følgje av den dosen dei har fått, auke frå 22,0 til 22,8 %. I evakueringssona er der ulike "hotspots" med stråling. Ein person som oppheld seg der det er mest stråling i tre veker, vil få 7,6 mSv. Det svarar til eit CT-scan, eller tre gonger den naturlege dosen på den staden.

Om effektar av stråling sjå Thormod Henriksen sin artikkel "Stråling og kreft" i dette heftet.

Litteratur

1. Jon Samseth: *Reaktorar for det 21. hundreåret.* Fra Fysikkens Verden, **70,** Nr. 1, 22-25 (2008)
2. Thormod Henriksen: *Stråling og kreft.* Fra Fysikkens Verden, **73,** Nr. 2, dette nummeret, (2011)
3. INES: *http://www-ns.iaea.org/tech-areas/emergency/ines.asp*
4. Fukushima-ulykka: *http://www.iaea.org/newscenter/news/tsunamiupdate01.html*
5. ESBWR: *http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/esbwr.html*
6. J. Alan Beard, GE: *http://www.ne.doe.gov/np2010/pdfs/esbwrOverview.pdf*
7. Professor Lester, MIT, 27. april 2011: *http://techtv.mit.edu/videos/12649-alumni-association-faculty-forum-online-april-2011-nuclear-energy-with-professor-richard-lester-phd-80-audio-podcast*

∞

Studér fysikk!

Dirigerer planetene jordas klima? Omstridt hypotese består ikke enkle tester

Kristoffer Rypdal *, *Boris Kozelov* ** *og Tatjana Živković* *

Fra Fysikkens Verden bringer i Nr. 1, 2011 en oppsiktsvekkende artikkel av Jan-Erik Solheim og Ole Humlum[1] sammen med en lederkommentar som uttrykker håp om at artikkelen vil stimulere til debatt. Denne artikkelen er et innlegg i en slik debatt. Artikkelen til Solheim og Humlum (S&H) er i all hovedsak et sammendrag av en artikkel av Nicola Scafetta om planetbevegelsenes innflytelse på klimaet.[2] Vår artikkel blir derfor i stor grad en kritisk gjennomgang av metodikken anvendt i denne artikkelen.

Statistisk hypotesetesting

Nicola Scafetta baserer sine teorier på en sammenlikning av estimerte effektspektra av tidsrekker for global temperatur på jorda med beregnete tidsrekker for hastigheten til solas massesenter omkring planetsystemets barysenter (SCMSS). Temperaturanalysen er basert på instrumentelle data som bare eksisterer for de siste 160 år. På bakgrunn av en enkeltstående ikke-stasjonær tidsrekke av denne lengden, hevder Scafetta å kunne detektere 11 distinkte perioder i signalet med perioder fra 6 til 62 år, med usikkerheter i periodeestimatene fra 0,13 til 4,85 år. Dette sammenliknes med perioder funnet ved samme analyse på SCMSS. Man behøver ikke være ekspert på spektralestimering for å se det meningsløse i denne metodikken, men man må være klar på hva slags hypotese Scafetta prøver å underbygge. *Hypotesen er at det i signalet for global temperatur finnes distinkte perioder med astronomiske årsaker som er uforanderlige over astronomiske tidsskalaer.*

* Institutt for fysikk og teknologi, Universitetet i Tromsø,

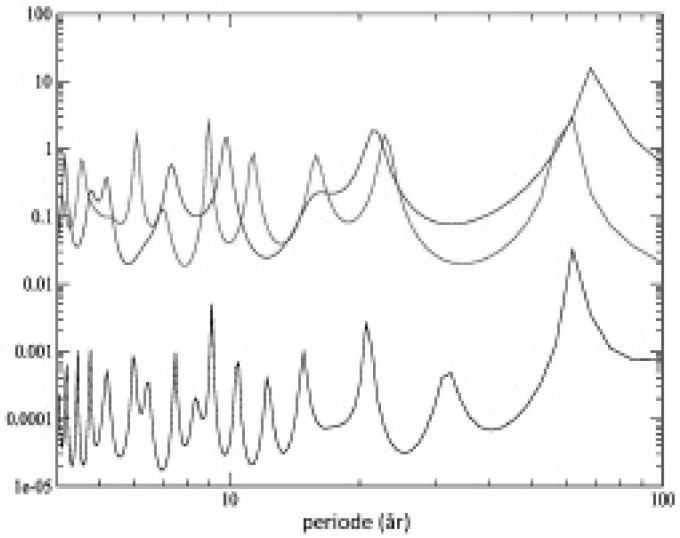
** Polar Geophysical Institute, Apatity, Russland.

Når man tester en hypotese H i forhold til en observasjon, er det en vanlig metode å formulere en såkalt null-hypotese H_0, som i utgangspunkt er en plausibel forklaring på observasjonen, men som er utformet slik at hvis H_0 er sann, så er H usann. Hvis observasjonen falsifiserer null-hypotesen (viser at H_0 er usann), så styrker dette tilliten til hypotesen H, men den beviser ikke at H er sann. Hvor styrket vår tillit til H bør være, avhenger av hvor mange alternative forklaringer som blir utelukket ved falsifiseringen av H_0. Kunsten i hypotesetesting består derfor i stor grad i å formulere gode null-hypoteser.

Scafettas null-hypotese er at effektspektret ikke inneholder distinkte perioder, men har en form som er karakteristisk for et støyliknende signal. Han finner topper i effektspektret som ligger utenfor konfidensintervallet for hva vi kan forvente av et slikt spektrum, og forkaster dermed (helt korrekt) null-hypotesen. Men det betyr bare at han har påvist at signalet inneholder komponenter som ikke er en del av støyspektret. På bakgrunn av den korte tidsrekken som er analysert finnes det intet grunnlag for å trekke noen konklusjon om at toppene i spektret er de samme over tid. Hvis temperaturdata for et annen 160-årsintervall var blitt analysert med de samme metodene, er det alle muligheter for at man ville finne helt andre perioder i signalet.

En slik test er det faktisk fullt mulig å utføre. Riktignok finnes det instrumentelle globale temperaturdata bare for de siste 160 år, men det finns en 360-års sammenhengende instrumentell temperaturserie for det sentrale England. Videre finns det rekonstruksjoner med god tidsoppløsning basert på treringer for minst to millennier (2000 år) tilbake i tid, og på iskjerner for minst ti tusen år tilbake. Analyse av slike data gir mulighet for å forme et statistisk ensemble av 160-årsintervaller som gir grunnlag for å si noe om den statistiske spredningen av de estimerte periodene, og om disse periodene endrer seg over tid.

Men det går også an å dele opp den instrumentelle tidsrekka 1850–2010 i to like deler og beregne spektra for begge delintervaller. Figur 1

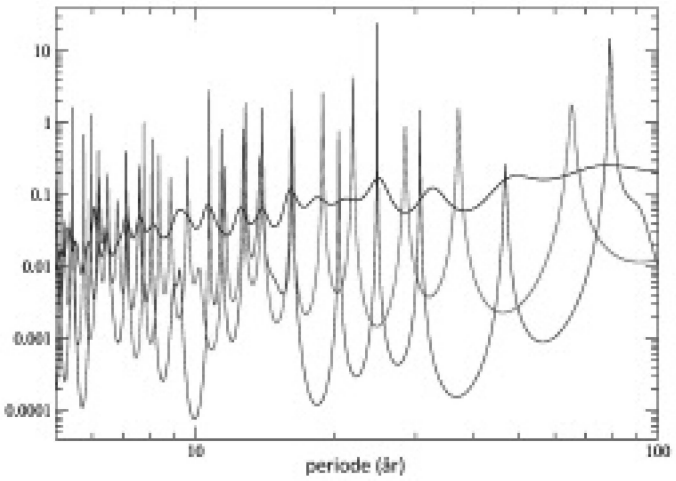


Figur 1. Effektspektra av instrumentell global temperatur estimert med samme metode som er brukt av Scafetta.[2] Nederste kurve er beregnet ved hjelp av hele tidsrekken 1850–2010, og er den samme som er presentert i S&H, figur 4.[1] De to øverste kurvene er estimert fra tidsrekkene for henholdsvis 1850–1930 og 1930–2010. Vi ser at toppene i spektret, som av Scafetta og S&H tolkes som estimerte perioder, er forskjellige i de tre analysene.

viser estimater av effektspektra for global temperatur for tidsintervallene 1850–1930 og 1930-2010 med Scafettas metode (de to øverste kurvene), sammen med estimatet for hele intervallet 1850–2010 (nederste kurve). Det siste er identisk med spektret presentert av Scafetta (S&Hs figur 4, øverste kurve). Spektrene er ikke de samme i de to tidsintervallene, og er forskjellige fra Scafettas spektrum.

Vi har gjort tilsvarende estimater for forskjellige 160-årsintervaller i tidsrekken for det sentrale England og finner også der ulike spektra i forskjellige intervaller. Det eneste som virker noenlunde robust i alle disse spektrene, er en periode som varierer mellom 60 og 70 år.

I figur 2 viser vi spektra for en rekonstruksjon, basert på treringer, av temperaturen på den nordlige halvkule for epoken år 1–1979. De to kurvene med skarpe topper representerer spektra beregnet for to ikke-overlappende 160-årsintervall. Disse spektrene er helt ulike, og det kan heller ikke defineres noen entydig 60-årssyklus. Den glattere kurven er et spektrum estimert ved å bruke hele tidsrekken. Denne viser at når vi bruker data som strekker seg over millennier, så finner vi ingen dis-



Figur 2. Effektspektra basert på en rekonstruksjon av temperaturen på den nordlige halvkule de siste 2000 år. Den glatte kurven er estimert fra hele tidsrekken og viser ingen klare topper i spektret. Dette betyr at det ikke finnes noen klare perioder i signalet som holder seg stabile over millennier. De to kurvene med skarpe periodetopper er beregnet fra to forskjellige tidsintervaller med lengde 160 år. Disse framviser helt ulike perioder, og indikerer at periodene i signalet varierer over tid.

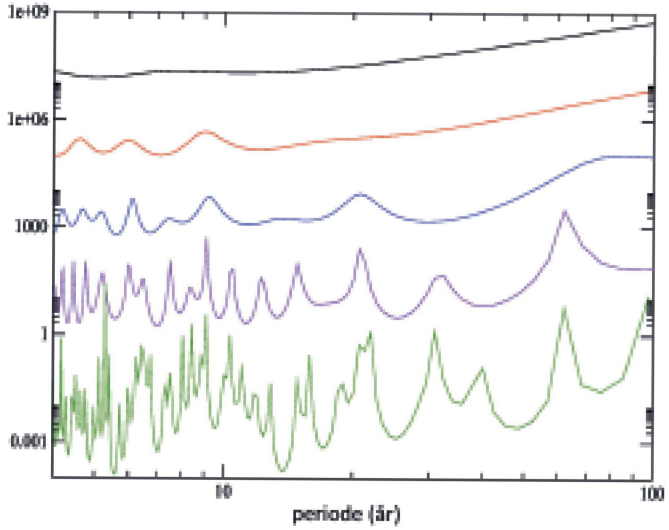
tinkte perioder i spektret. De celeste påvirkningene på klimasystemet viser seg å være kunstige effekter av spektralanalysen som "fordamper" når vi anvender tilstrekkelig lange dataserier.

Det er også viktig å merke seg at metoden for spektralestimering som Scafetta anvender, krever at man må velge en parameter som må være mindre enn antall datapunkter i tidsrekken, men ellers er det ingen prinsipielle restriksjoner på valget av denne parameteren. Resultatet av analysen er sterkt avhengig av dette valget, men Scafetta oppgir ingen grunn for sitt valg.

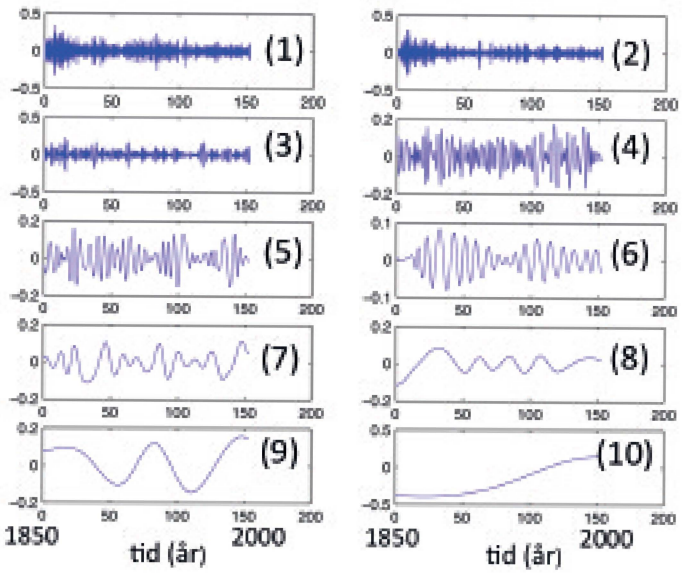
I figur 3 viser vi resultater av spektralestimeringen for varierende verdier av denne parameteren, som tydelig viser hvor følsomt resultatet er for dette valget. Med slik frihet i valget av datasett, analyseintervall og analyseparametre, er det straks mer forståelig hvordan man kan få en slik god overensstemmelse mellom spektrene for global temperatur og SCMSS. Å unnlate å diskutere alle valg som ikke gir slik overensstemmelse er uforenlig med god vitenskapelig metode.

Empirisk mode-dekomponering

Det finnes andre former for dekomponering av ikke-stasjonære tidsrekker enn effektspektre, som gir et klarere inntrykk av at perioder i signalet varierer over tid. Et eksempel er det som kalles empirisk mode-dekomponering (EMD). Vi har gjen-

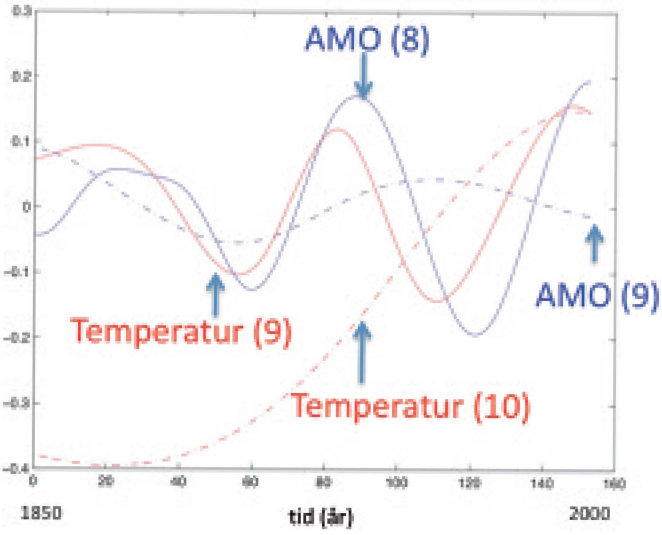


Figur 3. Effektspektrum estimert for global temperatur for 1850–2010 med forskjellige verdier av en fri parameter som estimeringsmetoden krever at man velger. Fra topp til bunn er denne parameteren henholdsvis 100, 250, 500, 1000 og 1910. Nest nederste kurve er Scafettas estimat som er identisk med nederste kurve i figur 1. Figuren viser at antall topper i spektret varierer med verdien av den valgte parameteren, slik at det er vanskelig å fastslå hvilke av disse toppene som svarer til reelle periodisiteter i signalet.



Figur 4. Empirisk mode-dekomponering (EMD) av tidsrekken for global temperatur (den nederste støyete grafen i figur 6) for tidsrommet 1850–2010. Tidsskalaen er gitt i år. Merk at skalaen på den vertikale aksen er forskjellig i de ulike panelene. Skalaen på vertikal akse er i °C. Vi kan ikke forklare hvordan de enkelte komponentene framkommer her. Det viktige er imidlertid at summen av alle komponentene er lik det opprinnelige signalet. Forskjellen fra vanlig fourierdekomponering er at de enkelte EMD-komponentene har variabel frekvens og amplitude.

nomført en slik analyse av det globale temperatursignalet og for en indeks for den Atlantiske Multidekadiske Oscillasjonen (AMO). Denne indeksen er et mål for svingningene i havtemperaturen i Nord-Atlanteren på tidsskalaer som strekker seg over flere tiår (dekader). Resultatet for temperatursignalet er vist i figur 4. I likhet med vanlig fourierdekomponering er summen av alle 10 komponenter lik det totale temperatursignalet, men hver komponent er ikke-stasjonær med variabel instantan frekvens og amplitude. I motsetning til fourieranalyse er denne metoden i stand til å fange opp komponenter i signalet der frekvensen varierer i tiden. Særlig interessant er dette for de langsomste komponentene i signalet.

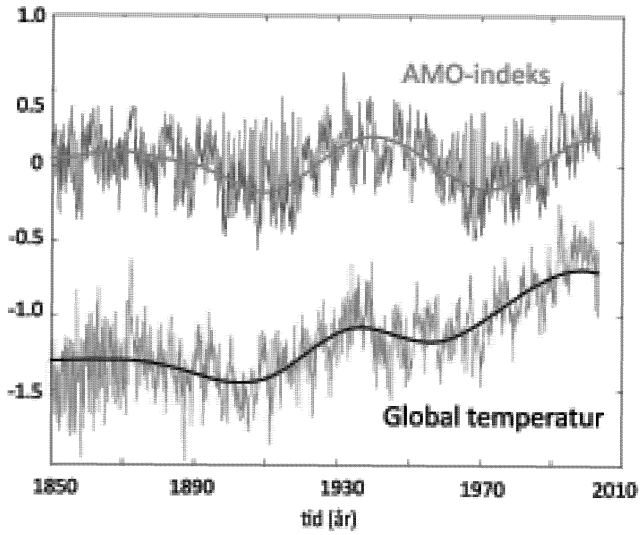


Figur 5. De to langsomste komponentene i en empirisk modedekomponering av henholdsvis global temperatur og AMO-indeksen. De nest langsomste komponentene i temperatur og AMO (de heltrukne røde og blå kurvene) følger hverandre relativt godt og viser at temperaturen i Nord-Atlanteren er sterkt koblet til global temperatur. Det er også en økende amplitude på denne oscillasjonen gjennom de siste 160 år. Den langsomste temperaturkomponenten er monotont voksende gjennom perioden. Begge disse effektene kan være resultat av menneskelig aktivitet.

I figur 5 har vi plottet de to langsomste EMD-komponentene i temperatursignalet sammen med tilsvarende komponenter for AMO (temperatursignalet har 10 komponenter, mens AMO-signalet har 9). De nest langsomste EMD-komponentene i de to signalene er nesten identiske og viser at svingninger av temperaturen i Nord-Atlanteren har en sterk innflytelse på den globale temperaturen. Den langsomste monotont voksende komponenten for temperatursignalet, samt den voksende amplituden på den oscillerende komponenten, er et uttrykk for en ikke-stasjonær trend i signalet som de fleste klima-

forskere tolker som et resultat av menneskelig aktivitet.

I figur 6 har vi plottet AMO-indeksen og det globale temperatursignalet sammen med summen av de to langsomste EMD-komponentene for begge signaler. Vi ser at summen av disse to komponentene representerer en utglatting av de to signalene som fanger opp de multidekadiske trendene.

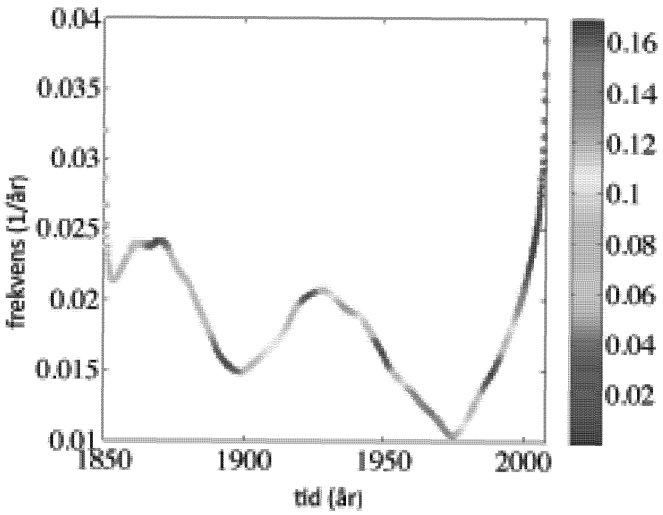


Figur 6. Den øverste støyliknende grafen viser en indeks for den atlantiske multidekadiske oscillasjonen (AMO), og den nederste støyliknende grafen er global hav + land-temperatur siden 1850. De glatte kurvene er summen av de to langsomst varierende komponentene i en empirisk mode-dekomponering av signalene. Tidsskalaen på den horisontale aksen er gitt i år. Skalaen på vertikal akse er i °C. Nullpunktet for temperaturen er valgt tilfeldig.

For de enkelte EMD-komponentene er det mulig å beregne en instantan frekvens og amplitude, og plotte disse som funksjon av tid. Dette har vi gjort for EMD-komponent nr. 9 i temperatursignalet i figur 7. Den instantane frekvensen er gitt langs den vertikale aksen, mens amplituden er gitt ved fargekoden. Figuren viser at frekvensen varierer mellom 0,010 og 0,025 svingninger per år (perioden varierer mellom 40 og 100 år) over epoken 1850–2010, og gir en pekepinn om hvor stor usikkerhet som er beheftet med Scafettas estimat av perioden for denne oscillasjonen.

Fancy modeller uten klimarelevans

En egen "boks" i S&Hs artikkel omtaler kollektiv synkronisering av koplete oscillatorer. Teksten og likningene er en ord-for-ord oversettelse av et appendiks i Scafettas artikkel, med unntak av beskrivelsen av, og en figur av, en numerisk simu-



Figur 7. Kurven viser instantan frekvens for EMD-mode nr. 8 (den som følger AMO) som funksjon av tid. Fargene måler instantan amplitude i henhold til fargeskalen til høyre. Vi ser at frekvensen varierer mellom 0,01 og 0,025 svingninger per år, som svarer til at perioden varierer mellom 40 og 100 år. Dette indikerer at det ikke kan detekteres noen presis 60-årsperiode i dette signalet.

lering av modellen. Boksen beskriver den såkalte Kuramoto-modellen, som presenteres som en modell for klimasystemet med naturlige svingninger vi finner i temperatur- eller nedbørsdata. Det er imidlertid svært vanskelig å se hvilken relevans denne modellen har for klimasystemet. Modellen kan utledes fra virkelige bevegelseslikninger bare under svært begrensende betingelser, som blant annet forutsetter et stort antall identiske, eller nesten identiske, oscillatorer med identiske koblinger. Den ble opprinnelig konstruert for å beskrive synkronisering av faser i kjemiske og biologiske systemer. Vi har lekt oss med numeriske løsninger av modellen, og har aldri funnet synkronisering uten at oscillatorene i utgangspunktet har nesten samme frekvens. Dette gjør modellen helt irrelevant for klimasystemet som består av oscillasjoner med svært ulike frekvenser.

Selvmotsigelser

Nicola Scafetta har gjennom flere år vært første forfatter på flere artikler hvor det argumenteres for en postulert "*complexity link*" mellom solaktivitet og jordas klima. Han hevder å ha funnet belegg for at solaktiviteten og globale temperaturdata begge kan beskrives som en spesiell type "rød støy" som går under betegnelsen "*Levy walk.*"[3] For et drøyt år siden publiserte Martin

og Kristoffer Rypdal en artikkel i *Physical Review Letters*[4] hvor vi påviser at disse påståtte statistiske likhetene mellom tidsrekker for solaktivitet og jordisk temperatur forsvinner hvis vi "de-trender" signalene. Dette betyr å korrigere sol-dataene for 11-årsperiodisiteten i solsyklusen og temperaturdataene for 60-årssyklusen. Vår filosofi er at disse periodiske trendene ikke skal betraktes som en del av rødstøyspektret hvis vi skal ha mulighet for å estimere dette korrekt. I en kommentar til vår artikkel hevder Scafetta[5] at man skal betrakte de langperiodiske variasjonene som en del av støyspektret, og dermed anta at de er et produkt av de samme fysiske prosessene som genererer de tilfeldige fluktuasjonene som vi betegner som støy.

I vårt tilsvar til kommentaren[6] påviser vi at amplituden på de langperiodiske svingningene er altfor store til å være et produkt av støyprosessen, men det er ikke vårt poeng her. Poenget er at Scafetta høsten 2010, i en kommentar publisert i *Physical Review Letters*[5], hevder at 60-årssyklusen i global temperatur er en integrert del av en støyprosess, mens han i sin artikkel publisert våren 2010[2] hevder det stikk motsatte, nemlig at denne syklusen atskiller seg signifikant fra en slik støyprosess og har en distinkt årsak i planetenes bevegelser.

Det er en del av forskeres ansvar å avsløre og gjøre forskersamfunnet og offentligheten oppmerksom på slike eksempler på sviktende konsistens i vitenskapelig argumentasjon.

Konklusjon

Vi har påvist at en analyse av klimatiske tidsrekker over et tidsintervall på 160 år ikke kan brukes til å underbygge en hypotese om at klimasignalet inneholder distinkte periodiske variasjoner med frekvenser som er stabile på astronomiske tidsskalaer. Nicola Scafettas resultater er ikke robuste når andre tidsintervaller eller andre klimadata, analyseres med samme metoder. Vi har demonstrert variabiliteten over tid i frekvensspektret for global temperatur gjennom en teknikk som kalles empirisk mode-dekomponering. Videre har vi påpekt at modellen som beskrives for synkronisering av oscillatorer i Scafettas og i Solheim og Humlums artikler, er irrelevant for klimasystemet. Endelig har vi påvist åpenbare selvmotsigelser i Scafettas forfatterskap som gjør ham til en lite troverdig kilde i debatten om årsaken til globale klimaendringer.

Referanser

1. Jan-Erik Solheim og Ole Humlum: *Astronomi og klima - Del I. Planetene og månen dirigerer jordas klima.* Fra Fysikkens Verden, **73,** Nr. 2, 21–26 (2011)
2. Nicola Scafetta: *Empirical evidence for a celestial origin of the climate oscillations and its implications.* Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, **72,** 951–970 (2010)
3. Nicola Scafetta and Bruce J. West: *Solar Flare Intermittency and the Earth's Temperature Anomalies.* Physical Review Letters, **90,** 248701-4 (2003)
4. Martin Rypdal and Kristoffer Rypdal: *Testing hypotheses about Sun-Climate Complexity Linking.* Physical Review Letters, **104,** 128501-4 (2010)
5. Nicola Scafetta and Bruce J. West: *Comment on "Testing hypotheses about Sun-Climate Complexity Linking".* Physical Review Letters, **105,** 219801-1 (2010)
6. Martin Rypdal and Kristoffer Rypdal: *Rypdal and Rypdal Reply.* Physical Review Letters, **105,** 219802-1 (2010)

∞

Husk å melde adresseforandring!

Talboteffekt med røntgenstråling

Dag W. Breiby og Emil J. Samuelsen *

Det er grunnleggende kunnskap for fysikere flest at bølger blir spredd når de passerer hindringer i form av gitter. I lang avstand bak gitteret opptrer hovedmaksima og bimaksima i det som blir kalt for diffraksjonsmønsteret for gitteret. Det er derfor litt overraskende at detaljene om intensitetsfordelingen nær gitteret, hvor fraunhofertilnærmelsen med parallelle stråler ikke gjelder, kan by på interessant og lite kjent fysikk som talboteffekten. Dette interferensmønsteret, først observert midt på 1800-tallet, har senere vært "gjenoppdaget" flere ganger, og fenomenet er i dag av betydning blant annet i optikk og kvantemekanikk. Her vil vi fokusere på bruk av talboteffekten ved moderne røntgenavbildning, med umiddelbare anvendelser i materialforskning, sikkerhet og medisin.

Diffraksjon og talboteffekt

Når stråling med bølgelengde λ blir sendt inn mot ei plate med gitter med mange spalter med spalteavstand a, vil en i stor avstand z bak plata observere diffraksjon med maksima i retninger θ i forhold til innfallsretninga gitt av diffraksjonsloven

$$n\lambda = a\,sin\theta \qquad (1)$$

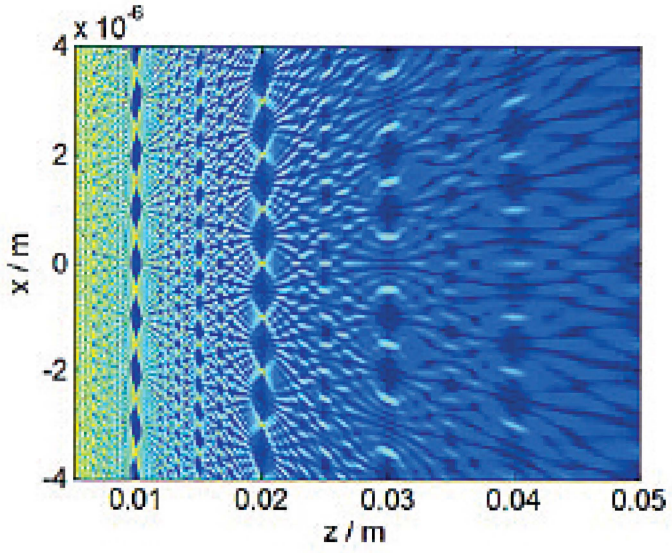
for heltallige n. Dette fenomenet går under betegnelsen fraunhoferdiffraksjon, og er gyldig når $z \gg a$ og λ.

Hvis man observerer diffraksjonen like bak gitteret, hvor man ikke kan anta parallelle stråler, blir mønsteret mye mer komplekst. Slik diffraksjon er mest kjent som fresneldiffraksjon, og det er her talboteffekten kan observeres.

Talboteffekten ble først observert med synlig lys og beskrevet i 1836 av engelskmannen William Henry Fox Talbot (1800–1877).[1] Lord Rayleigh[2] viste at det eksisterer en karakteristisk avstand i problemet, kalt talbotlengda, gitt som

$$z_T = 2a^2/\lambda \qquad (2)$$

Figur 1 viser en simulering av talboteffekten, et såkalt talbotteppe, som funksjon av avstanden (z-akse) og posisjon på tvers (x-akse). Detaljene i mønsteret avhenger av formen på spaltene, og vil gjenta seg i avstander lik multipla av talbotlengda. I tillegg er der en stor rikdom av andre intensitetsmaksima plassert ved brøkdeler av talbotlengda. I avstand halve z_T er samme mønsteret, men sideforskjøvet en halv spalteavstand. Ved 1/4 avstand og 3/4 avstand er det samme mønsteret igjen, men forminsket med en faktor 2. Slik gjentar mønsteret seg ved rasjonelle brøkdeler av talbotavstanden i



Figur 1. Simulering av talbotteppe gjort ved addisjon av koherente kulebølger fra et endelig gitter av punktkilder ($N = 21$, $a = 10^{-6}$ m, $\lambda = 10^{-10}$ m, logaritmisk intensitetsskala). Merk en faktor $\sim 10^4$ forskjell på akseskaleringen, strålene er bortimot parallelle. De lyse prikkene er intensitetsmaksima. Gitteret står vertikalt i $z = 0$ til venstre for bildet, med innkommende bølge fra venstre parallell med z-aksen. Legg spesielt merke til hvordan intensitetsfordelingen gjentar seg ved $z = z_T = 0,02$ m, og ved $z = z_T/2$. Det er reskalerte mønster ved rasjonelle fraksjoner av z_T. For vesentlig større z utvikler mønsteret seg gradvis til det velkjente fraunhoferdiffraksjonsmønsteret (figur 2).

* Institutt for fysikk, NTNU, Trondheim.

stadig mindre og tettere mønster. Hele talbotteppet er faktisk fraktalt: Det samme mønsteret finnes ved alle rasjonelle brøkdeler av talbotavstanden, bare med stadig mindre skala nærmere multiplum av z_T.

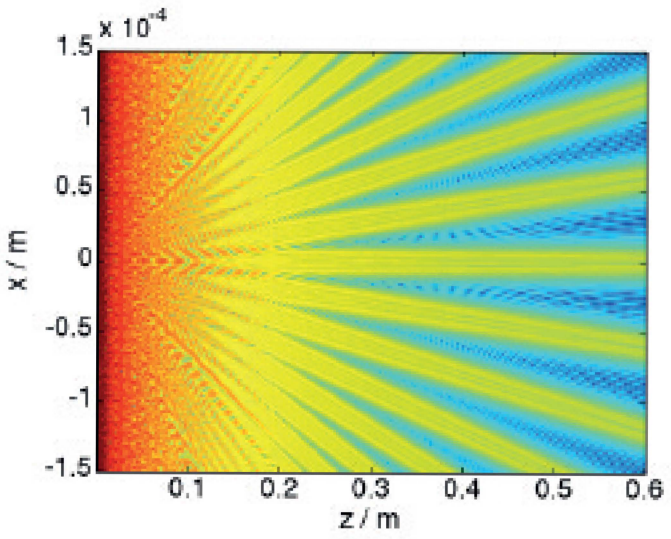
At teppemønsteret i figur 1 ekspanderer litt fra venstre mot høyre, altså fra spaltene og utover, skyldes at vi har brukt et begrenset antall spalter (21) i simuleringa. Med økende antall spalter blir mønsteret mer og mer repeterende i z-retningen, med periode lik talbotlengda. Et "uendelig" antall spalter ville gitt et teppe med parallelt mønster. Talbotmønsteret er overraskende komplekst. Vi ser mørke linjer og områder sammen med vakre, symmetriske tegninger av lyse felt og prikker. Denne detaljrikdommen vil bli noe utsmurt med ikke-perfekte spalteåpninger.

Siden spaltene blir belyst av en jamn, homogen strålingsfluks fra venstre, må det etter spaltene være slik at den integrerte energifluksen er den samme gjennom enhver flate parallelt med x-aksen, uavhengig av z-koordinaten. Akkurat ved multiple talbotavstander er fluksen i all hovedsak samlet i de skarpe, lysende prikkene, mens den for andre z-verdier er smurt nokså konstant utover parallelt med x, men med et fraktalt mønster av mørke felt. Interferensfenomenet fører altså til at energifluksfordelinga parallelt med x blir dramatisk omfordelt mens strålen går framover.

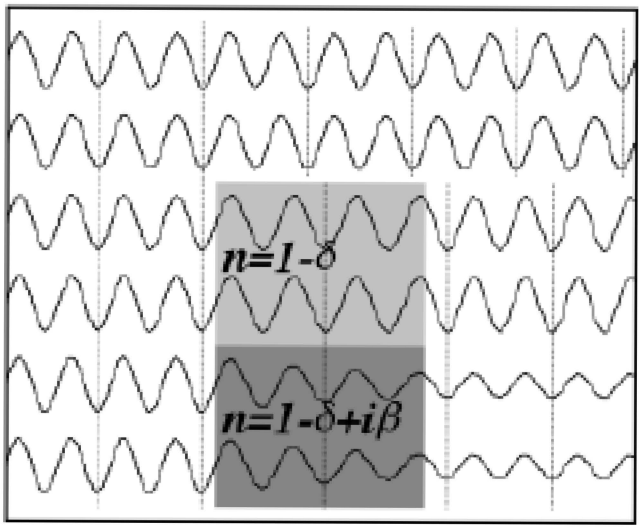
I stor avstand bak spaltene ($z \gg z_T$) går mønsteret gradvis over til et fraunhoferdiffraksjonsmønster etter likning (1), som illustrert i figur 2, der nulte til minst sjette ordens reflekser er synlige. Merk at z-akseskalaen er en faktor 100 større enn i figur 1, og at talbotmønsteret (like bak spaltene) ikke er oppløst på denne figuren.

Talboteffekten er et bølgeinterferensfenomen, og er blitt påvist ikke bare med elektromagnetiske bølger som synlig lys, men også med partikkelbølger. Talboteffekten er til stede ved alle nærfelt interferens- og diffraksjonsfenomen med bølger som er helt, eller i alle fall delvis, koherente, dvs. at bølgebevegelsen er i takt over hele bølgefeltet, som illustrert i figur 3. Eksempelvis kommer talboteffekten også til uttrykk i kvantemekanikk, som "*quantum revivals*" for "partikkel i boks".[2] I dette tilfellet vil z-aksen i figur 1 være en tidsakse.

I det følgende skal vi beskrive hvordan en i moderne materialfysisk forskning med røntgenstråler tar i bruk talboteffekten. Men først vil vi gjøre en nødvendig sving innom røntgenoptikk.



Figur 2. Overgangssonen mellom fresneldiffraksjon og fraunhoferdiffraksjon, beregnet for samme parametervalg som i figur 1. Merk at både x- og z-skalaene er større enn i figur 1. Detaljene i talbotmønsteret (for lave z-verdier) er ikke oppløst. Ved store z ses det karakteristiske fjernfeltmønsteret med hoved- og bimaksima.



Figur 3. En innkommende koherent røntgen-planbølge fra venstre treffer toppen av et todelt materiale (midt i bildet) som gir kun faseendring (øverst), og både absorpsjon (redusert amplitude) og faseendring (nederst). Merk at faseendringen kommer spesielt godt fram ved kanten. Med absorpsjonsavbildning vil kun den nederste delen av prøva kunne observeres.

Røntgenoptikk og avbildning

Ettersom røntgenstråling er elektromagnetiske bølger, kan deres vekselvirkning med materie beskrives ved en brytningsindeks som for røntgenfrekvenser er gitt ved $n = 1 - \delta + i\beta$, hvor parametrene $\delta \sim 10^{-6}$ og $\beta \sim 10^{-8}$ for faste stoff. For

luft er $n = 1$. Inkrementet δ er et mål for brytning (refraksjon), mens β angir svekkelse (absorpsjon) av strålen ved gang gjennom materialet. Det er interessant å merke seg at fordi $n < 1$, er *fasehastigheten* til røntgenstråling i materialer større enn lyshastigheten, c, i vakuum! Betryggende nok er *gruppehastigheten*, som er signalbærende, mindre enn c.

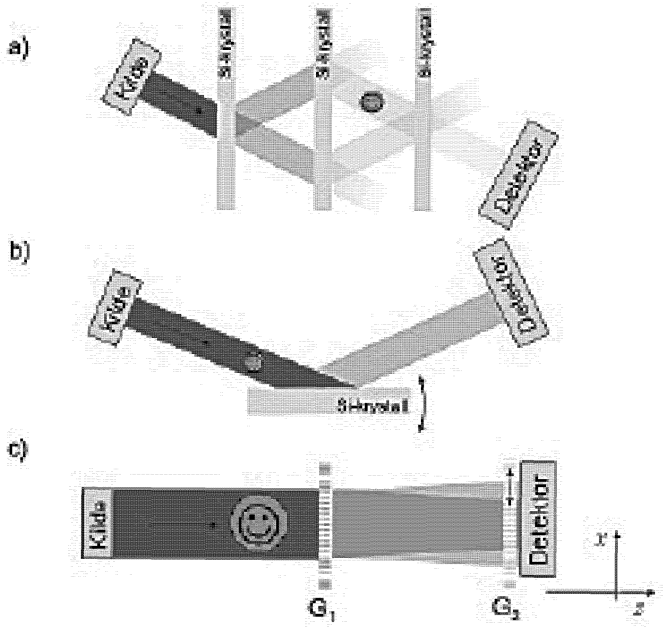
Røntgenbilder, slik vi kjenner dem fra medisinsk avbildning, er basert på absorpsjon, som skalerer med atomnummeret i fjerde potens, $\sim Z^4$, og er knyttet til den imaginære delen β av brytningsindeksen. Det er velkjent at skjelett og tenner med mye kalsium ($Z = 20$) på denne måten gir stor kontrast mot bløtvev bestående av lettere elementer som hydrogen ($Z = 1$), karbon ($Z = 6$) og oksygen ($Z = 8$). Absorbsjonskontrasten er for øvrig ikke avhengig av at bølgen er koherent. At δ typisk er to størrelsesordener større enn β, antyder at å basere avbildningen på refraksjonseffekter vil kunne øke følsomheten og dermed oppløsningen i bildet. Legg likevel merke til hvor små avbøyninger det er snakk om, i følge Snells lov er brytningsvinklene bare brøkdeler av en grad. Et enkelt eksempel på faseendring, og konsekvenser for bølgefronten, er vist i figur 3. Det har vært foreslått mange kreative måter opp gjennom årene på å detektere denne faseforstyrrelsen av bølgefronten ved å omdanne den til en (detekterbar) romlig intensitetsvariasjon, hver teknikk med sine styrker og svakheter.

Røntgeninterferometri

Røntgeninterferometeret til Bonse og Hart fra 1965, er skissert i figur 4a). Kort sagt består det av tre tynne krystallskiver av silisium, med eksakt samme orientering. Ved å la den innkommende røntgenstrålen treffe med en braggvinkel for diffraksjon, virker den første skiven som strålesplitter og skaper to bølger som til en viss grad vil være innbyrdes koherente. I skive nr. to brytes begge strålene en gang til etter som diffraksjonsbetingelsen automatisk er oppfylt, og i den tredje skiven rekombineres strålene og interfererer dermed i et utgående signal. Hvis det settes ei prøve inn i en av strålegangene, vil faseforskjellen mellom de to bølgene være gitt ved

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi s}{\lambda}\delta \qquad (3)$$

der s er veilengda i prøva. Faseforskjellen vil resultere i et interferensmønster. Svakheter med denne



Figur 4. Eksempel på fasekontrast-røntgenavbildning, a) Bonse & Hart interferometer, b) analysatoravbildning og c) talbotinterferometer. Sirkelen med smilefjes antyder prøva, og detektoren er en arealdetektor i alle tilfellene. To av fordelene med c) er at metoden ikke benytter krystalldiffraksjon og at den kan skaleres til å håndtere store prøver.

metoden er at den krever små prøver, og at svært intens innkommende stråling er nødvendig for å gi detekterbart signal etter at strålen har blitt diffraktert tre ganger.

En beslektet metode er basert på en analysatorkrystall, vanligvis silisium, se figur 4b). Her sendes en parallel og delvis koherent stråle gjennom prøva før den treffer analysatorkrystallen. De deler av bølgefronten som har fått en litt endret retning på grunn av faseendring, jamfør figur 3, vil ikke oppfylle diffraksjonsbetingelsen og dermed resultere i områder med redusert intensitet på detektoren.

Det er verdt å merke seg at ved å vri litt på krystallen slik at diffraksjonsbetingelsen *ikke* er oppfylt for den direkte strålen, kan denne teknikken også brukes til såkalt mørkfeltavbildning. Ved mørkfeltavbildning, best kjent fra lysmikroskopi, er det deler av den *spredte* strålingen fra prøva som vil treffe analysatorkrystallen i "riktig" vinkel, og dermed bidra til områder med høyere intensitet på en ellers mørk bakgrunn. Også for analysatoravbildning er det en utfordring å få både nok intensitet og tilstrekkelig parallell og koherent innkommende stråle, og man er i praksis avhengig av synkrotronstråling.

Avbildning basert på talboteffekt

Gitterbasert avbildning, illustrert i figur 4c), er blitt utviklet de siste årene.[3,4,5] Interferometeret består av to periodiske gitter, strålesplitteren G_1 med periode $g_1(\sim 5\ \mu m)$ og analysatoren G_2 med periode g_2. Strålesplitteren deler opp strålen ved diffraksjon, men ettersom røntgenbølgelengda λ er typisk ~ 1 Å $\ll g_1$, vil de forskjellige diffraksjonsordenene adskilles med bare få milliradianer, se likning (1). Disse ordenene er dermed knapt romlig oppløst.

Den lettest forståelige måten å gjøre talbotavbildning, og den vi vil begrense oss til her, er å la G_1 og G_2 være absorpsjonsgitter med samme periode, plassert i en avstand lik talbotlengda, z_T, fra hverandre. Talboteffekten vil resultere i en selvavbildning av G_1 ved G_2. Når G_2 skannes "på tvers", dvs. i retning x i figur 4, vil man derfor kunne måle moiréstriper på detektoren. Intensitetsmodulasjon $I^{ij}(x)$ i hver piksel (i,j) er periodisk i x, og er gitt til første orden ved

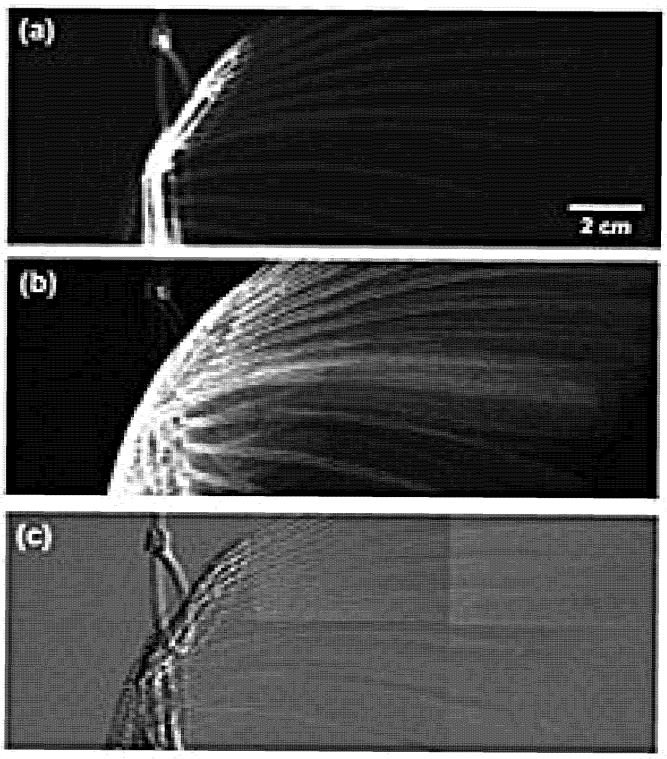
$$I^{ij}(x) = a_0^{ij} + a_1^{ij} cos\left(\frac{2\pi x}{g_2} + \chi_1^{ij}\right) \qquad (4)$$

Koeffisientene er tilpassede parametre som finnes både *med* prøve i strålegangen og for referansemåling $I^{ij,ref}$ *uten* prøve.

Eksponeringer målt ved forskjellige x vil hver for seg være gjenkjennelige som relativt lavoppløste bilder av objektet. Som vi nå kort vil diskutere, kan eksponeringene *sammen* danne grunnlag for høyoppløste rekonstruksjoner. Ettersom a_0^{ij} er gjennomsnittsverdien i hver piksel, som intuitivt tilsvarer det man ville måle ved helt å fjerne gitterne, vil et syntetisk bilde med pikselverdier $a_0^{ij}/a_0^{ij,ref}$ være ekvivalent med et tradisjonelt *absorpsjonsbilde.* Som nevnt gir *fasekontrastavbildning* ofte høyere kontrast. Slike bilder tar utgangspunkt i parametrene χ_1^{ij} og $\chi_1^{ij,ref}$, ettersom de gir et mål på forskyvningen av mønsteret når prøva settes inn, og dermed på faseforskjellen $\Delta\varphi$ fra likning (3).

En tredje avbildningsteknikk vi har nevnt er mørkfeltavbildning som er basert på spredt transmittert stråling (istedenfor den direkte). Slik småvinkelspredning vil lokalt "smøre ut" intensiteten, altså redusere intensitetsforskjellen mellom sterke og svake områder i talbotmønsteret. Dette vil redusere amplituden til den målte intensitetsmodulasjonen. Med andre ord, parametrene a_1^{ij} og $a_1^{ij,ref}$ fra (1) kan danne basis for mørkfeltavbildning.

Et eksempel på de tre avbildningsartene, alle basert på samme datasett, er vist i figur 5. Legg merke til både den forbedrede kontrasten i fasekontrastbildet sammenlignet med absorpsjonskontrastbildet, og også at å bruke småvinkelspredning som kontrastmekanisme framhever andre detaljer i mørkfeltbildet. Kort oppsummert: Fra det målte signalet kan man regne seg tilbake til en relativt sett høyoppløst avbildning ($\sim$ mikrometer) av prøva, og med vesentlig bedre kontrast enn man kan oppnå med tradisjonell absorpsjonsavbildning.



Figur 5. Eksempel på røntgenavbildning av fuglevinge. a) Absorpsjonsbasert røntgenbilde. b) Mørkfeltbilde og c) fasekontrastbilde, alle oppnådd fra samme måleopptak ved bruk av talbotinterferometer[4] (gjengitt med tillatelse fra American Institute of Physics og forfatterne).

Den største fordelen med den talbotbaserte avbildningsteknikken er at den ikke er avhengig av diffraksjon i en analysatorkrystall, og dermed gir mye bedre signalstyrke, faktisk i den grad at den muliggjør fasekontrastavbildning i hjemmelaboratorium.[5] Svært viktig er det også at denne teknikken åpner for både mørkfelt- og tomografisk (tredimensjonal) avbildning. Sist, men ikke minst, er metoden lovende fordi den ikke gir vesentlige begrensninger for volumet av prøva.

Avslutning

Talbotbasert røntgenavbildning gir vesentlig bedrede røntgenbilder med enkle midler, og metoden er derfor kommersielt interessant. Teknikken forventes

å bli tatt i bruk i stort omfang ved sikkerhetskontroller på flyplasser verden over, og selvsagt også i bio-, nano- og materialforskning, og i medisin.

Til slutt vil vi nevne at William Henry Fox Talbot er mest kjent for oppfinnelser i fotografering, spesielt av den typen som gikk under navnet *calografi*. Denne fotometoden gav negative bilder på glassplater som en kunne lage så mange positiver av en bare ville. Calografering var en forløper for fotografi med film, som var nærmest enerådende inntil digital teknikk slo igjennom rundt år 2000. Tross denne suksessen kan det hende at den største samfunnsnytten av Talbots innsats vil komme fra et fenomen han selv rapporterte for 175 år siden som "*very curious*", nemlig talboteffekten.

Referanser

1. W.H.F. Talbot: *Facts relating to optical science.* Philosophical Magazine, **9,** 401 (1836)
2. M. Berry, I. Marzoli and W. Schleich: *Quantum carpets, carpets of light.* Physics World, 39-44 June (2001) (Denne artikkelen er egnet for videre lesning om talbot-effekten.)
3. A. Momose, S. Kawamoto, I. Koyoma, Y. Hamaisihi, K. Takai and Y. Suzuki: *Demonstration of X-ray Talbot interferometry.* Japan. J. Appl. Phys., **42,** L866-L868 (2003)
4. F. Pfeiffer, M. Bech, O. Bunk, T. Donath, B. Henrich, P. Kraft and C. David: *X-ray dark-field and phase-contrast imaging using a grating interferometer.* J. Appl. Phys., **105,** 102006 (2009)
5. F. Pfeiffer, T. Weitkamp, O. Bunk and C. David: *Phase retrieval and differential phase-contrast imaging with low-brilliance X-ray sources.* Nature Physics, **2,** 258–261 (2006)

∞

Ein materialeigenskap som kan vere normal, gigantisk eller kolossal

Emil J. Samuelsen *

Effekt av magnetfelt på elektrisk motstand blir kalla magnetoresistans. Lenge var magnetoresistans ikkje særleg påakta tema i materialfysikken, men det har endra seg. I dag snakkar ein om normal m-r, anisotrop m-r, gigantisk m-r, og den aller heitaste varianten: kolossal m-r.

Elektrisk motstand

I metalliske leiarar er det som kjent dei "frie" elektrona som transporterer straumen når dei blir påverka av elektrisk spenning. Ein talar om elektrisk *motstand* eller *resistans*, eller også om den resiproke eigenskapen, *leiingsevne.*

* Institutt for fysikk, NTNU, Trondheim.

Spenningsfallet set opp eit elektrisk felt som akselererer elektrona, men dei møter hindringar på vegen i form av *imperfeksjonar* i materialet. Imperfeksjonane er dels forureiningsatom, dels krystallfeil, og dels termiske rørsler av atoma rundt likevektsposisjonane i krystallgitret, som elektrona kolliderer med så dei blir spreidde og mister farten. Motstanden kan kvantifiserast som ein *resistivitet*, ρ, som er bestemt av tettleiken, ρ_e, av leiingselektron og av den gjennomsnittlege tida, τ, mellom kvar kollisjon

$$\rho = m/(\rho_e e^2 \tau)$$

der m er elektronmassen og e er elementærladninga. Endring av resistivitet kan skje anten ved at sannsynet for kollisjonar (mellomkollisjonstida) endrar seg, eller ved endring av elektrontettleiken. Enkelt sagt er det den første mekanismen

som dominerer ved *anisotrop m-r* og *gigantisk m-r*, medan den siste er viktigast ved *kolossal m-r* som vi skal omtale nedanfor.

Normal magnetoresistans

I normale metall har magnetfelt forsvinnande liten innverknad på motstanden. Set ein på eit ytre magnetfelt, med flukstettleik $\mathbf{B}$, vil nok ladningane kunne bli avbøygde av lorentzkrafta $\mathbf{F} = -e(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$, der $\mathbf{v}$ er farten til elektrona. Men når straumen er blitt stasjonær, har avbøyinga ført til ladningsubalanse *på tvers* av leidningen, det ein kallar for Hall-effekt, og det gir opphav til ei motspenning som akkurat balanserer lorentzkrafta. Når stasjonære forhold er etablert vil derfor elektrona gå rett fram, og leiingsevna skulle såleis vere uendra av magnetfeltet. I verkelege metall er tilhøva ikkje heilt så ideelle som denne *frie-elektronmodellen* føreset, og ein observerer ein viss magnetfelteffekt på resistiviteten, men han er så liten at han i praksis ikkje spelar noka rolle. Effekten oppstår på grunn av kornstruktur i materialet, som gjer at det er mogleg for elektrona å forlenge gangvegen sin ved at dei følgjer spiralbanar rundt magnetfeltet i staden for å gå rett fram.

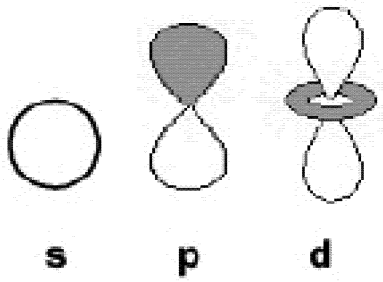
Anisotrop magnetoresistans

Den *anisotrope* (retningsavhengige) magnetfelteffekten observerer ein i magnetiske metall, som i jern (Fe), nikkel (Ni) og kobolt (Co), og i legeringar av dei. Effekten er ikkje stor: Resistiviteten med magnetfeltet retta parallelt med straumen er 1–2 % større enn med feltet loddrett på. Likevel blei denne anisotrope magnetoresistansen tatt i bruk i 1993 i utlesingssensorar for data frå magnetiske harddiskar. I dag brukar ein nesten utelukkande den gigantiske effekten som vi kjem til lenger framme.

Anisotrop magnetoresistans har sitt opphav i den kvantemekaniske effekten som blir kalla for *spinn-bane-kopling*. Elektronrørsla i banene om atomkjernen skapar eit magnetisk felt som elektronspinnet blir påverka av. Dei magnetiske elektrona er oftast av *d*-typen, som har ein utprega usymmetrisk fordeling (sjå ramma). Ved spinn-bane-koplinga orienterer dei seg i forhold til magnetfeltet på ein slik måte at elektronfordelinga er litt tettare loddrett på magnetretninga enn parallelt med den (dvs. er anisotrop). Denne anisotrope fordelinga fører på si side til at sjangsane for spreiing av leiingselektrona er noko større når dei går parallelt med magnetiseringa, altså litt større resistivitet for det parallelle tilfellet. Det er nok med svake magnetfelt, $< 10^{-3}$ T, i legeringar som *permalloy* (ei legering av 20 % Fe og 80 % Ni) som blei brukt i den første utgåva av magnetoresistive datautlesingsverktøy.

Elektrontilstandar i atom og fast stoff

Vår forståing av elektroniske tilstandar i materiala baserer seg på kvantemekanikk. I frie atom kan elektrona innta berre tilstandar med skarpt avgrensa energiar (dei er kvantiserte). Kvar tilstand blir karakterisert med eit sett "merkelappar" som blir kalla kvantetall, og som ein beskriv med tall- og bokstavkodar som s, p, 3d osv.
Til kvar tilstand svarar ei elektronfordeling i rommet. s-elektrona er kulefordelt kring atomkjernen, medan p- og d-elektrona har usymmetriske fordelingar, som vist på skissene i rekkefølge s, p og d.



Elektrona har også ei form for rotasjonseigenskap kalla "elektronspinn", som er det som gir opphav til magnetisme, og som har berre to verdiar, her kalla "opp" og "ned".
Fast stoff består som kjent av mange atom og molekyl bundne tett saman. Denne samanpakkinga endrar elektrontilstandane, og dei skarpe elektronenergiane som enkeltatoma har, flyt saman til tillatne energiområde som blir kalla energiband. Mellom banda kan det vere energiområde som elektrona ikkje kan ha, kalla energigap. Sjå illustrasjon i figur 3.
Naturen innrettar seg slik at den samla energien blir så liten som det er mogleg, men elektrona er samstundes underlagt ei lov som krev at det ikkje er meir enn eitt elektron i kvar tilstand. Dette fører til ei øvre grense for elektronenergien i kvart materiale, avhengig av kor mange elektron som i alt er tilstades. Denne øvre grensa blir kalla ferminivå.
Dersom ferminivået ligg inne i eit tillate energiband, er materialet ein god leiar, som metall. Men er nivået på høgd med energigap, er materialet isolerande eller kanskje halvleiande.

Gigantisk magnetoresistans (GMR)

Ordet "gigantisk" (engelsk "giant") blei tatt i bruk då ein mykje sterkare magnetoresistiv effekt enn den

anisotrope blei oppdaga i 1988. Truleg burde ein ha nytta eit litt mindre sterkt ord, for GMR er berre ein faktor ti sterkare enn den anisotrope.

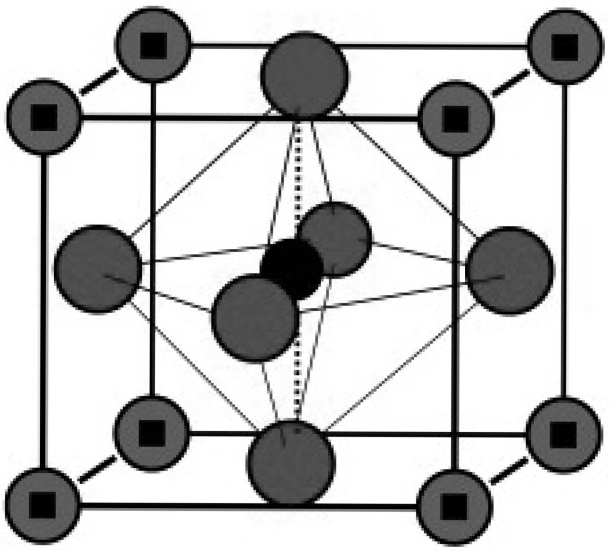
GMR opptrer i kunstige multilag av magnetiske og ikkje-magnetiske materiale med nanometertjukkleik. Resistansen for straum på tvers av laga viser seg å vere 20–30 % mindre når alle dei magnetiske laga er magnetiserte i same retning (ferromagnetisk) enn når dei er magnetiserte vekselvis i motsette retningar (antiferromagnetisk). Grunnen er at elektronspinnet spelar ei rolle: Sannsynet for spreiing av elektron er større når dei møter elektron med motsett spinnorientering enn med same slag spinnorientering. Denne effekten blei grundig omtalt i Fra Fysikkens Verden av Arne Skjeltorp i samband med Nobelprisen i fysikk 2007.[1]

Magnetoresistans er ein sers viktig eigenskap for utlesing av data frå magnetiske datalagringssystem. Data blir lagra på magnetiske harddiskar i form av opp/ned-magnetisering i diskmaterialet. Avlesinga skjer ved at eit lesehovud med *gigantisk* magnetoresistans blir "skanna" over dei magnetiserte stripene medan resistansen blir registrert. Med sensorar som har høg magnetoresistans kan lagringstettleiken på harddisken aukast, og utlesingsfarten kan gjerast større. Gigantisk magnetoresistans er forlengst tatt i bruk i kommersielle harddisksystem.

Kolossal magnetoresistans (CMR)

Ordet "colossal" vart tatt i bruk då ein endå sterkare magnetfelteffekt på elektrisk motstand blei oppdaga i 1993. Her kan effekten i gunstige tilfelle dreie seg om enno eit par storleiksordenar. Materiale som har CMR-effekt blei observert og rapportert alt i 1950.[2]

CMR er ikkje knytt til metall, og heller ikkje til kunstige nanostrukturar slik som GMR, men er knytt til diverse elektrisk leiande metalloksid. Dei mest studerte til no er oksid med perovskittstruktur (figur 1) av jern, nikkel og kobolt, men spesielt av mangan (Mn). Perovskitt ABO_3 har ein sers enkel krystallinsk oppbygging, der B-ionet er omgitt av seks oksygenion i oktaedergeometri, som vist i figur 1. Strukturen er bygd opp av slike einingsceller i alle seks retningar. Ein kan legge merke til at B-atoma (som Mn) har oksygenatom som "bruer" mellom seg, og at eventuell magnetisk kopling mellom dei går via dei mellomliggande O-atoma, såkalla "*superexchange*".

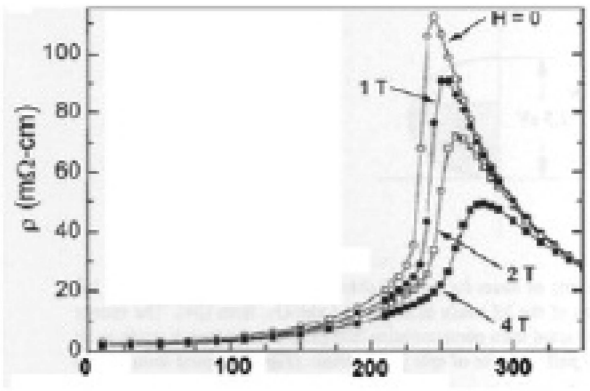


Figur 1. Minstecelle av perovskitt-strukturen ABO_3. Kuler med firkant: A = (La,Ca). Svart kule: B = Mn. Resterande kuler: O. B-atoma er omgitt av seks oksygenion som dannar eit oktaeder.

Eit mykje studert materiale er blandingsperovskitten $(La,Ca)MnO_3$. Dette materialet, med 75 % lantan (La) og 25 % kalsium (Ca), er ferromagnetisk for temperaturar under 250 K. I dette temperaturområdet er det også ein god elektrisk leiar, nesten som metall. Men det har den uvanlege eigenskapen at ved høge temperaturar, over 250 K, er det isolerande. Den magnetiske overgangen fører samtidig til ein *metall* $\Rightarrow$ *isolator-overgang* når ein går frå låg til høg temperatur. Metalloksid med den omvende eigenskapen, *isolator* $\Rightarrow$ *metall-overgang* frå låg til høg temperatur, er velkjent frå før, t.d. i vanadiumoksid (V_2O_3), som endrar resistiviteten med ein faktor 10^6 ved 160 K. Men her går det altså omvendt.

I 1993 vart det observert at resistansen i den isolerande tilstanden kan påverkast av eit ytre magnetfelt. Observasjonane er gjengitt i figur 2. For temperaturar like over den magnetiske overgangstemperaturen kan resistiviteten reduserast dramatisk i sterke magnetfelt. Det er denne effekten som kallast *kolossal magnetoresistans*. Moglege mekanismar blir omtalt seinare.

CMR-materiale som har magnetisk overgang ved romtemperatur, kan vere aktuelle som nye kandidatar for harddisksensorar som vil tillate endå tettare datalagring. Dei er også aktuelle for utvikling av såkalla *spinntronisk elektronikk*, der informasjonen blir knytt til spinntilstand heller enn til ladningstilstand. CMR er påvist i mange andre materiale enn perovskittar.

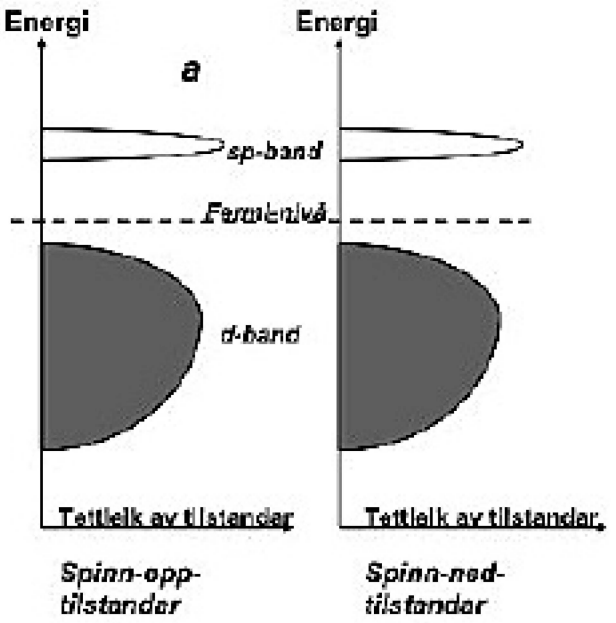


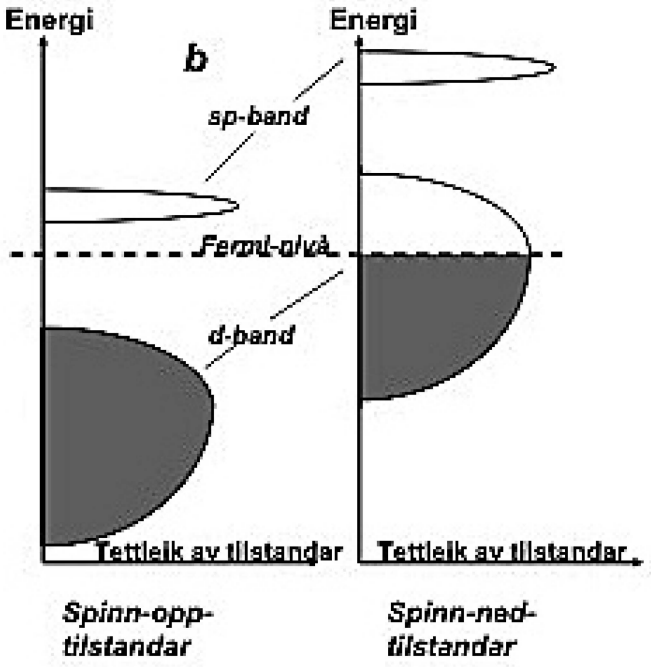
Figur 2. Kolossal magnetoresistans (CMR): Resistivitet for $La_{0,75}Ca_{0,25}MnO_3$ som funksjon av absolutt temperatur (kelvin, K) for ulike styrkar av ytre magnetfelt (i tesla, T).[3] (Gjengitt med løyve frå Institute of Physics, London.)

Atomær mekanisme for CMR

Den detaljerte mekanismen for CMR er ikkje vel forstått, men det er klart at effekten er knytt til dei magnetiske iona i gitret, i dette tilfellet Mn. For temperaturar under 250 K er elektronspinna på Mn-iona spontant einsretta (ferromagnetisme), samtidig som resistansen er låg (metallisk leiing), men over 250 K inntrer uorden av spinna (paramagnetisme) og resistansen aukar dramatisk. Eit påtrykt magnetisk felt fører til ein viss grad av spinninnretting også i paramagnetisk fase, samtidig som det reduserer resistansen. Nyare studium tyder på at materialet kan vere inhomogent i overgangsområdet ved 250 K, med nanometerstore isolerande korn i ein matrise av leiande materiale.

Det er lansert fleire forklaringsmodellar for CMR. Ein av dei går under namnet "halvmetall-modellen" (engelsk "half-metals", som ikkje må forvekslast med "semi-metals" som vismut og antimon, eller med "semi-conductors", som silisium og germanium). Her tar ein utgangspunkt i at den magnetiske ordninga ved låge temperaturar påverkar dei to spinntypane av elektrona ulikt, slik at det blir ulike nivå for elektron med spinn "opp" og med spinn "ned" (sjå faktaramme om elektrontilstandar). Ved høge temperaturar der magnetisk ordning er borte, forsvinn forskjellen på "opp" og "ned" for 3d-elektrona, og materialet har her same elektronstruktur som for normale oksid med perovskittstruktur (figur 1), dvs. blir isolerande (figur 3a). For normale oksidperovskittar ligg ferminivået mellom 3d-elektrona og sp-elektrona. Men i den ferromagnetiske tilstanden ligg ferminivået *over* energien for den eine spinn-





Figur 3. Skjematisk elektronbandbilde av manganitt i "halvmetall-modellen", illustrert med skilde band for dei to spinntypane. Grå område er "fylte", dvs. at der er elektrontilstadar i desse områda.

a: Umagnetisk tilstand (T >250 K). Ferminivået går i eit energigap, og materialet er ikkje elektrisk leiande.

b: Magnetisert tilstand (T <250 K, eller i sterkt ytre magnetfelt): Spinn-opp og spinn-ned-tilstandane blir påverka ulikt (splitting), og ferminivået skjer gjennom spinn-ned-bandet, og berre ned-spinn-elektron vil bidra til den elektriske leiingsevna.

typen, men går *igjennom* energiområdet for den andre. Slik er alle plassane for t.d. "spinn-opp" opptekne, medan dei for "spinn-ned" er berre delvis

opptekne. Leiinga vil derfor finne stad med berre "spinn-ned"-elektron, dei som har energi nær ferminivået. Nemninga "halvmetall" er knytt til det at straumtransporten vil skje berre med elektron av den eine typen ("spinn-ned" i figur 3b).

Det er interessant at fleire forskingsgrupper meiner å ha påvist eksperimentelt at dei elektrona som fører straum ved låg temperatur har i hovudsak berre ein type spinn. At leiande fase og isolerande fase eksisterer samtidig nær faseovergangen, er i samsvar med modellen når overgangen er av den diskontinuerlege typen. Men *halvmetall-modellen* forklarar ikkje alle sider ved CMR like godt, og mange forskarar er på leiting etter andre modellar. Til dømes er rolla til mikrostrukturen i materiala ikkje heilt gjort greie for.

Dei gåtefulle metalloksida

Mange metalloksid viser intrikate elektroniske eigenskapar som berre er delvis forstått[4, 5]: "isolator ⇒ metall"-overgangar (V_2O_3 ved 230 K, Fe_3O_4 ved 119 K, CrO_2 ved 320 K, o.a.); "supraleiing ⇒ normalleiing"-overgangar ($YBa_2Cu_3O_{6+x}$ o.a.); multiferroisitet (både ferro-elektrisk og ferro-magnetisk); og kolossal magnetoresistans CMR med "leiande ferromagnetisk ⇒ isolerande paramagnetisk"-overgang.

Mange oksid av overgangsmetall (mangan, jern, nikkel eller koppar) er "sterkt korrelerte elektronsystem": I faststoff-fysikken kan ein i mange samanhengar nytte tilnærminga at elektrona kan sjåast på som uavhengige partiklar, m.a. i halvleiarfysikken. Men oksida hentar sine spesielle eigenskapar frå det at elektrona si coulombske fråstøyting frå kvarandre ikkje kan neglisjerast; elektrona er "sterkt korrelerte", som ein seier. For eksempel har teoretikarane i over 25 år kjempa med å finne ein tilfredsstillande forklaring på supraleiinga i cuprid-perovskittane av typer $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ utan hell. CMR representerer ei utfordring av tilsvarande natur.

Referansar

1. Arne Skjeltorp: *Nobelprisen i fysikk 2007.* FFV **69**, Nr. 4, 112–114 (2007)
2. G.H. Jonker og J.H. Van Santen: *Electric conductivity of ferromagnetic compounds of manganese perovskite structure.* Physica **16**, 377–380 (1950)
3. A.P. Ramirez: *Colossal magnetoresistance.* J. Phys. Condens. Matter **9**, 8171 (1997)
4. C.N.R. Rao and B. Raveau: *Transition metal oxides.* Wiley (1998) 2nd edition.
5. Y. Tokura: *Correlated-Electron Physics in Transition-Metal Oxides.* Physics Today 50, July (2003)
6. J. Fontcuberta: *Colossal magnetoresistance.* Physics World, June 1999, 32-37. [Generell referanse.]

∞

Hva skjer

Fysikkolympiaden 2011

Nok en gang har vi avholdt norsk finale i fysikkolympiaden for elever i videregående skole. Finalen foregikk fredag 1. april på Fysisk institutt ved Universitet i Oslo. Jonas Kylling fra Spjelkavik vgs. ble best med 20 av 21 mulige poeng. Nr. 2 ble Håkon Johnsen fra Voss gymnas med 19 poeng. Trond Andersen fra Ås vgs, Nikolay Martyushenko fra Sandefjord vgs. og Vidar Skogvoll fra Trondheim katedralskole, fikk alle 17,5 poeng. Disse fem er tatt ut til den internasjonale fysikkolympiaden som skal være i Bangkok til sommeren.

For å komme med i finalen har disse elevene vært gjennom to uttakingsrunder. I første runde deltok 994 elever fra 111 skoler. Det er en betydelig økning fra i fjor, noe vi setter stor pris på! Vi vil jo at så mange som mulig skal oppleve gleden ved å få noen ekstra utfordringer i fysikk. Oppgavene, de fleste flervalgsoppgaver, var som vanlig utfordrende. Glenn Nordheim fra Bergens handelsgymnasium ble best.

Det var 67 elever som deltok i andre runde. Dette er en tre timers prøve som nok er en del vanskeligere enn den i første runde. Kravene til begrunnelser er også strengere her. Håkon Johnsen fra Voss gymnas, ble best med alt riktig! På de to neste plassene kom Nikolay Martyushenko fra Sandefjord vgs., og Morten Støstad fra Nesbru vgs.

De 17 beste fra andre runde deltok på en ukes kurs på norsk finale ved Universitetet i Oslo. Kurset ble avholdt fra 28. mars til 1. april. Kurset er svært omfattende og intenst. På programmet sto imidlertid ikke bare forelesninger, laboratorieøvelser og oppgaveløsning, men også et populærforedrag hver dag, sosiale tilstelninger, omvisning og orienteringer om studier ved UiO.

Deltakerne på treningskurset for fysikkolympiaden.

Flere av deltakerne har sendt oss hyggelige tilbakemeldinger. Her er et lite utvalg:

Jeg syntes uka på Blindern var veldig interessant og lærerik. Det var allikevel vanskelig å henge med på alt som skjedde på tavla. Tempoet var høyt, men dette er jeg helt enig i at det bør være. Måten det ble undervist på derimot, var ganske annerledes, i hvert fall fra det jeg er vant med. Kan jo nevne spesielt integraler og små d'er, som det ikke var lite av når man skulle igjennom utledninger. Jeg synes det er bra at det var lagt inn populærforelesninger og omvisning rundt i de forskjellige delene av fysikkbygningen. For min del gjorde dette at UiO ble atskillig mer attraktivt enn det var fra før av. Alt i alt er jeg veldig fornøyd med opplegget, og angrer ikke et sekund på at jeg takket ja til dette! Takk for eit veldig bra opphald!

... jeg vil gjerne få takke for en lærerik uke med mange spennende erfaringer. Jeg er alt i alt veldig fornøyd med opplegget, men skal jeg sette fingeren på noe så kunne jeg godt tenkt meg noe sosialt første kvelden. Hadde vært fint å bli litt bedre kjent fra begynnelsen av. Synes også det ble noe mye laboratoriearbeid. Kunne kanskje kortet ned en time på hver av øktene. Men ellers superfornøyd!

Opphaldet var fantastisk kjekt. Mange interessante førelesningar. Knallbra at de gir oss ei heil veke med fysikk-undervisning!

Den internasjonale finalen skal i år foregå i Bangkok i Thailand, 10. til 18. juli. Finalen består av to konkurransedager, en med teorioppgaver og en med eksperimenter. De andre dagene oppholdet varer, er det ulike sosiale og kulturelle arrangementer, sightseeing og ekskursjoner. Det er med andre ord et rikholdig program, og jeg tror alle som deltar vil si de har hatt en opplevelse for livet!

Den norske fysikkolympiaden er støttet av Forskningsrådet, Kunnskapsdepartementet og Universitetet i Oslo. Mer om fysikkolympiaden med oppgaver og resultater, finnes på våre nettsider: *http://www.mn.uio.no/fysikk/forskning/grupper/skolelab/fysikk-ol/*

Carl Angell

∞

Kommentar

Strålebehandling av kreft – et eksempel fra pionértiden

I en velskrevet og interessant artikkel i FFV 1/11 forteller Jan Folkvard Evensen om protonbestråling i behandling av kreft. Han gir oss innblikk i fysikk, medisin, historie og fremtidsutsikter, inkludert økonomi. For meg vakte artikkelen også minner om en episode omtalt i en bok jeg leste for omkring 40 år siden. Boken er "Lawrence and Oppenheimer" av Nuel Pharr Davies.

Fra 1930 arbeidet Ernest Lawrence ved Berkeley, med utvikling av syklotronen og også en rekke andre mulige partikkelakselleratorer. Han ble assistert av flere studenter, hvorav noen ble kjente fysikere. Den mest kjente er kanskje Robert Wilson, som er nevnt i Evensens artikkel. Det var langt fra rikelige midler til fysikkforskning på den tiden. Syklotronutviklingen ble i sin helhet finansiert som medisinsk forskning. Lawrence var meget dyktig til å ordne finansiering i form av gaver fra rike velgjørere. En stor del av disse midlene ble stilt til rådighet for Lawrence personlig. Han var ikke raus når det gjaldt lønninger til assistentene. Det meste gikk til laboratorieutstyr.

En viktig person i dette miljøet var Ernests bror, John. John Lawrence var lege og pendlet mellom Yale og Berkeley. I januar 1938 skulle John ha returnert til Yale for en lengre periode, hvilket ville vært meget uheldig for de kliniske bestrålingseksperimenter som var planlagt ved Berkeley. Private, ganske dramatiske, omstendigheter førte til at John ble værende ved Berkeley. Brødrenes mor, Gunda (ja, hun var av

norsk avstamning), hadde lenge følt seg dårlig, og nå var hun vesentlig verre. Ernest og John tok henne til Mayoklinikken i Minnesota for en grundig undersøkelse. Det ble konstatert langt fremskreden kreft i bekkenet. Gunda ble gitt høyst tre måneder å leve. "Vi skal få deg frisk, Mor", sa John. Brødrene bestemte seg for å prøve bestråling med nøytroner fra syklotronen. John tok moren med i en egen kupé på toget til California, og bestrålingen ble satt i gang umiddelbart etter ankomst. Nøytronstråling hadde ikke vært prøvet i behandling av kreft tidligere. Etter tre måneder kunne ikke Gunda merke noen forskjell, men hun var i live. Først etter to år(!) begynte hun å bli bedre. Etter fem år var hun symptomfri og fullt restituert. Gunda var 65 år da hun ble undersøkt på Mayo-klinikken. Hun levde til hun ble 83 år.

Mange av Johns medisinerkolleger var meget skeptiske og betraktet dette som et tilfelle av uforklarlig helbredelse, eller endog et mirakel. Tilfellet er ikke beskrevet i noe medisinsk tidsskrift. Davies' bok virker for meg meget etterrettelig, og jeg antar derfor at begivenhetene faktisk har funnet sted omtrent som beskrevet her. Gunda Lawrence var i så fall den første kreftpasient som ble behandlet med nøytronbestråling. I de følgende år ble imidlertid syklotronen brukt en dag pr uke til behandling av "dødsdømte" kreftpasienter. Det ble gjort en rekke forbedringer m.h.t. å gjøre strålen mer direktiv, og å finne fram til den nøytronenergien som hadde best virkning.

Referanser

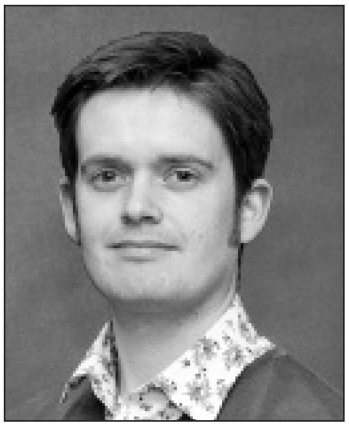
1. Jan Folkvard Evensen: *Helsebringende protoner.* Fra Fysikkens Verden, **73,** Nr. 1, 6–12 (2011)
2. Nuel Pharr Davies: *Lawrence and Oppenheimer.* A Classic Book, published by Simon and Schuster, New York (1969)

Olav Holt

∞

Nye Doktorer

Krister Mangersnes



Krister Mangersnes forsvarte 18. februar 2011 sin avhandling *Back-contacted back-junction silicon solar cells*, for PhD-graden ved Universitetet i Oslo.

Doktorgradsarbeidet har gått ut på å skape et nytt design og en ny produksjonsmetode for solceller av silisium. Resultatene fra dette arbeidet vil kunne gjøre det mulig å kutte vesentlig i produksjonskostnadene for solceller, og dermed redusere prisen på strøm fra solcellepaneler.

Mangersnes har jobbet med en type solceller som kalles bak-kontakterte, der alle kontakter er på baksiden. Slike solceller har vist et stort potensial for høy effektivitet, men har hatt en mer komplisert og kostbar framstillingsprosess enn vanlige silisiumsolceller med kontakter både foran og bak. Fokuset har vært på å forenkle framstillingsprosessen for slike solceller uten å redusere effektiviteten.

Arbeidet har vært fordelt mellom eksperimenter og datasimuleringer med bruk av laserteknologi i framstillingsprosessen. Datasimuleringene er brukt til å undersøke effektivitetspotensialet til ulike bakkontakterte solceller. Dette har gitt verdifull innsikt i virkemåten til slike solceller, og har gjort det mulig å optimalisere designet på datamaskinen, og dermed spare mye laboratorietid.

Doktorgradsarbeidet har vært utført ved avdeling for solenergi ved Institutt for energiteknikk på Kjeller, og har vært finansiert av Forskningsrådet. Arbeidet har ledet fram til flere vitenskaplige artikler og to patentsøknader. Veiledere har vært Sean Erik Foss, Tor Arne Fjeldly, Aasmund Sudbø og Erik Stenstud Marstein.

∞

Marit Dalseth Riktor

Marit Dalseth Riktor forsvarte sin avhandling *Experimental investigations of $Ca(BH_4)_2$ and its decomposition products* for PhD-graden ved Universitetet i Oslo, den 17. mars 2011.

Hydrogen er svært attraktiv som brensel i kjøretøyer, men gode metoder for lagring må utvikles. Lagring i metallhydrider regnes som den beste løsningen, og $Ca(BH_4)_2$ (kalsium-borohydrid) har potensiale som lagringsmedium. Men for at denne forbindelsen skal kunne bearbeides til å bli et reelt alternativ trengs kunnskap om prosessene som styrer opptak og frigivelse av hydrogen i materialet.

Marit D. Riktor har undersøkt hvordan kalsium-borohydrid dekomponerer ved oppvarming. Arbeidet er i stor grad basert på å studere hvordan materialene sprer røntgenstråler. Dette gir informasjon om hvilke nye kjemiske forbindelser som dannes og hvordan disse er bygget opp atomært. Studier av atomenes bevegelser er gjort ved nøytronspredning. En studie av faseoverganger er rapportert for første gang, og to nye forbindelser er identifisert og karakterisert. En av disse, $Ca_3(BH_4)_3(BO_3)$, er et resultat av delvis oksidasjon. Denne oppdagelsen er av interesse for grunnleggende borkjemi.

Identifisering av forbindelsene som dannes i dekomponeringsprosessen bidrar til økt forståelse av mekanismene som styrer opptak og frigivelse av hydrogen. Eksperimentene som er presentert i dette arbeidet har vist en betydelig mer kompleks dekomponeringsrute enn forventet. Dette har ført til stor aktivitet på videre undersøkelser av systemet.

Arbeidet er utført ved Institutt for energiteknikk, Kjeller, i samarbeid med Fysisk inst., UiO.

∞

Heidi Kristine Toft

Sivilingeniør Heidi Kristine Toft forsvarte den 25. mars 2011 sin avhandling *Level densities, gamma-ray strength functions and the evolution of the pygmy resonance in Sn isotopes* for PhD-graden ved Universitetet i Oslo.

Ved Syklotronlaboratoriet på Blindern foretas eksperimentelle målinger av statistiske egenskaper til atomkjerner ved høye temperaturer. Akselererte kjerner av hydrogen/helium sendes mot en folie av materialet man ønsker å studere. Kjernereaksjoner medfører at atomkjernene i folien blir eksitert. Når atomkjernene desintegrerer, sender de ut lette partikler og gamma-stråling som registreres.

Toft har målt tettheter av energinivåer og gamma-styrkefunksjoner i en rekke isotoper av tinn. Disse nivåtetthetene viste distinkte trappetrinn som antas å komme av at nøytronpar i kjernen blir brutt. Gamma-styrkefunksjonene viste seg å ha noe økt styrke i lavenergiområdet. Dette antas å være pygméresonansen – også sett i andre kjerner.

Opphavet til pygméresonansen er ukjent, men ofte foreslås den såkalte nøytronhud-oscillasjonen som det eksisterer teoretiske prediksjoner for. Toft sammenlignet resonansene fra ^{116}Sn til ^{122}Sn og fant at med økende nøytrontall øker resonansenergien, mens det ikke var noen observerbar endring i den integrerte styrken. Dette står i motsetning til hva man ville forvente. Flere målinger og en teoretisk forståelse av fenomenet, er derfor ønskelig.

Arbeidet ble utført ved Fysisk institutt ved UiO, og var finansiert av Forskningsrådet. Veilederne har vært førsteamanuensis Sunniva Siem, professor Magne Guttormsen og postdoktor Ann-Cecilie Larsen.

∞

Trim i FFV

Løsning på FFVT 1/11

Hvilken farge hadde hatten?

Tre menn, A, B, og C med bind for øynene, fikk plassert hatter på hodene sine. De fikk vite at hattene enten var røde eller grønne. Så ble bindene fjernet, og de fikk beskjed om å rekke en hånd i været hvis de så minst én rød hatt. Den som deretter ble sikker på fargen på sin hatt skulle straks forlate rommet.

Alle hattene var røde, så alle rakte en hånd i været. Og etter et par minutter gikk C ut av rommet. Hvordan kunne han vite fargen på sin hatt?

C spurte seg selv: Kan min hatt være grønn?

Hvis hans hatt var grønn, ville A ha forstått at han selv hadde rød hatt siden han så at B rakk opp hånden Og hvis Cs hatt var grønn, ville B ha forstått at han selv hadde rød hatt siden han så at A rakk opp hånden. Men da hverken A eller B forlot rommet innen rimelig tid, konkluderte C med at hans egen hatt måtte være rød.

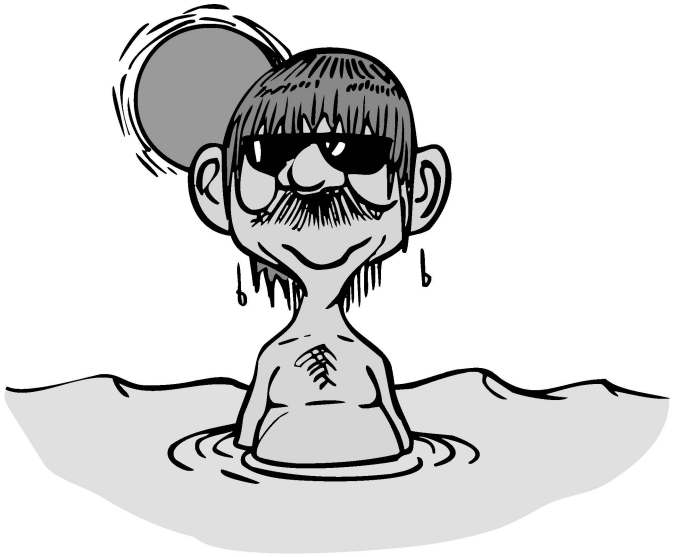
FFVT 2/11

Løslatelsessjansen

Tenk deg at du er fange hos en grusom fyrste, men som gir deg en sjanse til å bli løslatt. Du får to like vaser og 100 hvite og 100 sorte perler. Du skal fordele alle perlene på de to vasene, men ingen vase kan være helt tom.

Fyrstens assistent vil så i blinde trekke ut en tilfeldig perle fra en tilfeldig vase. Hvis perlen er sort, slipper du fri, men hvis den er hvit, vil det gå deg ille. Hvordan bør du fordele perlene for å maksimere sjansen for løslatelse?

∞



God sommer!

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

B
DISTRIBUERT AV POSTEN NORGE
posten
NORGE P.P. PORTO BETALT

Retningslinjer for forfattere

FRA FYSIKKENS VERDEN utgis av Norsk Fysisk Selskap og sendes til alle medlemmer. Disse er vanligvis utdannet fra universiteter og høgskoler med fysikk i sine fagkretser. Andre kan også abonnere på bladet. Blant disse er elever og 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. Fagutrykk 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 artikklene. 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.

GRAFISK PRODUSKJON OG TRYKK: OSLO SATS, REPRO & MONTASJE A/S
WWW.OSRM.INFO

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. Øyvind Svensen
Inst. for fysikk og teknologi, UiB,
Allégaten 55, 5007 Bergen.
Tlf: 55 58 28 78, Faks: 55 58 94 40
e-post: oyvind. svensen@ift.uib.no
Bankgiro: 7878.06.03258

Fra Fysikkens Verden

Redaktører:
Professor Øyvind Grøn
Høgskolen i Oslo og Fysisk inst. UiO
Stipendiat Marit Sandstad
Inst. for teoretisk astrofysikk, UiO

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 Bjarne Stugu
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@iu.hio.no
e-post: marit.sandstad@astro.uio.no
e-post: k.a.maseide@fys.uio.no

Fra Fysikkens Verden kommer ut 4 g. årlig.
Abonnement tegnes hos selskapets sekretær.
Årsabonnement 120 kr. (Studenter 60 kr.)
Løssalg 40 kr. pr. nummer.